

УДК:539.375;539.4:536.543

РІСТ ТРІЩИН ПОВЗУЧОСТІ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОВГОТРИВАЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. Є. АНДРЕЙКІВ, І. Я. ДОЛІНСЬКА, Н. В. ЯВОРСЬКА

Львівський національний університет ім. Івана Франка

Побудовано розрахункову модель для дослідження росту тріщини високотемпературної повзучості за довготривалих статично-розривних навантажень (маневрений режим експлуатації). Визначено залишкову довговічність труби паропроводу за таких умов експлуатації. Встановлено, що через таких навантажень може виникнути до непередбачене руйнування елементів конструкцій.

Ключові слова: *стаціонарний та маневрений режими експлуатації, залишковий ресурс, високотемпературна повзучість, труба паропроводу.*

Як відомо [1, 2], міцність елементів конструкцій за довготривалих статичних навантажень і високої температури вичерпується внаслідок високотемпературної повзучості їх матеріалів. Дослідженню цього явища присвячено багато праць, особливо для бездефектних матеріалів [1, 2]. Сьогодні побудовано низку розрахункових моделей для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами за високотемпературної повзучості [3–5]. Однак ще недостатньо вивчені випадки, коли водночас із високотемпературною повзучістю і довготривалим статичним навантаженням на матеріал діють додаткові зосереджені в часі фактори. Тому нижче запропоновано розрахункову модель для встановлення періоду докритичного росту тріщин у таких елементах.

Формулювання розрахункової моделі. Розглянемо елемент конструкції (пластину) з прямолінійною тріщиною завдовжки $2l_0$ (рис. 1), що знаходиться під дією високої температури і симетричного відносно лінії тріщини довготривалого статичного навантаження, яке за деякі проміжки часу змінюється n разів (маневрений режим [6]). Необхідно знайти залишкову довговічність такого елемента, враховуючи зміну навантажень, тобто часу $t = t_*$, коли в результаті високотемпературної повзучості тріщина підросте до критичного розміру l_* і він зруйнується.

Для розв'язання задачі використаємо енергетичний підхід [7], заснований на першому законі термодинаміки й рівнянні балансу швидкостей змін енергій. Враховуючи це, а також симетрію напруженого стану відносно лінії розміщення тріщини, швидкість зміни її довжини запишемо так:

$$dl/dt = \partial W_p^{(2)}(t)/\partial t / (\gamma_C - \gamma_t - \partial W_p^{(1)}(l)/\partial l), \quad (1)$$

де $W_p^{(2)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування біля вершини тріщини під час високотемпературної повзучості, яка виділяється за сталої довжини тріщини, генерується самою пластиною і залежить тільки від часу t ; $W_p^{(1)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування, яка генерується самою пластиною під її додатковим навантаженням-розвантаженням.

ням; γ_t – питома робота пластичних деформацій у зоні передруйнування за росту тріщини; γ_C – її критичне значення.

Для повноти математичної моделі до рівняння (1) додамо відповідно початкову і кінцеву умови

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*. \quad (2)$$

Тут критичну довжину тріщини визначаємо за енергетичним критерієм:

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_C. \quad (3)$$

Величини $W_p^{(1)}(l)$, $W_p^{(2)}(t)$ у рівнянні (1) знайдемо так [4, 5, 7]:

$$W_p^{(1)}(l) = 0,25(1-R)^4 \int_0^l \alpha \sigma_t \sum_{i=1}^n \delta(x-l_i) \left[\delta_t^2(x) - \delta_{th}^2 \right] dx; \quad (4)$$

$$W_p^{(2)}(t) = \sigma_t \left[\left(\delta_t + A \left[\delta_t \delta_C^{-1} \right]^m t \right) \right]^2, \quad (5)$$

де α – втомна характеристика матеріалу, яку розраховують експериментально [7]; A , m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу [4, 7]; $\delta_t(l)$ – розкриття у вершині тріщини; δ_C – його критичне значення; δ_{th} – нижнє порогове значення $\delta_t(l)$, за якого тріщина не поширюється; $\delta(x)$ – дельта-функція [8]; σ_t – усереднене напруження в зоні передруйнування; R – коефіцієнт асиметрії циклу за навантаження-розвантаження; l_i – довжина тріщини повзучості в момент i -го розвантаження.

Підставляючи формули (4) і (5) у співвідношення (1), одержимо кінетичне рівняння для визначення швидкості поширення тріщини в пластині під довготривалим статичним навантаженням, коли за деякі проміжки часу t_i змінюється статичне навантаження (навантаження-розвантаження),

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2A \left[\delta_t \delta_C^{-1} \right]^m}{1 - \delta_t \delta_C^{-1} - 0,25\alpha(1-R)^4 \delta_C^{-1} \sum_{i=1}^n \delta(l-l_i) \left[\delta_t^2(l_i) - \delta_{th}^2 \right]} \quad (6)$$

з відповідними початковими і кінцевими умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad \delta_t(l_*) = \delta_C. \quad (7)$$

Для обчислення розкриття вершини макротріщини запишемо такі співвідношення [3]:

$$\delta_{th} = \frac{K_{th}^2}{\sigma_t E}, \quad \delta_t = \frac{K_I^2}{\sigma_t E}, \quad \delta_C = \frac{K_{IC}^2}{\sigma_t E}, \quad (8)$$

де E – модуль пружності; K_{th} – нижнє порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I , коли тріщина за циклічного навантаження не поширюється [7]; K_{IC} – характеристика тріщиностійкості матеріалу.

Скориставшись співвідношенням (8), рівняння (6) подамо у вигляді

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2A \left[K_I K_{IC}^{-1} \right]^{2m}}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2} - 0,25\alpha(1-R)^4 K_{IC}^{-2} \sum_{i=1}^n \delta(l-l_i) \left[K_I^4(l_i) - K_{th}^4 \right] \sigma_t^{-1} E^{-1}} \quad (9)$$

з відповідними початковими і кінцевими умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K(l_*) = K_{IC}. \quad (10)$$

Інтегруючи рівняння (9) за умов (10), отримаємо:

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}}{2A [K_I K_{IC}^{-1}]^{2m}} dl - \frac{\alpha(1-R)^4}{8AE\sigma_t K_{IC}^2} \int_{l_0}^{l_*} \sum_{i=1}^n \delta(l-l_i) [K_I^4(l_i) - K_{ih}^4] \cdot [K_I(l_i) K_{IC}^{-1}]^{-2m} dl. \quad (11)$$

Вважатимемо, що навантаження-розвантаження відбувається впродовж часу $t = t_i$ ($i = 1, \dots, n$), коли тріщина повзучості поширюється на однакові довжини $\Delta l = n^{-1}(l_* - l_0)$. Використовуючи теорему про середнє [8] за великих n , тобто якщо $\Delta l \ll (l_* - l_0)$, вираз (11) запишемо так:

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}}{2A [K_I K_{IC}^{-1}]^{2m}} dl - \frac{\alpha(1-R)^4}{8AE\sigma_t K_{IC}^2} \frac{n}{l_* - l_0} \int_{l_0}^{l_*} [K_I^4(l) - K_{ih}^4] \cdot [K_I(l) K_{IC}^{-1}]^{-2m} dl. \quad (12)$$

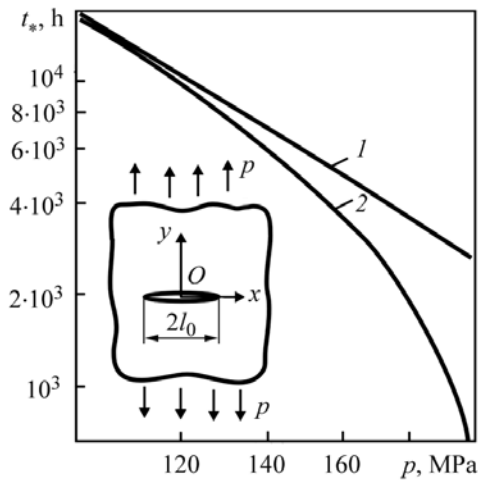


Рис. 1. Залежність залишкової довговічності t_* від зміни зусиль інтенсивності p у стаціонарному (крива 1) і маневреному (крива 2) режимах експлуатації.

Fig. 1. Dependence of residual life, t_* , on the force intensity, p , change in stationary (curve 1) and manoeuvring (curve 2) regimes of exploitation.

Отже, співвідношення (12) визначає залишкову довговічність елементів конструкцій, які працюють під дією довготривалого статичного навантаження за високих температур і навантажень-розвантажень.

Аналог задачі Гріффітса для кінетики поширення тріщини високотемпературної повзучості за маневреного режиму експлуатації. Розглянемо нескінченну металеву пластину зі сталі 12Х1МФ [6] з початковою тріщиною довжини l_0 , яка нагріта до високої температури T_0 і розтягується в нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p , напрямленими перпендикулярно до осі Ox . Слід визначити час $t = t_*$, коли відбудеться n навантажень-розвантажень, з досягненням яких тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Для розв'язання задачі застосуємо сформульовану розрахункову модель (9), (10) і кінцеву формулу (12), яка тут набуде вигляду

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} 0,5 \cdot [1 - \pi l p^2 K_{IC}^{-2}] A^{-1} [p \sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{-2m} dl - n (l_* - l_0)^{-1} \times \int_{l_0}^{l_*} \alpha(1-R)^4 [p^4 \pi^2 l^2 - K_{ih}^4] / 8AE\sigma_t K_{IC}^2 [p \sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{2m} dl, \quad l_* = p^{-2} \pi K_{IC}^2. \quad (13)$$

Для апробації формули (13) розглянемо конкретний випадок, коли довжина початкової тріщини 2 mm. Прийнемо такі механічні характеристики для сталі 12Х1МФ [6]: $\alpha = 4$, $E = 160$ GPa, $R = 0$, $\sigma_t = 520$ МПа, $K_{IC} = 45$ МПа \sqrt{m} , $A \approx 4 \cdot 10^{-7}$ m/h, $K_{th} = 6,2$ МПа \sqrt{m} , $m \approx 1,2$, $n = 125$. Беручи до уваги ці дані та співвідношення (13), побудуємо залежність залишкової довговічності t_* від зміни навантаження p (рис. 1) без і з урахуванням додаткового навантаження-розвантаження. Як бачимо, у першому випадку це може призвести до переоцінки залишкового ресурсу пластини і непередбачуваного руйнування елемента конструкції.

Визначення залишкового ресурсу труби паропроводу з півеліптичною тріщиною за маневреного режиму експлуатації. Під впливом довготривалих експлуатаційних навантажень і докільля пришвидшиться розвиток наявних у паропроводах і їх зварних з'єднаннях дефектів типу тріщин. Тому, щоб відвернути непередбачене їх руйнування і запобігти аварійним ситуаціям, важливо визначити залишковий ресурс з урахуванням експлуатаційних факторів. Щоб знайти залишкову довговічність паропроводу в маневреному режимі роботи (час до його розгерметизації), побудуємо розрахункову модель розвитку в стінці труби поверхневої півеліптичної тріщини з півосями a_0 , b_0 і визначимо час $t = t_*$ до її розгерметизації (рис. 2). Введемо такі позначення: r – радіус труби; h – товщина її стінки.

Реалізуємо задачу, використовуючи відомі результати [5] і співвідношення (1), яке тут через зміну площі S тріщини має вигляд

$$dS / dt = \partial W_p^{(2)} / \partial t / (\gamma_C - \gamma_t - \partial W_p^{(1)} / \partial S) \quad (14)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, S(0) = S_0; \quad t = t_*, S(t_*) = S_*, \quad (15)$$

де критичну площу тріщини $S = S_*$ знаходимо за формулою $S_* = \pi b(t_*) a(t_*)$, $b(t_*) = h$.

Розв'язок задачі (14), (15) пов'язаний зі значними математичними труднощами. Для його спрощення, не втрачаючи при цьому потрібної для інженерних розрахунків точності, застосуємо метод еквівалентних площ [3], згідно з яким зміна площі тріщини розглядуваної конфігурації буде наближено така, як для півкругової радіуса ρ такої ж початкової площі. Враховуючи це, математичну модель (14), (15) подамо як

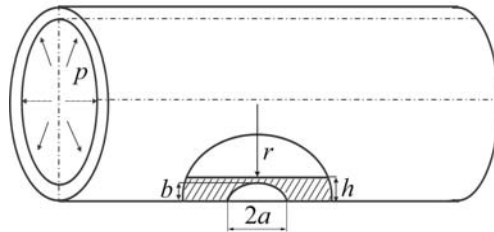


Рис. 2. Схема навантаження труби з тріщиною.

Fig. 2. Loading mode of a pipe with a crack.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{2A [K_I K_{IC}^{-1}]^{2m}}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2} - 0,25\alpha(1-R)^4 K_{IC}^{-2} \sum_{i=1}^n \delta(\rho - \rho_i) [K_I^4(\rho_i) - K_{th}^4] \sigma_t^{-1} E^{-1}} \quad (16)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \rho(0) = \sqrt{a_0 b_0}; \quad t = t_*, \rho(t_*) = h, \quad (17)$$

де ρ_i – радіус півколової тріщини в момент i -го розвантаження; n – сумарна кількість навантажень-розвантажень у паропроводі за маневреного режиму його експлуатації. КІН тут запишемо так [3]:

$$K_I = 0,7\sigma\sqrt{\pi h\varepsilon}\left(1+0,32\varepsilon^2\right)\left(1,04+0,23\varepsilon^2-0,11\varepsilon^4\right); \varepsilon = \rho/h; \sigma = prh^{-1}.$$

Розраховуватимемо для конкретного паропроводу зі сталі 12Х1МФ з такими ж механічними характеристиками, як і для задачі Гріффітса, і геометричними параметрами [6] $b_0 = 40$ mm, $a_0 = 50$ mm, $n = 886$, $r = 162$ mm, $h = 60$ mm. За числової реалізації задачі співвідношення (16), (17) для безрозмірної характеристики $\varepsilon(t) = \rho(t)h^{-1}$ буде:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2h^{-1}AF_1^{2m}(\varepsilon)}{1 - F_1^2(\varepsilon) - 0,25\alpha(1-R)^4 K_{IC}^{-2}h \sum_{i=1}^n \delta(\varepsilon - \varepsilon_i) \left[K_{IC}^4 F_1^{4m}(\varepsilon_i) - K_{th}^4 \right] \sigma_i^{-1} E^{-1}}, \quad (18)$$

$$t = 0, \varepsilon(0) = \varepsilon_0 = 0,75; \quad t = t_*, \varepsilon(t_*) = 1, \quad (19)$$

де $F_1(\varepsilon) = 0,7\sigma K_{IC}^{-1}\sqrt{\pi h\varepsilon}\left(1+0,32\varepsilon^2\right)\left(1,04+0,23\varepsilon^2-0,11\varepsilon^4\right)$.

Інтегруючи вираз (18) за умов (19) з урахуванням поданих характеристик матеріалу, одержимо:

$$t_* \approx 7,5 \cdot 10^5 \int_{0,75}^1 F_1^{-2m}(\varepsilon) [1 - F_1^2(\varepsilon)] d\varepsilon - 0,37 \cdot 10^{-8} \times \\ \times \int_{0,75}^1 F_1^{-2m}(\varepsilon) \cdot [4 \cdot 10^6 F_1^4(\varepsilon) - 1,47 \cdot 10^3] d\varepsilon. \quad (20)$$

Отримані за формулою (20) числові результати порівняємо з експериментальними [6] (рис. 3).

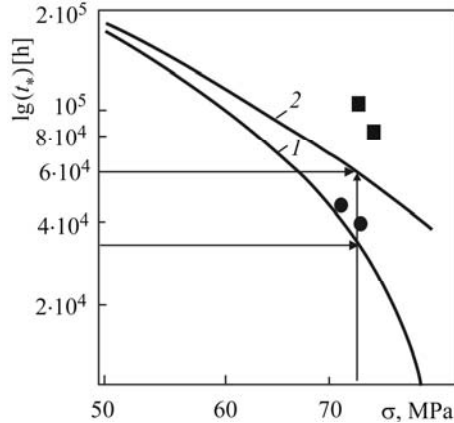


Рис. 3. Порівняльна залишкова довговічність t_* паропроводу зі сталі 12Х1МФ після його експлуатації в стаціонарному (крива 2) і маневреному (крива 1) режимах; експеримент [6]:
● – маневрений; ■ – стаціонарний режими.

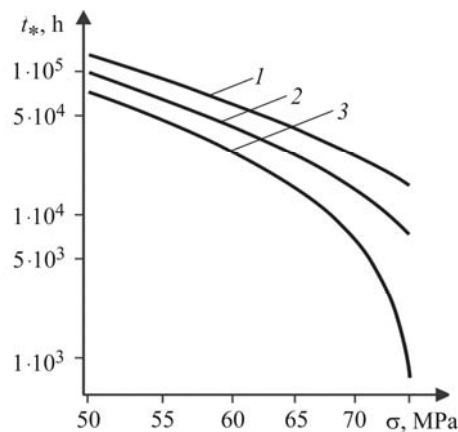
Fig. 3. Comparison of 12X1MΦ steel steam pipeline residual life, t_* , after its operation in the stationary (curves 2) and manoeuvring regimes (curves 1); experiment [6]:
● – manoeuvring, ■ – stationary regimes.

Таке зіставлення підтверджує коректність співвідношення (20), а отже, і запропонованої тут розрахункової моделі (16), (17) для визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості за довготривалих статично-розривних навантажень (маневреного режиму експлуатації). Слід зауважити, що розрахунок дає дещо занижені результати про довговічність, оскільки тут враховують тріщину.

За допомогою співвідношення (20) спрогнозовано (рис. 4), що найнебезпечніша ситуація (найменша залишкова довговічність) виникне, коли розривів статичного навантаження буде більше в третій частині періоду експлуатації.

Рис. 4. Залежність залишкової довговічності паропроводу від порядку розривів статичного навантаження: 1 – у першій частині періоду експлуатації; 2 – у другій; 3 – у третій.

Fig. 4. Dependence of the steam pipeline residual life on the order of static loading breaks: 1 – the first part of exploitation period; 2 – the second; 3 – the third.



ВИСНОВКИ

За енергетичним підходом побудовано математичну модель для визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій за високотемпературної повзучості і довготривалих статично-розривних навантажень (маневрений режим експлуатації). За моделлю розраховано залишковий ресурс труби паропроводу в реальних умовах навантаження. Показано, що неврахування у розрахунках циклів навантажень-розвантажень може призвести до непередбаченого руйнування.

РЕЗЮМЕ. Построена расчетная модель для исследования роста трещины высокотемпературной ползучести при длительных статически-разрывных нагрузках. Определена остаточная долговечность трубы паропровода при маневренном режиме эксплуатации. Установлено, что неучет разрывного характера таких нагрузок может обусловить к непредвиденное разрушение элементов конструкций.

SUMMARY. The calculation model for research of the creep crack growth under long-term static loading has been build. The residual life of the steam pipeline pipe under the manoeuvre regime exploitation is determined. It is found that ignoring the nature of breaking long-term static loads can lead to the unpredicted fracture of structure elements.

1. Лепин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
2. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
3. Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Визначення залишкового ресурсу труби з поверхневою тріщиною при довготривалому тиску і високій температурі // *Машинознавство*. – 2005. – № 4. – С. 3–6.
4. Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Механіка руйнування металічних пластин за високотемпературної повзучості // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – № 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. – № 2. – P. 210–219.)
5. Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах // *Доп. НАН України*. – 2006. – № 5. – С. 47–52.
6. Хромченко Ф. А. Ресурс сварних соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
7. Андрейків О. Є., Лесів Р. М., Долінська І. Я. Залежність періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини від періоду циклу навантаження // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – № 4. – С. 31–38. (Andreikiv O. E., Lesiv R. M., and Dolins'ka I. Ya. Dependence of the period of subcritical growth of a creep fatigue crack on the duration of loading cycles // *Materials Science*. – 2009. – № 4. – P. 494–503.)
8. Кудрявцев Л. Д. Курс математического анализа. – М.: Высш. шк., 1981. – 627 с.

Одержано 06.06.2011