УДК 539.4:536.543

Сас Н.Б., канд. фіз.-мат. наук (sasnataliya@mail.ru) ©
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького

ВПЛИВ РОЗМІРІВ ПОЧАТКОВИХ ТРІЩИН НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ТРУБЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДОВГОТРИВАЛОГО ТИСКУ І ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

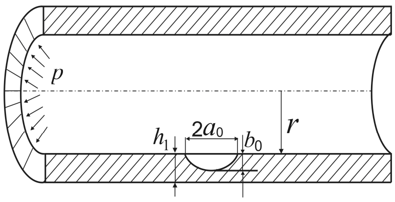
Запропонована математична модель для визначення періоду докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості в металічних елементах конструкції. Зроблена постановка задачі про визначення залишкової довговічності труби з поверхневою тріщиною при дії довготривалого тиску, високої температури і запропонований метод її розв'язку.

Ключові слова: *залишковий ресурс, довговічність, період докритичного росту, високотемпературна повзучість.*

Вступ. Відомо [1, 2], що в більшості випадків матеріали елементів конструкцій мають дефекти типу тріщин і піддані дії довготривалого статичного навантаження і високій температурі. Це може викликати передчасне руйнування, елемента конструкції. Для того, щоб передбачити і відвернути таке руйнування необхідно створити відповідну теорію для розрахунків елементів конструкцій при згаданому виді навантаження. В даній роботі зроблена спроба створити таку теорію, зокрема, розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в металічних матеріалах на основі фізичних законів. Ця модель застосована до визначення залишкового ресурсу трубчастого елемента конструкції з поверхневою тріщиною при дії довготривалого статичного навантаження і високої температури.

Постановка задачі і її розрахункова модель. Ставиться задача про визначення залишкового ресурсу труби внутрішнього радіуса r товщини h, яка піддана дії внутрішнього довготривалого статичного тиску p і високій температурі. Вважається, що на внутрішній стінці труби вздовж твірної труби розміщена поверхнева півеліптична тріщина з півосями a_0 і b_0 з площею величини S_0 (Рис. 1). Задача полягає у визначенні часу $t = t^*$, коли площа тріщини S в результаті високотемпературної повзучості підросте до критичного розміру $S = S_*$, тобто $b(t_*) = h$, і труба розгерметизується.

Для розв'язання такої задачі побудуємо математичну модель для опису кінетики поширення тріщини високотемпературної повзучості в металічних тілах і визначення періоду її докритичного росту $t = t_*$. Суть цієї розрахункової моделі полягає в наступному. Розглянемо металеве тіло з плоскою тріщиною початкової площі S_0, яке піддане дії високої температури і довготривалого статичного



Мал. 1 Схема навантаження труби з півеліптичною тріщиною.

навантаження. При цьому вважається, що тріщина макроскопічна, а зовнішні розтягуючі навантаження прикладені таким чином, що відносно площі розміщення тріщини напружено-деформований стан симетричний, тобто описується в околі її вершини тільки коефіцієнтом інтенсивності напружень K_1.

Для розв'язку такої задачі побудуємо математичну модель, тобто математичні рівняння, які описують даний процес. При цьому будемо вважати, що тріщина рухається неперервно від початкового розміру $S = S_0$ до кінцевого $S = S_*$.

Вважаючи процес росту тріщини неперервний, аналогічно [4], запишемо енергетичний баланс тіла для кожного моменту часу *t* в такому вигляді

$$A = W + \Gamma \qquad (1)$$

Тут A – робота зовнішніх сил, яка в даному випадку є постійною; W – енергія деформування тіла, яку представимо в такому вигляді

$$W = W_{\text{пр}} + W_{\text{пл}}^{(1)}(S) - W_{\text{пл}}^{(2)}(t), \qquad (2)$$

$W_{пр.}$ – пружна складова *W*; $W_{\text{пл}}^{(1)}(S)$ – частина енергії пластичних деформацій, що залежить тільки від площі тріщини S; $W_{\text{пл}}^{(2)}(t)$ – частина енергії пластичних деформацій, яка виділяється при постійній площі тріщини під час інкубаційного періоду підготовки її скачка, залежить тільки від часу t і генерується самим тілом; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить тільки від площі тріщини. Так як виконується умова балансу енергій, то і буде виконуватися умова балансу швидкостей зміни енергій, тобто

$$\frac{\partial}{\partial S}\left[\Gamma - \left(A - W_{\text{пр}} - W_{\text{пл}}^{(1)}\right)\right]\frac{dS}{dt} - \frac{\partial W_{\text{пл}}^{(2)}}{\partial t} = 0. \qquad (3)$$

Із рівняння (3) знайдемо величину швидкості поширення тріщини $V = dS/dt$

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial W_{\text{пл}}^{(2)}}{\partial t} \Bigg/ \frac{\partial}{\partial S}\left[\Gamma - \left(A - W_{\text{пр}} - W_{\text{пл}}^{(1)}\right)\right]. \qquad (4)$$

Використовуючи результати роботи [4], похідну від виразу в квадратних дужках в правій частині рівняння (4) знайдемо в такому вигляді

$$\frac{\partial}{\partial S}\left[\Gamma - \left(A - W_{\text{пр}} - W_{\text{пл}}^{(1)}\right)\right] = \gamma_{\text{п}} - L^{-1}\int_L \sigma_t(\xi)\delta_t(0,\xi)d\xi. \qquad (5)$$

Тут $\gamma_{\text{п}}$ – питома енергія руйнування при поширенні тріщини повзучості; ξ – координата вздовж контуру тріщини L; $\delta_t(0,\xi)$ – біжуче розкриття тріщини в її вершині при усередненому напруженні σ_t в зоні передруйнування.

Будемо вважати, що на протязі усього інкубаційного періоду (часу підготовки скачка тріщини) повзучість буде усталена (швидкість зміни деформації ε_t постійна). При такій же умові знайдемо величину $W_{\text{пл}}^{(2)}(t)$, яка на основі результатів роботи [1,3] може бути записана в такому вигляді

$$W_{\text{пл}}^{(2)}(t) = \int_L \left\{ \int_0^{l_{pt}} \sigma_t \left[\delta_t(x,\xi) + \dot{\delta}_t(x,\xi)\cdot t\right] dx - \int_0^{l_p} \sigma_t \delta_t(x,\xi) dx \right\} d\xi, \qquad (6)$$

де $\dot{\delta}_t(x,\xi)$ – швидкість розкриття зони передруйнування; l_p – ширина вихідної пластичної зони по нормалі до контуру тріщини L при розкритті у її вершині $\delta_t(0,\xi)$; $l_{pt} = l_{pt}(\xi)$ – ширина пластичної зони по нормалі до контуру тріщини за час t інкубаційного періоду перед скачком тріщини.

Визначаючи, як і в роботі [4], величину $\delta_t(x,\xi)$ в зоні передруйнування, співвідношення (10) запишемо так

$$W_{\text{пл}}^{(2)}(t) = E/3 \int_L \left\langle \left[\delta_t(0,\xi) + \dot{\delta}_t(0,\xi)\cdot t\right]^2 - \delta_t^2(0,\xi) \right\rangle d\xi \cdot \qquad (7)$$

Тоді формула (4) для визначення величини швидкості V поширення тріщини повзучості набуде на основі співвідношень (5)-(7) такого вигляду

$$V = 0.6666E \int_L \dot{\delta}_t(0,\xi) d\xi \cdot \left[\sigma_c - \delta_c^{-1} L^{-1} \int_L \sigma_t(\xi) \delta_t(0,\xi) d\xi\right]^{-1}. \qquad (8)$$

У формулі (8) E - модуль Юнга; δ_c, σ_c – критичні значення, відповідно, $\delta_t(0,\xi)$ і $\sigma_t(\xi)$; $\dot{\delta}_t(0,\xi)$ – швидкість розкриття тріщини усталеної повзучості, яку визначаємо так $\dot{\delta}_t(0,\xi) = A_1\left[\delta_t(0,\xi)\delta_c^{-1}\right]^m$; A, m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу. На основі цього рівняння (8) запишемо так

$$V = 0.6666EA_1 \int_L \left[\delta_t(0,\xi)\delta_c^{-1}\right]^m d\xi \cdot \left[\sigma_c - \delta_c^{-1} L^{-1} \int_L \sigma_t(\xi) \delta_t(0,\xi) d\xi\right]^{-1}. \qquad (9)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (9) додамо наступні початкову і кінцеві умови

$$t = 0,\ S(0) = S_0;\ t = t_*,\ \ S(t_*) = S_*;\ \delta_t(S_*) = \delta_c. \qquad (10)$$

Таким чином, при відомих характеристиках матеріалу E, δ_c, A_1, m, ε_c період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості визначається на основі співвідношень (9), (10).

Щоб знайти 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 рівної площі. Це значно спрощує розрахунки, але як показано в роботі [5], забезпечить для розрахунків достатню точність. Так як товщина стінки труби h на багато менша від її внутрішнього радіуса r $(r >> h)$, то таку трубу з тріщиною під внутрішнім тиском p будемо моделювати пластиною товщини h з поверхневою тріщиною, яка розтягується рівно розподіленими напруженнями $\sigma = rh^{-1}p$.

Тоді $\delta_t(0,\xi)$ для даного випадку буде визначатися за формулою [5]

$$\delta_t(0,\xi) = 4\pi^{-1}r^2h^{-2}p^2a\sigma_t^{-1}E^{-1}. \qquad (11)$$

Підставляючи (11) в (9), (10), для визначення залишкового ресурсу труби отримаємо наступне диференціальне рівняння

$$da/da = A_2\left(4\pi^{-1}r^2h^{-2}ap^2K_{1c}^{-2}\right)^m \cdot \left[1 - 4\pi^{-1}r^2h^{-2}ap^2K_{1c}^{-2}\right]^{-1}, \quad A_2 = 0{,}6666A_1E\sigma_c^{-1} \qquad (12)$$

при початкових і кінцевих відповідно умовах

$$t = 0,\ a(0) = \sqrt{2\pi^{-1}S_0} = \sqrt{a_0b_0}; \qquad t = t_*,\ a(t_*) = h. \qquad (13)$$

Інтегруючи рівняння (12) при умовах (13), і враховуючи що труба виготовлена із сплаву IN-100 [2] ($A_1 = 3{,}22\cdot 10^{-4}$, $m = 7{,}53$. $E = 1{,}9\cdot 10^5 MPa$, $\sigma_c = 730MPa$), а силові і геометричні параметри труби задані так $h = 10мм$, $r^2h^{-2} = 100$, $p = 0{,}026K_{1c}$, знайдемо залишковий ресурс труби з такої формули

$$t_* = 1{,}3\cdot 10^{10}S^{-3} \qquad (14)$$

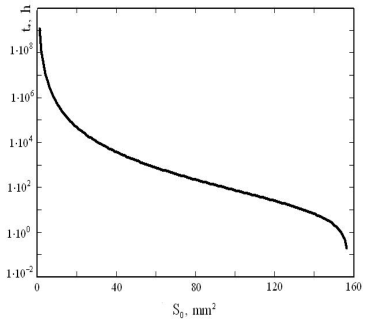


Рис. 2. Графічна залежність залишкового ресурсу труби t_* від початкової площі тріщини S_0.

На рис. 2 графічно відтворена залежність (14) залишкового ресурсу труби t_* від початкової величини S_0 площі тріщини.

Висновок. Побудована розрахункова модель для визначення залишкової довговічності трубчастого елемента з поверхневою півеліптичною тріщиною, яка піддана дії довготривалого тиску і високій температурі. Чисельно і графічно показано, що залишкова довговічність такого елемента суттєво залежить від вихідного значення площі дефекту. Запропонована модель може бути використана при визначенні залишкового ресурсу елементів обладнання в харчовій промисловості, які працюють в умовах дії високої температури та внутрішнього тиску.

Література

1.Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов.– М.: Металлургия, 1986.– 280 с.

2.Fuji A. and Kitagawa M. A Comparison of Creep Crack Growth Behaviour in Nickel Based Super Alloy with Low Alloy Steel.– Там же.– pp. 487-495.

3.Шата М., Терлецька З.О. Енергетичний підхід у механіці втомного поширення макротріщини // Механіка руйнування і міцність конструкцій (під редак. В.В. Панасюка). – Львів: Каменяр. – 1999 – В.2. – С. 141-148.

4.Андрейків О.Є., Ліщинська М.В. Рівняння росту втомних тріщин в неоднорідних пластинах // Фіз..-хім. Механіка матеріалів. – 1999.– № 3.– С. 53-58.

5. Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – Киев: Наукова думка, 1992.– 184с.

Summary

The calculation model for evaluation of sub critical high-temperature creep crack growth in metallic element of construction is proposed. The problem on evaluation of the residual life time of the pipe with a surface crack under long-term pressure and high temperature has been formulated and the method of its solution has been proposed.

Рецензент – д.т.н., професор Білонога Ю.Л.