

УДК 539.4:536.543

О. Андрейків<sup>1</sup>, докт. техн. наук; Н. Сас<sup>2</sup>, канд. фіз.-мат. наук

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка

<sup>2</sup>Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

## ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОПРОВОДІВ З ТРІЩИНАМИ

**Резюме.** Задача про визначення залишкового ресурсу зварних з'єднань труб паропроводів з тріщинами розв'язана з допомогою сформульованого раніше авторами енергетичного підходу. При цьому для спрощення розв'язку такої складної просторової задачі застосований метод еквівалентних площ.

**Ключові слова:** паропровід, зварне з'єднання, залишковий ресурс елементів конструкцій, високотемпературна повзучість, коефіцієнт інтенсивності напружень, тріщина повзучості, період докритичного росту тріщини.

O. Andreykiv, N. Sas

## ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF STEAM PIPELINE WELDED JOINTS WITH CRACKS

**Summary.** The method for determination of residual resource of steam pipeline pipes the welded connections with cracks is proposed. The method is based on the first law of thermodynamic on energy balance and the balance of energy change rate in a metallic body, containing a macro crack and subjected to long-term loading tension under high-temperature field. It is assumed, that the period of well-established creep dominates here. In this case the main mechanism of fracture is high temperature creep fracture. We assume that crack propagation occurs by jumps during incubation periods of high temperature creep in the prefracture zone near the crack tip. Then the crack growth rate can be represented as the average ratio of the length of its jump to the time of incubation period. Basing on it and some ideas of fracture mechanics available in literature the equation has been obtained for description of high temperature creep cracks growth kinetics. This equation together with initial and final conditions form a mathematical model for determination of the period of high temperature creep crack subcritical growth in the metallic materials. This equation depends on the stress intensity factors, which for welded joints with cracks are defined as follows. Stress intensity factors for weld crack pipe represent the approximate as stress intensity factor for plates with semielliptical surface crack on the surface of which is applied the amount of residual stress of welded joints and stress in the wall of the pipe. This stress intensity factor is found on the basis of published data. Substituting this value of this stress intensity factor in the above-mentioned equation we obtain a mathematical problem to determine the residual life of the pipe, in the weld joint which is semielliptical surface crack. Solution of this problem is associated with considerable mathematical difficulties. Thus for simplification of decision of such intricate spatial problem the method of equivalent areas is applied. Numerically and graphically it was shown that the residual life of welded connections of steam crack strongly depends on the initial value of the size of the defect

**Key words:** steam pipeline, welded connection, residual resource of construction elements, high temperature creep, stress intensity factor, crack of creep, period of subcritical growth of crack.

**Вступ.** Зварні конструкції широко використовуються в багатьох інженерних спорудах – бойлерах, трубопроводах, кораблях та ін. За статистикою [1] приблизно 80% пошкоджень зварних конструкцій пов'язані з руйнуванням зварних з'єднань. Тому вдосконалення методів розрахунку зварних з'єднань на міцність та довговічність є ключовим моментом у підвищенні якості зварних конструкцій. Тут слід відзначити, що зварні з'єднання є складним об'єктом для розрахунків. Вони часто містять металургійні або геометричні дефекти, що виникли в процесі зварювання. Окрім того, істотна

механічна неоднорідність матеріалу поєднується тут із високими залишковими напруженнями.

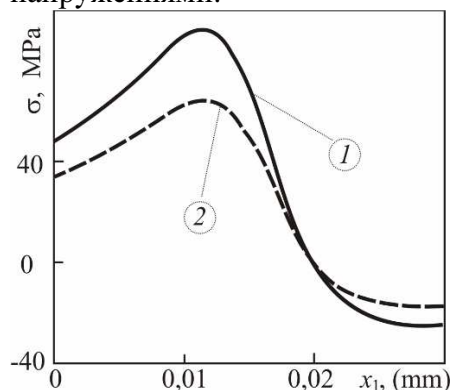
Вивченню проблем руйнування зварних з'єднань присвячено багато робіт вчених [2–8]. Але в аналітичних дослідженнях питанням впливу неоднорідності матеріалу зварного з'єднання на кінетику росту тріщин високотемпературної повзучості та врахування цього феномену при розрахунках зварних конструкцій на довговічність приділено недостатньо уваги. В даній роботі розроблено методику для визначення залишкового ресурсу труби паропроводу і зварного з'єднання, а також побудовано залежність його від початкового розміру дефекту в стінці труби.

Особливості розрахунку залишкового ресурсу зварних з'єднань. Аналіз випадків руйнування зварних конструкцій [5], що працюють у різноманітних умовах, свідчить, що найчастіше їх руйнування починається від дефектів, які утворюються в зварному з'єднанні у процесі зварювання. Ці дефекти різною мірою впливають на працездатність зварних конструкцій, особливо під дією змінного навантаження. Враховуючи це, розрахунок довговічності зварних елементів конструкцій у рамках механіки руйнування необхідно проводити в такій послідовності [11]:

- 1) визначення форми, розміру і місця знаходження найнебезпечнішого тріщиноподібного дефекту;
- 2) визначення напружено-деформованого стану елемента конструкції, послабленого дефектом заданої конфігурації з урахуванням залишкових напружень від зварки;
- 3) встановлення закономірностей докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості в заданому матеріалі;
- 4) експериментальне встановлення характеристик тріщиностійкості різних зон зварного з'єднання при поширенні в них тріщини високотемпературної повзучості;
- 5) визначення періоду докритичного росту тріщини (залишкового ресурсу) в зварному з'єднанні при заданому навантаженні.

В питаннях, пов'язаних із визначенням розмірів і місця знаходження дефекту застосовують різні методи неруйнівного контролю з максимальною роздільною здатністю [12].

Що стосується напруженого стану біля зварних швів у трубах, то будемо поступати наступним чином. У праці [13] розроблено ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів у трубопроводах. Запропонований спосіб ґрунтується на експериментальній інформації, отриманій неруйнівними методами, і розв'язанні обернених задач теорії оболонок із власними напруженнями.



**Рисунок 1.** Залежність залишкових напружень від відстані  $x_1$  до осі зварного шва: 1 – на зовнішній поверхні труби; 2 – на внутрішній поверхні

**Figure 1.** Dependence of residual stress on distance  $x_1$  to the of the axis welded guy-sutures: 1 – to the external surface of pipe; 2 – to the internal surface

зовнішній поверхні стінки труби, а крива 2 – внутрішній. Ці графічні залежності можна описати такими рівняннями:

$$\sigma_s^{(1)}(x_1) = \frac{48,13 - 2408,68 x_1}{1 - 109,53 x_1 + 3639 x_1^2};$$

$$\sigma_s^{(2)}(x_1) = \frac{34,01 - 1691 x_1}{1 - 108,02 x_1 + 3541 x_1^2}. \quad (1)$$

Середні значення залишкових напружень  $\sigma_s(x_1)$  у стінці труби визначимо за формулою

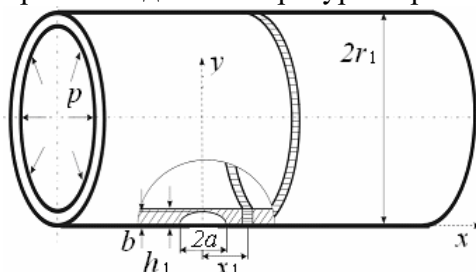
$$\sigma_s(x_1) = 0,5(\sigma_s^{(1)}(x_1) + \sigma_s^{(2)}(x_1)). \quad (2)$$

Тоді сумарні напруження в стінці труби  $\sigma(x_1)$  будуть дорівнювати сумі напружень  $\sigma_s(x_1)$  і напружень від внутрішнього тиску  $p$ , тобто

$$\sigma(x_1) = \sigma_s(x_1) + pr_1 h_1^{-1}, \quad (3)$$

де  $r_1$  – радіус труби;  $h_1$  – товщина стінки труби (рис.2).

**Постановка задачі.** Проектний ресурс (термін служби) паропроводів і їх зварних з'єднань складає в основному 100 тис. годин (окремі паропроводи спроектовані на термін 200 тис. г.) і визначається розрахунковим шляхом із урахуванням призначених типорозмірів трубних елементів (прямі труби, згини, поковки, литі елементи; їх номінальні зовнішні діаметри і товщина стінок), марок сталей і робочих параметрів пари (тиск і температура). При цьому потрібно мати на увазі, що енергоустановки потужністю 300 МВт і менше при тиску свіжої пари 13 і 24 МПа проектувалися для вітчизняних електростанцій на термін експлуатації 100 тис. г. переважно для температури пари 565°C.



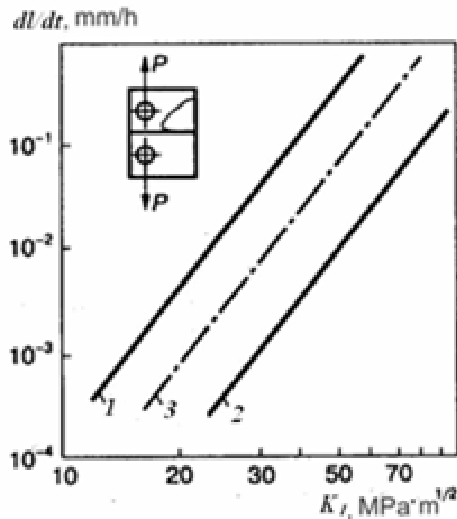
**Рисунок 2.** Схема навантаження зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною

**Figure 2.** Scheme of the pipeline welded connection loading with crack

Щоб знайти залишковий ресурс паропроводу (час до розгерметизації), побудуємо розрахункову модель розвитку поверхневої півеліптичної тріщини з півосями  $a, b$  і визначимо час  $t = t_*$  до її поширення наскрізь стінки труби (рис.2). Застосуємо для цього випадку загальний енергетичний підхід, який сформульований у роботах авторів [9, 10, 14]. При цьому співвідношення для опису докритичного росту тріщини високо-температурної повзучості в даному випадку набуде вигляду

$$V = 2\alpha_0 A_1 \int_L [K_I^2 K_{IC}^{-2}]^m d\xi \cdot \left[ 1 - K_{IC}^{-2} L^{-1} \int_L K_I^2(0, \xi) d\xi \right]^{-1} \quad (4)$$

Тут  $A_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $m$  – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначаються з експерименту;  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень;  $K_{IC}$  – характеристика тріщиностійкості матеріалу;  $\xi$  – біжуча координата вздовж контуру тріщини  $L$ .



**Рисунок 3.** Кінетична діаграма зміни швидкості росту тріщин високотемпературної повзучості у зварному з’єднанні із сталі 15X1M1Φ (1 – для зони термічного впливу; 2 – для основного матеріалу; 3 – матеріал шва)

**Figure 3.** Kinetic diagram of the rate change of high temperature cracks growth in the welded connection of steel 15X1M1Φ (1 – for the thermal affected zone; 2 – for material of guy-sutures; 3 – for basic material)

впливу (крива 3С). Це означає, що тут найменший опір поширенню таких тріщин і руйнування зварного з’єднання труби паропроводу буде проходити якраз у цій зоні. Тому для оцінювання залишкового ресурсу зварного з’єднання паропроводу характеристики матеріалу  $K_{IC}$ ,  $\alpha_0$ ,  $A_1$ ,  $m$  необхідно брати для цієї зони. У зв’язку з цим порівнюємо аналітичну залежність

$$V = \alpha_0 A_1 (K_I K_{IC}^{-1})^{2m} / (1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}) \quad (7)$$

швидкості поширення тріщини високотемпературної повзучості (отримана в [9,10]) із відповідною графічною залежністю (крива 1 на рис.3), що отримана експериментальним шляхом і наведена в роботі [15]. В результаті цього порівняння й використання методу найменших квадратів, отримаємо

$$K_{IC} = 210 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}, \quad \alpha_0 A_1 = 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ м/год}, \quad m = 2,13 \quad (8)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (4) додамо наступні початкову і кінцеві умови

$$t = 0, S(0) = S_0; \quad t = t_*, S(t_*) = S_* \quad (5)$$

де критична площа  $S = S_*$  визначається із критерію Ірвіна [11]

$$K_I(S_*) = K_{IC}$$

Таким чином, при відомих характеристиках матеріалу  $A_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $m$  період докритичного росту основи тріщин високотемпературної повзучості визначається на співвідношень (4) – (6). Величини  $A_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $m$  для матеріалу зварного з’єднання труби паропроводу визначаємо наступним чином.

У роботі [15] наведено результати експериментальних досліджень і побудовано кінетичні діаграми зміни швидкості росту тріщин високотемпературної повзучості на різних ділянках зварного з’єднання паропроводу зі сталі 15X1M1Φ, зокрема для зон зварного шва, термічного впливу і основного матеріалу (див. рис.3). Як бачимо з рис.3, найбільша швидкість поширення тріщини високотемпературної повзучості є в зоні термічного

Разом з тим, розрахунок будемо проводити для конкретного паропроводу з параметрами [15] для сталі 15X1M1Φ  $T = 450^{\circ}C$

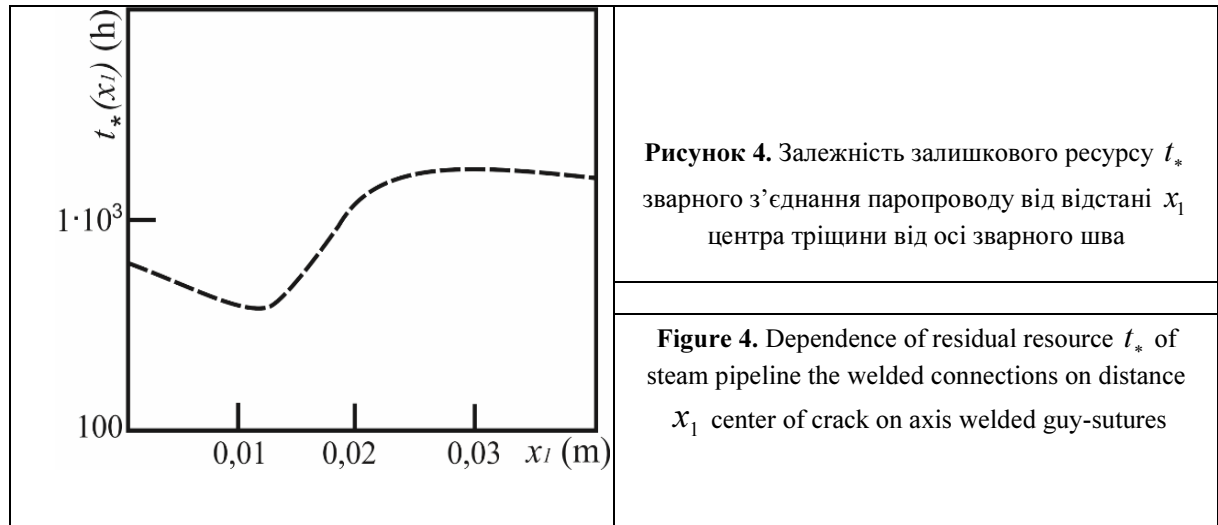
$$p = 100 \text{ МПа}, r_1 = 162 \text{ mm}, h_1 = 60 \text{ mm}, a_0 = 16 \text{ mm}, b_0 = 9 \text{ mm}, \quad (9)$$

де  $a_0, b_0$  – початкові значення відповідно  $a, b$ .

**Визначення періоду докритичного росту тріщини в трубі біля кільцевого зварного шва методом еквівалентних площ.** Розв’язок математичної задачі (4)–(7) пов’язаний зі значними математичними труднощами. Тому для спрощення розв’язку цієї задачі, не втрачаючи при цьому потрібної для інженерних цілей точності, застосуємо метод еквівалентних площ [14], згідно з яким зміна площі втомної тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для півкругової тріщини радіуса  $\rho$  рівної площі. В даному випадку на основі результатів [16] коефіцієнт інтенсивності напружень для даного випадку запишемо так:

$$K_1 = 0,7\sqrt{\pi h_1 \varepsilon} \sigma(x_1) (1 + 0,32\varepsilon^2) (1,04 + 0,23\varepsilon^2 - 0,11\varepsilon^4), \quad (10)$$

де  $x_1$  – відстань центра тріщини від осі зварного шва (див. рис.2),  $\varepsilon = \rho/h_1$ , а функція  $\sigma(x_1)$  визначається за формулою (3). Тоді математичну задачу (4)–(6) для даного випадку запишемо так:



$$d\rho / dt = 2\alpha_0 A_1 F_3^{2m}(x_1, \varepsilon) [1 - F_3^2(x_1, \varepsilon)]^{-1}, \quad (11)$$

$$t = 0, \rho(0) = \rho_0 \quad (12)$$

$$t = t_*, \rho(t_*) = h_1. \quad (13)$$

Тут

$$\rho_0 = \sqrt{a_0 b_0}$$

$$F_3(x_1, \varepsilon) = 0,7 K_{Ic}^{-1} \sqrt{\pi h_1 \varepsilon} \sigma(x_1) (1 + 0,32\varepsilon^2) (1,04 + 0,23\varepsilon^2 - 0,11\varepsilon^4)$$

Співвідношення (11)–(13) можемо записати у безрозмірному вигляді так:

$$d\varepsilon / dt = 2\alpha_0 A_1 h_1^{-1} F_3^{2m}(x_1, \varepsilon) [1 - F_3^2(x_1, \varepsilon)]^{-1} \quad (14)$$

$$t = 0, \quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 = 0,2; \quad (15)$$

$$t = t_*, \quad \varepsilon(t_*) = 1. \quad (16)$$

Інтегруючи (14) при (9), (15), (16), отримаємо

$$t_* = \frac{h}{2\alpha_0 A_1} \cdot \int_{0,2}^1 F_3^{-2m}(x_1, \varepsilon) [1 - F_3^2(x_1, \varepsilon)] d\varepsilon \quad (17)$$

На рис.4 побудована графічна залежність залишкового ресурсу  $t_*$  від відстані  $x_1$  центра тріщини до осі зварного шва. Як бачимо з цього рисунка, залишкові напруження  $\sigma_3(x_1)$  від зварного шва суттєво впливають на залишковий ресурс зварного з'єднання, а залишковий ресурс для ділянки труби паропроводу без зварного шва повністю відповідає вище зазначеному проектному ресурсу (103 годин).

**Висновки.** Побудовано розрахункову модель для визначення залишкової довговічності зварного з'єднання трубчастого елемента з поверхневою півеліптичною тріщиною, який підданий дії довготривалого тиску і високій температурі. Чисельно і графічно показано, що залишкова довговічність зварного з'єднання паропроводу з тріщиною суттєво залежить від вихідного значення розмірів дефекту.

**Conclusions.** The calculation model for determination of residual resource of the pipe welded connection with the surface semi-elliptic crack subject to long duration pressure and high temperature is built. It is numerically and graphically shown that the residual life of welded connections of steam crack strongly depends on the initial value of the size of the defect.

#### Список використаної літератури

1. Лобанов, Л.М. Развитие расчетных и технологических методов повышения прочности, долговечности и точности изготовления сварных конструкций [Текст] / Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков // "Сварка и родственные технологии – в XXI век": труды междунар. конф. (ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, Украина). 1998. – С.137–157.
2. Походня, И.К. Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей. В кн.: Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя [Текст] / И.К. Походня. – Киев: Наук. думка, 1998. – С.31–69.
3. Карзов, Г.П. Сварные сосуды высокого давления: прочность и долговечность [Текст] / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, Б.Т. Тимофеев – Л.: Машиностроение, 1982. – 287 с.
4. Осадчук, В.А. Розподіл залишкових зварювальних напружень у товстих плитах з круговими швами [Текст] / В.А. Осадчук, М.Я. Шелестовська // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1998. – №3. – С.31–35.
5. Деев, Г.Ф. Дефекты сварных швов [Текст] / Г.Ф. Деев, И.Р. Пацкевич. – Киев: Наукова думка, 1984. – 208 с.
6. Патон, Е.О. Избранные труды [Текст] / Е.О. Патон. – В 3-х т. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 420с.
7. Махненко, В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [Текст] / В.И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 320 с.
8. Сварка в машиностроении: Справочник в 4 томах. – Т.3. – М: Машиностроение, 1979. – 567 с.
9. Андрейків, О.Є. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах [Текст] / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас //Доповіді НАН України – 2006. – №5. – С.47–52.
10. Андрейків, О.Є. Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості [Текст] / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №2. – С.62–68.
11. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов [Текст] / В.В. Панасюк, О.Е. Андрейкив, В.З. Партон: Справ. пособие в 4 томах. – Киев: Наук. думка, 1988. – Т.1: Основы механики разрушения. – 488 с.

12. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідниковий посібник [Текст] / З.Т. Назарчук, В.В. Кошовий, В.Р. Скальський та ін.; за заг. ред. В.В.Панасюка. – Т.5.– Неруйнівний контроль і технічна діагностика; за ред. З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1134 с.

13. Осадчук, В.А. Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі кільцевих зварних швів розрахунково-експериментальним методом [Текст] / В.А. Осадчук, А.В. Драгілев, Ю.В. Банахевич // Машинознавство. – 2003. – №11.– С.23–27.

14. Андрейків, О.Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості [Текст] / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – №2. – С.19–26.

15. Хромченко, Ф.А. Ресурс сварних соединений паропроводов [Текст] / Ф.А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.

16. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений [Текст]; под. ред. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т.1,2. – 1016 с.

*Отримано 15.08.2014*