

УДК 539.375

ВПЛИВ ЗВАРНИХ ШВІВ НА ЗАЛИШКОВУ ДОВГОВІЧНІСТЬ НАФТОПРОВОДУ

Мар'яна КІТ

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1 79000 Львів, Україна*

Запропоновано ефективний підхід для визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання магістрального трубопроводу з внутрішньою поверхневою тріщиною. В основу підходу покладено раніше розроблені автором математична модель для визначення періоду докритичного росту втомних тріщин і метод еквівалентних площ для наближеної реалізації цієї моделі. На підставі цього побудовано залежність залишкового ресурсу нафтопроводу від відстані тріщини до осі зварного шва.

Ключові слова: залишкова довговічність, трубопровід, тріщина, втома, зварний шов.

Вступ. Багато авторів проводили дослідження [1-6] залишкової довговічності магістральних нафтопроводів і газопроводів з врахуванням умов їхнього навантаження, дії різних фізичних і хімічних чинників, наявності в стінці труби дефектів типу тріщин і т.д. Однак всі ці дослідження проводили для випадку основного матеріалу труб без врахування зварних швів. Як відомо [7, 8], область зварного шва значно послаблює міцність і довговічність труби і неврахування цього може призвести до непередбачуваного руйнування і відповідно до аварійної ситуації. Тому для прогнозування залишкової довговічності труб магістральних трубопровідних систем треба враховувати у розрахунку наявність зварних швів, їхні міцнісні характеристики та геометрію розміщення стосовно них дефектів типу тріщин.

Ми запропонували наближений підхід для визначення залишкової довговічності труби нафтопроводу з тріщиною, що розміщена недалеко від зварного шва. В основу цього підходу покладено раніше запропоновану автором [9, 10] розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту втомних тріщин у рамках енергетичного критерію втомного руйнування і узагальнений тут метод еквівалентних площ.

Енергетичний критерій втомного руйнування. Щоб знайти залишковий ресурс трубопроводу (час до розгерметизації), побудуємо розрахункові моделі розвитку дефектів і визначимо час до їхнього зростання наскрізь стінки (рис.1). Згідно з рис.1 введемо такі позначення: r_1 - радіус труби; h_1 - товщина стінки труби.

Уважаючи ріст тріщини неперервним, аналогічно [10], запишемо енергетичний баланс тіла для кожного моменту часу t у вигляді $A = W + \Gamma$, де A - робота зовнішніх сил;

$W = W_e + W_p^{(1)}(S) + W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t)$ – енергія деформування тіла; W_e – пружна складова W ; $W_p^{(1)}(S)$ – робота пластичних деформацій, що залежить тільки від площі тріщини S ; $W_p^{(2)}(t)$ – робота пластичних деформацій від зовнішніх зусиль за постійної площі тріщини під час інкубаційного періоду підготовки її стрибка, що залежить тільки від часу t ; $W_p^{(3)}$ – робота пластичних деформацій під час стискання зони передруйнування внаслідок потенціальної енергії тіла, яка також виділяється за постійної площі тріщини під час інкубаційного періоду підготовки стрибка тріщини і залежить тільки від t ; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить лише від площі тріщини. Якщо виконується умова балансу енергії, то виконуватиметься умова балансу швидкостей зміни енергії, яку запишемо так:

$$\begin{aligned} \partial[\Gamma - (A - W_e - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} + W_p^{(3)})]/\partial S \cdot dS/dt - \\ - \partial(A - W_e - W_p^{(1)} - W_p^{(2)} + W_p^{(3)})/\partial t = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Будемо вважати, що тиск p в трубі нафтопроводу змінюється циклічно з періодом T ($T = 2\pi\omega^{-1}$; ω – частота циклічного навантаження), а сама труба внаслідок защемлення ґрунтом і температурними змінами зазнає розтягу-стискання напруженнями σ_q , які можуть досягати згідно з даними [1-6] $\sigma_q = 200$ МПа.

Опишемо його такою синусоїдою:

$$p(t) = a_1 + b_1 \sin \omega t. \quad (2)$$

Помноживши рівняння (1) на T і продиференціювавши з урахуванням залежностей функцій від S і t , для визначення швидкості поширення тріщини $V = ds/dt$ отримаємо [6, 9]

$$dS/dN = W_C^{(1)}/(\gamma - \gamma_s). \quad (3)$$

Тут N – кількість циклів навантаження; γ – густина енергії руйнування матеріалу [6, 9]; γ_s – густина потенціальної енергії в зоні передруйнування за максимуму напружень циклу; $W_C^{(1)}$ – циклічна складова дисипації енергії в зоні передруйнування за один цикл навантаження.

Оскільки товщина стінки нафтопроводу h набагато менша від радіуса труби r_1 , то для спрощення вважатимемо, що тріщина розвивається в нескінченній пластині під статичним напруженням σ_{ii} і змінним навантаженням p .

Величини γ , γ_s , і $W_C^{(1)}$ обчислюємо так [6, 9]:

$$\gamma_s = \frac{\varepsilon_{fc}}{\delta_{fc} \Delta S} \int_L \mathbf{d}\mathbf{x} \int_0^{l_c} \sigma_{or} \delta_{\max}(\xi, \mathbf{x}) \mathbf{d}\xi; \quad \gamma = 0,75 \sigma_{or} \varepsilon_{fc}; \quad (4)$$

$$W_C^{(1)} = \frac{\varepsilon_{fc}}{\delta_{fc}} \int_0^{l_c} \int_L \sigma_{or} [\delta_{\max}(\xi, \mathbf{x}, 0) - \delta_{\min}(\xi, \mathbf{x}, 0)] \mathbf{d}\mathbf{x} \mathbf{d}\xi.$$

Тут σ_{or} – усереднене напруження в зоні передруйнування під навантаженнями p ; ΔS – площа зони передруйнування біля контуру тріщини; δ_{\max} , δ_{\min} – максимальне і мінімальне розкриття модельного розрізу вздовж зони передруйнування [6]; δ_{fc} – його критичне значення, за критичного значення деформації ε_{fc} під циклічним навантаженням; $\mathbf{d}\xi$ – зміна довжини дуги вздовж контуру тріщини L ; l_f, l_s – ширина циклічної і статичної зон передруйнування; l_c – критичне значення l_s .

Щоб спростити розв'язання задачі, вважатимемо $\delta_{\max} - \delta_{\min}$ однаковим і під час зростання, і спадання навантаження, що піде в запас довговічності. Тому за результатом праць [6, 9] знайдемо

$$\begin{aligned} \delta_{\max} - \delta_{\min} &= 0,5 \delta_{\max} (1 - R)^2 = 0,5 K_{I\max}^2 E^{-1} \delta_{or}^{-1} (1 - R)^2 \\ l_f - 0,25 l_s (1 - R)^2 &= 0,1 \sigma_{or}^{-2} K_{I\max}^2 (1 - R)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

де $R = p_{\min} p_{\max}^{-1}$ – коефіцієнт асиметрії циклу. На цій підставі, а також результатів [6, 9] співвідношення (4) набуде вигляду

$$\begin{aligned} W_C^{(1)} &= 0,0368 \alpha \beta \varepsilon_{fc} K_{fc}^{-2} \sigma_{or}^{-1} \int_L [K_{I\max}(\xi, 0) - K_{I\min}(\xi, 0)]^4 \mathbf{d}\xi; \\ \gamma_s &= 0,2944 \varepsilon_{fc} K_{fc}^{-2} (\Delta S) \sigma_{or}^{-1} \int_L (K_{I\max}(\xi, 0))^4 \mathbf{d}\xi; \\ \Delta S &= 0,3927 \sigma_{or}^{-2} \int_L (K_{I\max}(\xi, 0))^2 \mathbf{d}\xi \end{aligned} \quad (6)$$

Тут $K_{I\max}(\xi, 0), K_{I\min}(\xi, 0)$ – мінімальне і максимальне значення K_I для циклу.

Застосуємо метод еквівалентних площ [5, 6], згідно з яким зміна площі втомної тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для кругової тріщини радіуса a рівної площі. Звідси запишемо наближені значення $K_{I\max}(\xi, 0), K_{I\min}(\xi, 0)$, як для пластини з поверхневою півкруговою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями $\sigma = r_1 h_1^{-1} p(t)$

$$K_{I\max}(\xi, 0) = 2 r_1 h_1^{-1} \pi^{-1/2} a^{1/2} (a_1 + b_1), \quad K_{I\min}(\xi, 0) = 2 \pi^{-1/2} r_1 h_1^{-1} a^{1/2} (a_1 - b_1). \quad (7)$$

Співвідношення (7) підставляємо в (6), а потім разом з (5) – в (3). У підсумку отримаємо

$$\frac{da}{dN} = \frac{1,3 \alpha \beta a^2 r_1^4 h_1^{-4} b_1^2}{\sigma_{0r}^2 [K_{Ic}^2 - 1,2732a r_1^2 h^{-2} (a_1 + b_1)^2]}. \quad (8)$$

Отже, для визначення докритичного росту тріщини, коли порушиться герметичність труби, отримано диференційне рівняння (8). Воно визначає тільки кінетику росту втомної тріщини, а для завершенної математичної моделі додамо ще початкові і кінцеві умови [5, 6]

$$N = 0, \quad a = \sqrt{\pi^{-1} S_0}; \quad (9)$$

$$N = N_g, \quad a = h_1. \quad (10)$$

Співвідношення (8) – (10) визначають період N_g докритичного росту втомної тріщини тільки від циклічної зміни внутрішнього тиску p .

Для врахування залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ (x_1 – відстань центра тріщини від середини зварного шва (рис. 1)), які діють в околі зварного шва, діємо так.

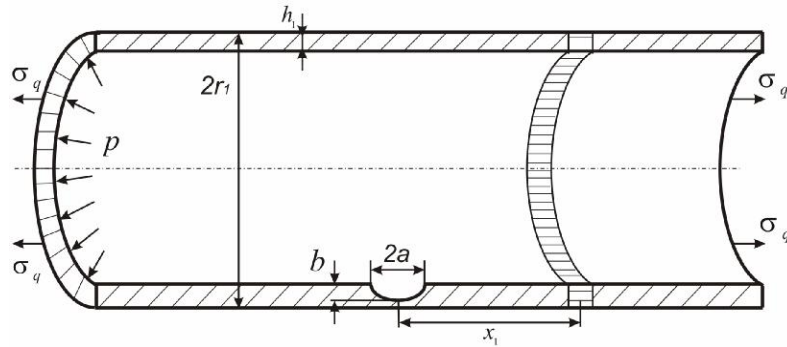


Рис. 1. Схема навантаження зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною

Врахування зварних напружень і визначення залишкового ресурсу. В працях [11, 12] розроблено ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів у трубопроводах. Використовуючи цей підхід, знайдемо [11] розподіл залишкових напружень біля багат шарового зварного шва в трубопроводі $\varnothing 1420 \times 22,5$ мм; матеріал труби – сталь X70. На рис. 2 побудовано для цього випадку графічні залежності колових залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ від відстані x_1 до осі зварного шва. Тут крива–1 відповідає зовнішній поверхні стінки труби, а крива–2 – внутрішній. Ці графічні залежності достатньо добре можна описати такими рівняннями:

$$\sigma_3^{(1)} = \frac{48,13 - 2408,68 x_1}{1 - 109,53 x_1 + 3639 x_1^2},$$

$$\sigma_3^{(2)} = \frac{34,01 - 1691 x_1}{1 - 108,02 x_1 + 3541 x_1^2}. \quad (11)$$

Середні значення залишкових напружень $\sigma_3(\mathbf{x}_1)$ в стінці труби визначатимемо за формулою

$$\sigma_3(\mathbf{x}_1) = 0,5(\sigma_3^{(1)} + \sigma_3^{(2)}). \quad (12)$$

Тоді сумарні напруження в стінці труби $\sigma(\mathbf{x}_1)$ дорівнюватимуть сумі напружень $\sigma_3(\mathbf{x}_1)$ і напружень від внутрішнього тиску p , тобто

$$\sigma(\mathbf{x}_1) = \sigma_3(\mathbf{x}_1) + pr_1 h_1^{-1}. \quad (13)$$

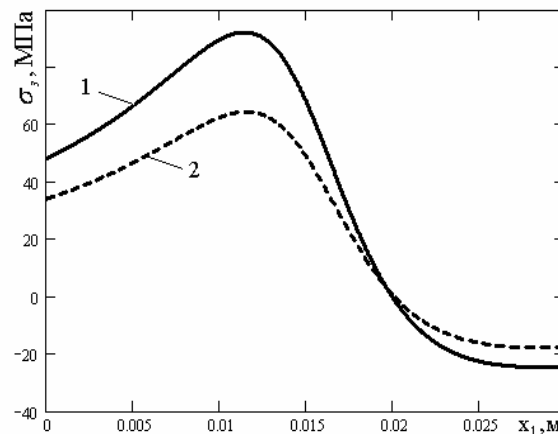


Рис. 2 Залежність залишкових напружень від відстані x_1 до осі зварного шва: 1—на зовнішній поверхні труби; 2—на внутрішній поверхні

Визначення залишкового ресурсу труби з допомогою методу еквівалентних площ. Застосуємо метод еквівалентних площ [5, 6], згідно з яким зміна площі втомної тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для кругової тріщини радіуса a рівної площі. Звідси запишемо наближені значення $K_{I \max}(\xi, 0)$, $K_{I \min}(\xi, 0)$ як для пластини з поверхневою півкруговою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями (13)

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{\text{Imax}}(\xi, 0) &= 2 \left(\frac{\mathbf{a}}{\pi} \right)^{1/2} (\sigma_3(\mathbf{x}_1) + p r_1 h_1^{-1}), \\ \mathbf{K}_{\text{Imin}}(\xi, 0) &= 2 \pi^{-1/2} \sigma_3(\mathbf{x}_1) \mathbf{a}^{1/2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Співвідношення (14) підставляємо в (6), а потім разом з (5) – в (3). У підсумку отримаємо

$$\frac{d\mathbf{a}}{dN} = \frac{0,0675 p^4 r_1^4 h_1^{-4} \mathbf{a}^2 \sigma_0^{-2}}{(K_{IC}^2 - 4 \pi^{-1} \mathbf{a} (\sigma_3(\mathbf{x}_1) + p r_1 h_1^{-1})^2)}. \quad (15)$$

Отже, для визначення докритичного росту тріщини, коли порушиться герметичність труби, отримано диференційне рівняння (15). Воно визначає тільки кінетику росту втомної тріщини, а для завершеної математичної моделі додамо ще початкові та кінцеві умови [5, 6]

$$\mathbf{N} = 0, \quad \mathbf{a} = \sqrt{\pi^{-1} \mathbf{S}_0}; \quad (16)$$

$$\mathbf{N} = N_g, \quad \mathbf{a} = h_1. \quad (17)$$

Співвідношення (15) – (17) визначають період N_g докритичного росту втомної тріщини тільки від циклічної зміни внутрішнього тиску p .

Інтегруючи рівняння (15) за цих умов, отримаємо

$$\begin{aligned} N_g &= \sigma_{0f}^2 A_1 (\mathbf{a}_0^{-1} - h_1^{-1}) - \sigma_{0f}^2 A_2 \ln \frac{h_1}{\mathbf{a}_0}, \\ A_1 &= 14,8131 p^{-4} r_1^{-4} h_1^4 K_{IC}^2, \\ A_2 &= 18,8702 h_1^4 p^{-4} r_1^{-4} (\sigma_3(\mathbf{x}_1) + p r_1 h_1^{-1})^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Позаяк зона передруйнування біля контуру тріщини перебуватиме в умовах двоосового розтягу-стискання, то усереднене значення σ_{0f} напружень в цій зоні знаходимо з допомогою умови пластичності Губера-Мізеса

$$\sigma_{0f} = 0,5 \left[\sigma_q + \sqrt{4\sigma_0^2 - 3\sigma_q^2} \right]. \quad (19)$$

Обчислювати залишковий ресурс N_g будемо за таких параметрів роботи труби нафтопроводу, розмірів вихідної тріщини і констант матеріалу $r_1 = 0,512$ м, $h_1 = 0,012$ м, $p = 4,5$ МПа, $\sigma_{0f} = 420$, $K_{IC} = 86$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, $\mathbf{a}_0 = 0,0014$ м, $\mathbf{a}_1 = h_1 = 2,2$ МПа, $\sigma_0 = 420$ МПа.

Підставляючи в (18) вищезгадані значення відповідних параметрів і проводячи обчислення, на рис. 3 побудовано графічну залежність залишкового ресурсу N_g від відстані тріщини \mathbf{x}_1 від осі зварного шва.

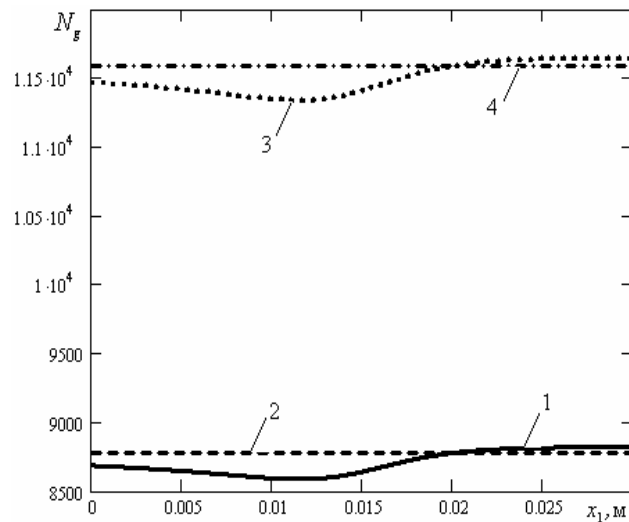


Рис. 3. Графічна залежність залишкового ресурсу N_g зварного з'єднання від відстані x_1 тріщини до осі зварного шва: 1 – з врахуванням всіх параметрів навантаження; 2 – $\sigma_z(x_1) = 0$; 3 – $\sigma_q = 0$; 4 – $\sigma_q = 0$, $\sigma_z(x_1) = 0$.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано математичну модель і узагальнено метод еквівалентних площ на випадок визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання магістрального трубопроводу з тріщиною.
2. На підставі проведеного чисельного експерименту з'ясовано, що неврахування зварних напружень у разі визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання магістрального трубопроводу може привести до значної переоцінки його залишкового ресурсу і непередбачуваної аварії.

1. Анучкин М. П., Горницкий В. Н., Мирошниченко Б. Л. Трубы для магистральных трубопроводов. – М., 1986.
2. Иванцов О. М., Харитонов В. И. Надежность магистральных трубопроводов. М., 1978.
3. Анненков Н. П., Анучкин М. П. Оценка прочности магистральных трубопроводов методами линейной механики разрушения. – Труды ВНИИСТ, 1974. Вып.30.
4. Агапкин В. М. Кривошеин Б. Л. Методы защиты трубопроводов от разрывов при неустойчивых режимах. Москва, 1976.

5. *Андрейків О. Є., Іваницький Я. Л., Терлецька З. О., Кіт М. Б.* Оцінка довговічності труби нафтогону з поверхневою тріщиною під двовісним блочним навантаженням // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 3. С. 103 – 108.
6. *Андрейків О. Є., Кушнір Р. М., Цирульник О. Т.* Визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з урахуванням наявних дефектів у її стінці і реальних умов експлуатації // У зб. "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" – Київ, 2006. – С. 328 – 331.
7. *Походня И.К.* Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // У кн. "Прогресивний матеріал і технології" – Київ, 2003. – Т.1.– С. 7–32.
8. *Махненко В.И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформации. – К., 1975.
9. *Андрейків О.Є., Кіт М.Б.* Визначення періоду докритичного росту тріщин в елементах конструкцій при їх двохчастотному навантаженні //Машинознавство – 2006, №2 – С. 3–7.6.1.4
10. *Андрейків О.Є., Кіт М.Б., Сас Н.Б.* Енергетичні критерії в механіці заповільненого руйнування матеріалів // Зб. тез доповідей 7–го Міжнародного симпозіуму українських інженерів–механіків у Львові – Львів, 18–20 травня 2005р. – С. 4–5.
11. *Осадчук В.А., Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Пороховський В.В.* Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі кільцевих зварних швів розрахунково–експериментальним методом // Машинознавство. – 2003. – №11.– С. 23–27.
12. *Драгілев А.В., Осадчук В.А.* Математична модель розрахунково–експериментального визначення залишкових напружень в магістральних трубопроводах біля монтажних швів // Всеукраїнський щоквартальний науково–технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ". – Івано–Франківськ, 2005.– №1(14). – С. 25–29.

**ВЛИЯНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ НА ОСТАТОЧНУЮ
ДОЛГОВЕЧНОСТЬ НЕФТЕПРОВОДОВ****Марьяна КИТ**

*Львовский национальный университет имени Ивана
Франко,
ул. Университетская, 1 79000 Львов, Украина*

Предложено эффективный подход для определения остаточного ресурса сварного соединения магистрального трубопровода с внутренней поверхностной трещиной. В основу подхода положены ранее разработанные автором математическая модель для определения периода докритического роста усталостных трещин и метод эквивалентных площадей для приближенной реализации данной модели. На основе этого построена зависимость остаточного ресурса нефтепровода от расстояния трещины к оси сварного шва.

Ключевые слова: остаточная долговечность, трубопровод, трещина, сварные швы.

**INFLUENCE OF WELDED SEAMS ON THE RESIDUAL
LIFE OF THE OIL PIPELINE.****Maryana Kit**

Ivan Franco National University of Lviv,
Universitetska Str., 1, 79000 Lviv, Ukraine

An effective approach to evaluation of the residual life of a welded joint of main pipeline with an internal surface crack has been proposed. The approach is based on the previous mathematical model for determination of the fatigue cracks sub critical growth period, developed by the author and method of equivalent areas for approximate realization of the given model. On this basis the dependence of the residual life of a petroleum pipeline on the crack distance to the weld axis has been calculated

Key words: residual life, pipeline, crack, fatigue, welded seam.

Стаття надійшла до редколегії 12.05.2009

Прийнята до друку 22.12.2010