

Ю. Банахевич

Канд. техн. наук,
НАК «Нафтогаз України»,
м. Київ

О. Андрейків

Член-кор. НАН України, професор,
д-р. тех. наук

М. Кіт

Магістр

Львівський національний університет
імені Івана Франка,
м. Львів

УДК 539.375

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБОПРОВОДУ З ПОВЕРХНЕВОЮ ТРІЩИНОЮ

Методом еквівалентних площ отриманий в замкнутому вигляді розв'язок задачі про визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання трубопроводу. Точність цього розв'язку підтверджена шляхом числової реалізації цієї задачі методом Рунге-Куты.

залишковий ресурс, зварне з'єднання, втомна тріщина, метод еквівалентних площ, залишкові напруження, коефіцієнти інтенсивності напружень

Зварні конструкції широко використовують у багатьох інженерних спорудах. За статистикою приблизно 80 % пошкоджень зварних конструкцій пов'язані з руйнуванням зварних з'єднань. Важливою проблемою сьогодення є втомна зварних конструкцій. Доля втомних пошкоджень зварних конструкцій зростає і становить близько 40 % загальної кількості їх передчасних пошкоджень і відмов. Стосовно окремих видів виробів та споруд цей відсоток є ще вищим, тому вдосконалення методів розрахунку зварних з'єднань на міцність і довговічність є ключовим моментом у підвищенні якості зварних конструкцій.

Зварні з'єднання є складним об'єктом для розрахунків. Вони часто містять металургійні або геометричні дефекти, що виникли в процесі зварювання. Окрім цього, істотна механічна неоднорідність матеріалу поєднується тут з високими залишковими напруженнями. У цій статті такі напруження визначаються з допомогою відомого [1] розрахунково-експериментального методу для випадку зон багат шарових кільцевих швів у трубопроводі так, щоб можна було врахувати двовимірний розподіл несумісних залишкових деформацій у стінці труби, що зумовлені зварюванням. Разом з цим, ці напруження усереднюються за товщиною труби, щоб спростити розв'язок задачі

про залишковий ресурс зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною.

Слід зазначити, що така задача уже розглядалася раніше авторами в [2] за допомогою наближеного методу еквівалентних площ. Але залишалось невиясненим питання про точність отриманого наближеного розв'язку. Тут при застосуванні методу еквівалентних площ використана точніша формула для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень. Разом з цим, для конкретних значень геометричних параметрів труби, зварного з'єднання, зміни внутрішнього тиску і втомних характеристик матеріалу задача розв'язана точнішим числовим методом і числовий розв'язок порівняний з наближеним, отриманим методом еквівалентних площ.

Залишкові напруження в трубах біля зварних швів. У працях авторів цієї статті, а також Осадчука В.А. та Драгілев А.В. [1] розроблений ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів у трубопроводах. У цьому підході експериментально показано діагностування напруженого стану в зоні кільцевого багат шарового зварного шва магістрального трубопроводу «Більче — Волиця — Долина» при переході через ріку Стрий (діаметр — 1420×22,5 мм; матеріал труби —

сталь Х70). Для отримання експериментальних даних використано електромагнітний метод і вимірювальний прилад «MESTR-411» з чотириполюсним накладним електромагнітним перетворювачем трансформаторного типу. За вимірами цим методом визначають усереднену у зоні контакту давача з трубою. Для опрацювання експериментальних даних використано затверджену комітетом зі стандартизації ТК-78 методику вимірювань механічних напружень по площі контакту давача з трубою та вплив структурних змін на магнітну проникність металу в зоні термічного впливу.

Результати опрацювання згаданих вище експериментальних даних дали можливість у цій праці отримати аналітичні залежності для визначення залишкових напружень біля кільцевого зварного шва на зовнішній поверхні $\sigma_3^{(1)}(x_1)$ і внутрішній поверхні $\sigma_3^{(2)}(x_1)$ труби:

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

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

Середні значення залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ у стінці труби визначатимуться за формулою

$$\sigma_3(x_1) = 0,5(\sigma_3^{(1)} + \sigma_3^{(2)}). \quad (2)$$

Тоді зміна напружень у стінці труби $\sigma(x_1)$ дорівнюватиме сумі напружень від внутрішнього тиску P і напружень $\sigma_3(x_1)$:

$$\sigma(x_1) = pr_1 h_1^{-1} + \sigma_3(x_1). \quad (3)$$

Визначення періоду докритичного росту тріщини в трубі біля кільцевого зварного шва методом еквівалентних площ. Щоб знайти період докритичного росту тріщини в трубі біля кільцевого зварного шва побудуємо розрахункові моделі розвитку дефектів і визначимо час до їх зростання наскрізь її стінки. При цьому розглянемо трубу нафтопроводу (рис. 1), послаблену півеліптичною тріщиною, яка знаходиться поблизу зварного шва і, згідно з рис. 1, введемо такі позначення: r_1 — радіус труби; h_1 — товщина стінки труби. Початкові розміри тріщини вибрані такими: $a_0 = 0,002$, $b_0 = 0,001$.

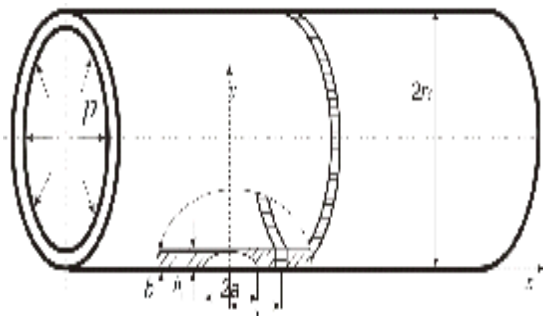


Рис. 1. Схема навантаження зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною

Оскільки товщина стінки нафтопроводу h_1 набагато менша від радіуса труби r_1 , то для спрощення розв'язку задачі з незначною похибкою в кінцевому результаті вважатимемо, що така тріщина розвивається в нескінченній пластині, підданій дії циклічно змінного з часом навантаження p .

Для спрощення математичних викладок при розв'язуванні задачі застосуємо метод еквівалентних площ [3, 4], згідно з яким зміна площі втомної тріщини розглянутої конфігурації наближено така, як для півкругової тріщини радіуса c однакової площі ($c^2 = ab$). Звідси запишемо наближено значення зміни КІН K_{max} і ΔK_I [5] як для пластини з поверхневою півкруговою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями $\sigma(x_1)$:

$$K_{max} = S\sqrt{h_1}\varepsilon\sigma(x_1)(1,17 + 0,26\varepsilon^2 - 0,12\varepsilon^4),$$

$$\Delta K_I = S\sqrt{h_1}\varepsilon pr_1 h_1^{-1}(1,17 + 0,26\varepsilon^2 - 0,12\varepsilon^4), \quad (4)$$

де $\varepsilon = c/h_1$, $S = 1,1 + 0,35\varepsilon^2$.

На основі цього, а також за даними праці [2] і, вважаючи, що тріщина поширюється рівномірно по всьому півколовому контуру, така задача зведеться до розв'язання диференціального рівняння

$$\frac{dc}{dN} = \frac{1}{6\pi\sigma_T^2} \frac{(\Delta K_I)^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - K_{max}^2}$$

при початкових і кінцевих умовах:

$$N = 0, \quad c(N) = c_0 = \sqrt{ab}; \quad N = N_g, \quad c(N_g) \approx h_1.$$

Тут c_0 — початковий радіус півкової тріщини, площа якої дорівнює площі початкової півеліптичної тріщини.

В отримане рівняння підставляємо співвідношення (1) — (4). У результаті цього для визначення залишкової довговічності зварного з'єднання отримаємо рівняння

$$\frac{d\varepsilon}{dN} = \left(\left(S\sqrt{h_1}\varepsilon\pi \cdot pr_1 h_1^{-1} (0,66 + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4) \right)^4 - K_{th}^4 \right) \times$$

$$\times \left(K_{fc}^2 - \left(S\sqrt{h_1}\varepsilon\pi (0,66\sigma(x_1) + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4) \right)^2 \right)^{-1} \times$$

$$\times (6\pi\sigma_T^2 h_1)^{-1} \quad (5)$$

з такими початковими і кінцевими умовами:

$$N = 0, \quad \varepsilon = b_0/h_1; \quad N = N_g, \quad \varepsilon \approx 1. \quad (6)$$

Отже, математичну модель для визначення періоду $N = N_g$ до розгерметизації труби нафтопроводу складають математичні співвідношення (5), (6). Тут константи матеріалу σ_T , K_{fc} , K_{th} знаходять експериментально.

На основі результатів досліджень, викладених вище, можна приступити до розрахунку залишкової довговічності труби нафтопроводу при заданих геометричних параметрах, а також заданих навантаженнях. Для цього

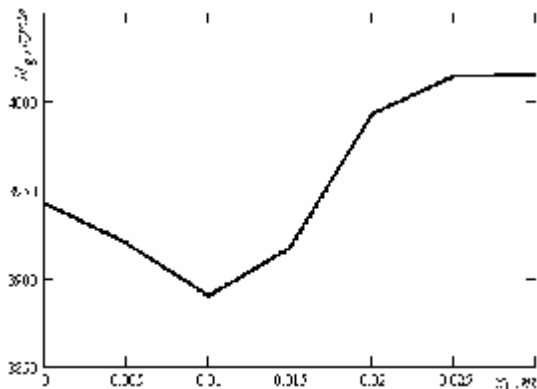


Рис. 2. Графічна залежність залишкової довговічності труби N_g від віддалі x_1 тріщини до зварного шва згідно з (7)

проінтегруємо диференціальне рівняння кінетики росту втомної тріщини (5) при початкових і кінцевих умовах (6). У результаті цього отримуємо

$$N_g = \int_{b_0 h_1^{-1}}^1 \left(\frac{6\pi}{\sigma_T^2 h^{-1}} \times \frac{K_{fc}^2 - (S\sqrt{h_1 \epsilon \pi} \sigma(x_1) (0,66 + 0,15\epsilon^2 - 0,07\epsilon^4))^2}{(S\sqrt{h_1 \epsilon \pi} p r_1 h_1^{-1} (0,66 + 0,15\epsilon^2 - 0,07\epsilon^4))^4 - K_{th}^4} \right) d\epsilon. \quad (7)$$

У формулу (7) підставляємо дані для труби нафтопроводу: $r_1 = 0,506$ м, $h_1 = 0,012$ м, $b_0 = 0,0014$ м, $a_0 = 0,0028$, $K_{fc} = 86$ МПа, $\sigma_T = 420$ МПа, $p = 4,5$ МПа, $K_{th} = 6,7$ МПа.

На основі формули (7) побудована графічна залежність $N_g \sim x_1$, яка зображена на рис. 2 (при кожному значенні $x_1 = 0; 0,005; 0,01; \dots; 0,03$).

Як впливає з порівняння співвідношення (3) з графіком рис. 2, графічна залежність залишкової довговічності якісно є протилежна до зміни залишкових напружень.

Визначення числовим методом періоду докритичного росту тріщини в трубі біля кільцевого зварного шва. Знайдемо результат залишкової довговічності труби нафтопроводу числовим методом — методом Рунге-Кута. Вважатимемо, що тріщина розвивається в нескінченній пластині, підданій дії змінного навантаження p . Звідси запишемо наближене значення $K_{I\max}$ і ΔK_I як для пластини з поверхневою півеліптичною тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями $\sigma(x_1)$:

$$K_{I\max A} = \sigma(x_1) \sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi} S, \quad \Delta K_{IA} = p r_1 h_1^{-1} \sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi} S,$$

$$K_{I\max B} = \sigma(x_1) \sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi}, \quad \Delta K_{IB} = p r_1 h_1^{-1} \sqrt{\pi b} \frac{M}{\Phi},$$

$$M = (1,13 - 0,09\lambda) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \lambda} \right) \epsilon^2 +$$

$$+ \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \lambda} + 14,0(1 - \lambda)^{2,4} \right) \epsilon^4, \quad (8)$$

$$\Phi = \sqrt{1 + 1,464\lambda^{1,65}}, \quad S = (1,1 + 0,35\epsilon^2) \sqrt{\lambda}, \quad \lambda = \frac{b}{a}, \quad \epsilon = \frac{b}{h_1}.$$

Вважатимемо, що при своєму поширенні тріщина буде завжди зберігати півеліптичну конфігурацію. На основі цього, а також результатів праць [2 — 4], для визначення залишкового ресурсу $N = N_g$ отримуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = \frac{1}{6\pi\sigma_T^2} \frac{(\Delta K_I(a,b))^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - K_{I\max}^2(a,b)}, \\ \frac{db}{dN} = \frac{1}{6\pi\sigma_T^2} \frac{(\Delta K_I(a,b))^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - K_{I\max}^2(a,b)}. \end{cases} \quad (9)$$

Підставивши (8) у рівняння (9) та експериментальні дані для трубопроводу «Кременчук — Херсон» [1], розв'яжемо цю систему рівнянь числовим методом Рунге — Кута у програмі Mathcad. Для отримання результату потрібно, щоб всі величини були відомими, тому будемо знаходити залишковий ресурс поступово підставляючи кожне значення $x_1 = 0; 0,005; 0,01; \dots; 0,03$. Обчислення проводяться до моменту коли тріщина підросте і досягне товщини труби, тобто $b = h_1 = 0,012$ м. Так, наприклад, на рис. 3 зображені графічні залежності $a \sim N$, $b \sim N$ при $x_1 = 0$.

За знайденими результатами побудована графічна залежність $N_g \sim x_1$ (рис. 4).

На основі отриманих результатів можна зробити порівняння ефективності методу еквівалентних площ та числового методу Рунге — Кута. Для цього об'єднаємо результати згідно з цими методами залежностей залишкової довговічності труби нафтопроводу $N = N_g$ від віддалі тріщини x_1 до зварного шва на рис. 5. Як видно з такого порівняння, метод еквівалентних площ дає достатню для інженерного застосування точність. При цьому отримана неточність іде в запас довговічності зварного з'єднання труби нафтопроводу.

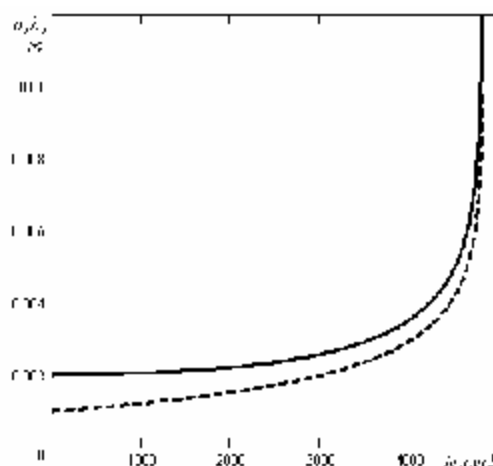


Рис. 3. Залежності $a \sim N$, $b \sim N$ при $x_1 = 0$

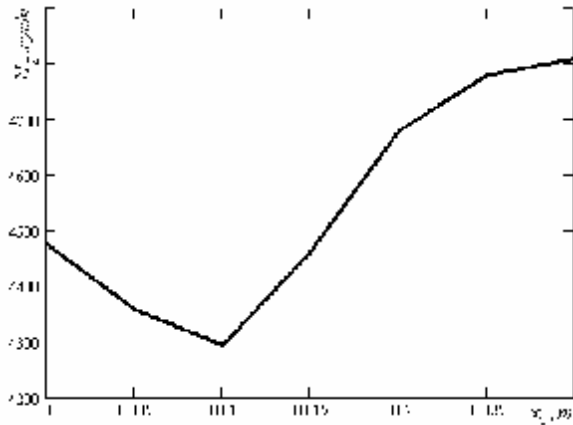


Рис. 4. Залежність залишкової довговічності труби N_g від віддалі x_1 тріщини до зварного шва отриманої методом Рунге-Куты

Висновки. Розв'язана задача про визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання трубопроводу двома методами: наближеним методом еквівалентних площ і точнішим числовим методом Рунге — Куты. Показано, що простий у застосуванні метод еквівалентних площ дає достатню для інженерних цілей точність.

Література

1. 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(77). — С. 23—27.
2. Банахевич Ю.В., Андрейків О.Є., Кім М.Б. Вплив розташування відносно зварного шва поверхневої тріщини в стінці труби на залишкову довговічність зварного з'єднання // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. — 2007. — №2 (16). — С. 108—112.

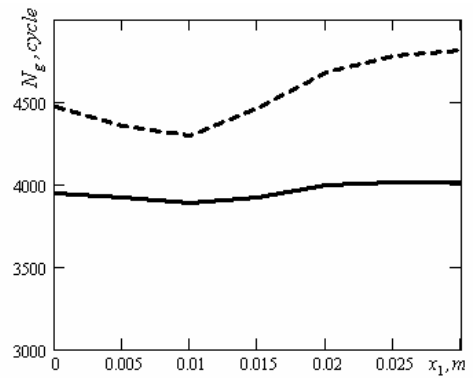


Рис. 5. Графічна залежність залишкової довговічності труби N_g від віддалі x_1 тріщини до зварного шва; пунктирна лінія — метод Рунге-Куты; суцільна — метод еквівалентних площ

3. Андрейків А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. — К.: Наук. думка, 1992. — 184 с.
4. Шата М., Терлецька З.О. Энергетичний підхід у механіці втомного поширення макротріщини // *Механіка руйнування і міцність конструкцій*. — Львів: Каменяр. — 1999. — В. 2. — С. 141—148.
5. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. — К.: Наук. думка, 1988. — 629 с.

Отримана 22.10.08

Ju. Banakhevych, O. Andreykiv, M. Kit
Determination of residual resource of the welded joint of pipeline with superficial crack
Management of the main gas pipelines "Lvivtransgas" Franco's Lviv National University, Lviv

The decision of task about determination of residual resource of the welded joint of pipeline is got in the reserved kind with the help of method of equivalent areas. Exactness of this decision is confirmed by numerical realization of this task by the method of Runge-Kutt.

21 01 01 2009

WIND TURBINE WAKES

20 October 2009 — 22 October 2009
 Universidad Politécica de Madrid, Spain

Contact: *Prof. Antonio Crespo*
 Departamento de Ingenieria Energetica y Fluidomecanica E.T.S.I. Industriale
 Universidad Politecnica de Madrid
 Jose Gutierrez Abascal, 228006 Madrid, Spain
 phone: +34 91 336 3152; fax: +34 91 336 3006
 email: crespo@etsii.upm.es