



ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ В СТІНЦІ ТРУБИ НАФТОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НАВОДНЮВАННЯ

Д. В. РУДАВСЬКИЙ, канд. техн. наук (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів)

Запропоновано метод оцінки залишкової довговічності елемента труби нафтопроводу із тріщиноподібним дефектом на його внутрішній поверхні. Досліджено кінетику поширення тріщини із урахуванням впливу наявності концентрації водню в стінці нафтопроводу. Початкові розміри дефекту визначено методом акустичної емісії. Показано, що коливання внутрішнього тиску в нафтопроводі та його наводнення залежно від початкових розмірів дефекту можуть спровокувати утомне поширення дефекту.

A method is proposed for evaluation of residual fatigue life of an oil pipe element with a cracklike defect on its inner surface. Kinetics of crack propagation was studied, allowing for the influence of the presence of hydrogen concentration in the oil pipeline wall. Initial dimensions of the defect were determined by acoustic emission method. It is shown that inner pressure variations in the oil pipeline and its hydrogenation, can provoke fatigue-induced defect propagation, depending on the initial dimensions of the defect.

Для встановлення термінів безпечної експлуатації трубопроводів та їх елементів проводять технічну діагностику небезпечних ділянок. Найпоширенішими та найрозвинутішими серед сучасних методів НК для виявлення експлуатаційних дефектів типу тріщин є акустичні методи [1,2].

Метою досліджень є створення методики оцінки залишкового ресурсу елемента нафтопроводу з наявною у ньому тріщиною за даними акустико-емісійного (АЕ) діагностування.

Розглянемо задачу про ріст поверхневої півеліптичної утомної тріщини, що розташована на внутрішній стінці нафтопроводу помпувальної станції, виготовленого зі сталі 16ГС за циклічної зміни внутрішнього тиску $p = 3,7$ МПа із асиметрією циклу $R = 0,85$ (рис. 1). Механічні характеристики сталі: межа плинності $\sigma_0 = 450$ МПа, нижнє порогове значення циклічної тріщностійкості $K_{th} = 3,5$ МПа·м^{1/2}, циклічна тріщностійкість $K_{Ic} = 120$ МПа·м^{1/2}.

Задача полягає у визначенні кінетики росту утомної тріщини. Нехай a_0, b_0 — початкові розміри тріщини, r — внутрішній радіус труби, h — товщина стінки ($h = 0,01$ м).

Для визначення кінетики контуру тріщини (рис. 1, б) вважали, що контур тріщини під час її поширення завжди залишається плоским та близьким до півеліптичного. Тоді залежність довжини півосей цього контуру від кількості циклів навантаження можна отримати із розв'язку системи двох звичайних диференціальних рівнянь у двох точках контуру, що відповідають великій та малій півосі ($\varphi = 0, \varphi = \pi/2$) (рис. 1, б):

$$V \frac{da}{dN} = V [K_{I_{max}}(a, b, \varphi = 0), C_H],$$

$$\frac{db}{dN} = V [K_{I_{max}}(a, b, \varphi = \pi/2), C_H], \quad (1)$$

де $K_{I_{max}}$ — максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у відповідних точках контуру тріщини; C_H — концентрація водню в стінці труби біля контуру тріщини.

Граничні умови:

$$N = 0: a = a_0, b = b_0,$$

$$N = N_d: b = h, \quad (2)$$

де N — кількість циклів зміни тиску в трубі; N_d — залишкова довговічність стінки труби.

Швидкості росту V півосей контуру тріщини визначали на основі рівняння, отриманого у праці [3]

$$V(a, b) = \frac{0,03 \sigma_0^{-2} (1-R)^2 (1-R^4) K_{I_{max}}^4(a, b)}{\alpha (K_{Ic}^2 - A_1 E \sigma_0 C_H) - K_{I_{max}}^2(a, b)}, \quad (3)$$

де E — модуль пружності; α, A_1 — деякі постійні матеріалу.

Для тріщини в нашому випадку КІН в кожній точці її контуру можна представити у вигляді [4]:

$$K_I(a, b, \varphi) = \sigma \sqrt{\pi b} F(\xi, \chi, \varphi) \quad (4)$$

де

$$\xi = \frac{b}{h}; \chi = \frac{b}{a}; \sigma = p \left(\frac{r}{h} - \frac{H_1}{2} \right); F = \frac{H_2 + H_3 \xi^3 + H_4 \xi^4}{q} f_1 f_2;$$

$$H_1 = H_5 + (H_6 - H_5) \sin^q \varphi; q = 0,2 + \chi + 0,6 \xi;$$

$$H_5 = 1 - 0,34 \xi - 0,11 \chi \xi;$$

$$H_6 = 1 - (1,22 + 0,12 \chi) \xi + (0,55 - 1,05 \chi^{0,75} + 0,47 \chi^{1,5}) \xi^2;$$

$$Q = \sqrt{1 + 1,464 \chi^{1,65}}; H_2 = 1,13 - 0,09 \chi; H_3 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \chi};$$

$$H_4 = 0,5 - \frac{0,1}{0,65 + \chi} + 14(1 - \chi)^{24}; f_1 = (\chi^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^{1/4};$$

$$f_2 = 1 + (0,1 + 0,35 \chi^2)(1 - \sin \varphi)^2.$$

Система звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку (1) з урахуванням (2)–(4) була розв'язана числовим методом Рунге–

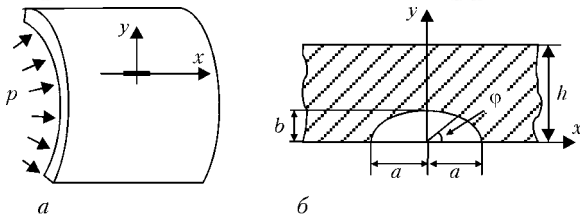


Рис. 1. Схема елемента труби нафтопроводу (а) та розташування півеліптичної тріщини (б)

Кутта. Рівень концентрації водню C_H у стінці труби біля тріщиноподібного дефекту оцінювали із розв'язку дифузійної задачі.

Розрахунок концентрації водню біля вершини тріщини. Розглянемо пружно-пластичне ізотропне тіло, яке початково рівномірно наводнене до деякого рівня концентрації водню C_0 і містить плоску тріщину розміром l в умовах симетричного відносно площини тріщини напруженого стану (рис. 2). Нехай зовні у тріщину попадає водневомісне середовище, забезпечуючи таким чином у поверхневому шарі біля її вершини деяку концентрацію водню C_s .

Концентрацію водню в околі вершини тріщини шукали на основі узагальненого закону Фіка:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = D_H \nabla^2 C_H - \frac{D_H V_H}{RT} \nabla \sigma_T \nabla C_H, \quad (5)$$

де D_H — коефіцієнт дифузії водню у металі; V_H — парціальний молярний об'єм; t — час; R — універсальна газова постійна.

Апроксимуючи розподіл гідростатичного напруження σ_T на продовженні тріщини біля її вершини кусково-лінійною залежністю (рис. 3), в одновимірному випадку рівняння дифузії (5) зведеться до системи двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - 2m \frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi}, \quad 0 < \xi < 1, \\ \frac{\partial C_2(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 C_2(\xi, \tau)}{\partial \xi^2}, \quad \xi > 1, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\xi = x/x_m$; $\tau = Dt/x_m^2$; $m = (\sigma_T)'_x V_H x_m / 2RT$.

Взявши до уваги, що в точці $x = 1$ повинні виконуватися умови неперервності потоку [5] і концентрації водню

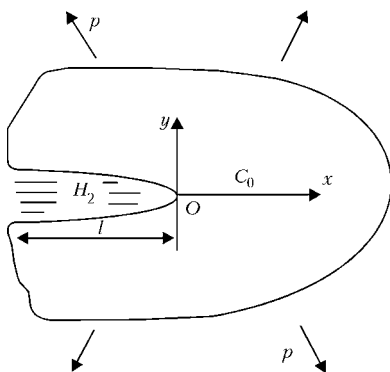


Рис. 2. Схема навантаженої пластини із тріщиною

$$\frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi} - 2m C_1(\xi, \tau) = \frac{\partial C_2(\xi, \tau)}{\partial \xi}, \quad \xi = 1$$

$$C_1(\xi, \tau) = C_2(\xi, \tau), \quad \xi = 1 \quad (7)$$

та вважаючи, що фізико-хімічні умови наводнення металу в вершині тріщини забезпечують постійність величини концентрації водню C_s в її поверхневому шарі, тобто представляючи граничну умову рівняння дифузії у вигляді

$$C_1(0, \tau) = C_s, \quad (8)$$

визначали розподіл концентрації водню в околі вершини тріщини з розв'язку задачі дифузії (6)–(8) за початкової умови:

$$C_1(\xi, 0) = C_2(\xi, 0) = C_0. \quad (9)$$

Задача (6)–(9) з умовою обмеженості концентрації водню на безмежності:

$$C_2(0, \tau) < \infty \quad (10)$$

є граничною задачею для диференціального рівняння в частинних похідних 2-го порядку параболічного типу з кусково-неперервними коефіцієнтами. За допомогою комбінації методів інтегрального перетворення Лапласа та граничної інтерполяції було отримано розв'язок цієї задачі у вигляді:

$$C(\xi, \tau) = \frac{(2C_s \xi^{-1} \sqrt{\tau \pi^{-1}} e^{[m\xi - \xi^2/4\tau]} + C_0) C_s e^{2m\xi}}{2C_s \xi^{-1} \sqrt{\tau \pi^{-1}} e^{[m\xi - \xi^2/4\tau]} + C_s e^{2m\xi}}. \quad (11)$$

На рис. 4 показано розподіл концентрації водню (11) біля вершини тріщини.

Приймали рівень початкової концентрації водню в матеріалі $C_0 = 0,5C_s$. На основі отриманого розв'язку можна зробити висновок, що наявність попереднього наводнення та поля механічних напружень біля вершини тріщини може збільшувати концентрацію водню в цій зоні у 10...12 разів відносно поверхневої.

Результати розрахунку залишкової довговічності елемента нафтопроводу. Для виявлення зародження чи розвитку тріщиноподібних дефектів у стінці трубопроводів використовували лінійну локацію джерел АЕ. При цьому коефіцієнт п'єзочутливості первинного перетворювача АЕ (ПАЕ) становив $\eta = 1,6 \cdot 10^9$ В/м. Внаслідок АЕ-

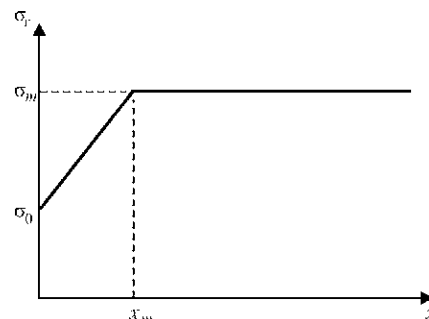


Рис. 3. Апроксимація розподілу гідростатичного напруження біля вершини тріщини

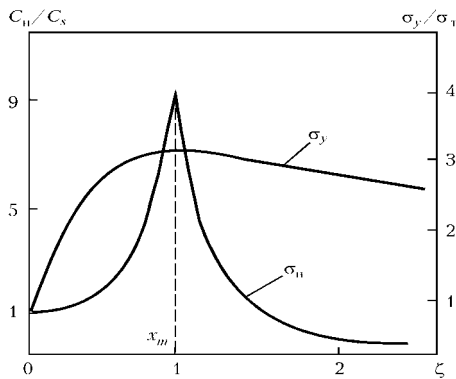


Рис. 4. Графічне представлення розподілу концентрації водню C_H в полі механічних напружень σ_y біля вершини тріщини

контролю було зареєстровано три події з амплітудами на виході ПАЕ 3; 3,8; 5 мВ. Відстань від джерела АЕ до ПАЕ була 2,8 м.

Згідно концепції визначення об'ємної пошкодженості матеріалу [6] еквівалентну площу новоутворених поверхонь тріщин, що генерували АЕ, визначали через радіус r_0 еквівалентного круга з урахуванням зникання амплітуди пружної хвилі АЕ:

$$u_{\max} \Big|_{c_1} = \delta_i \frac{\sigma_0 \Phi_i^{(d)}(\theta) r_0^2}{T_r \rho c_1^2 R}, \quad (12)$$

де $u_{\max} \Big|_{c_1}$ — максимальне значення модуля вектора переміщень; $\Phi_i^{(d)}(\theta)$ — функція кутової залежності амплітудних значень модуля вектора переміщень; T_r — час релаксації; ρ — густина матеріалу; c_1 — швидкість пружної хвилі; R — відстань від джерела хвилі до точки спостереження.

Отримали, що сумарна еквівалентна площа визначалась площею круга радіусом $r_0 \approx 10^{-4}$ м.

На рис. 5 показано результати прикладів розрахунку довговічності N_d стінки труби нафтопроводу для різних величин площі S півдискової тріщини на основі розв'язку рівнянь системи (1).

Висновок

Розрахунок показав, що тріщини із початковим радіусом поверхні $r_0 < 3 \cdot 10^{-3}$ м не розвиваються, оскільки за даних умов експлуатації нафтопроводу величина КІН для таких тріщин менша його порогового значення K_{th} . Отже, виявлені тріщиноподібні дефекти розміром $r_0 \approx 10^{-4}$ м під час АЕ-діагностування ділянки нафтопроводу помпувальної станції є безпечними з точки зору утомного розтріскування за даних умов експлуатації.

Слід зауважити, що згідно закону Сівертса [5] та розв'язку задачі дифузії водню (6) збільшення внутрішнього тиску в трубопроводі призведе до підвищення рівня концентрації вод-

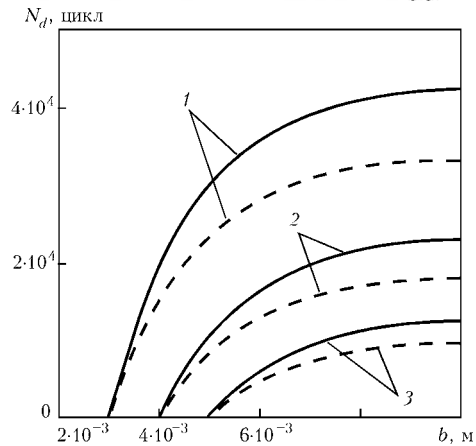


Рис. 5. Залежність залишкової довговічності N_d елемента нафтопроводу за різних початкових розмірів півдискової тріщини: 1 — $r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$; 2 — $4 \cdot 10^{-3}$; 3 — $5 \cdot 10^{-3}$ м (суцільні лінії — без врахування наводнювання стінки труби, штрихові — із врахуванням)

ню на його поверхні, а відповідно і в околі біля вершини тріщини. Цей факт, згідно проведених розрахунків (рис. 5), може стати причиною значного зниження залишкової довговічності елемента труби нафтопроводу.

Цель работы — построение методики оценки остаточного ресурса элемента нефтепровода с трещиной по данным акустико-эмиссионного диагностирования. Рассматривали поверхностную полуэллиптическую трещину, расположенную на внутренней поверхности трубы. Исследована кинетика распространения трещины с учетом влияния концентрации водорода в стенке нефтепровода. Уровень насыщения стенки трубы нефтепровода водородом определяли из решения задачи диффузии водорода в поле механических напряжений возле вершины трещины. Показано, что колебания внутреннего давления в нефтепроводе и ее наводороженость в зависимости от начальных размеров дефекта могут спровоцировать его усталостный рост.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Наук.-техн. посібник. У 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009. — 887 с.
2. Скальський В. Р., Сулим Г. Т. Основи акустичних методів неруйнівного контролю. — Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. — 386 с.
3. Андрейків О. Є., Рудавський Д. В., Гембара О. В. Розрахункова модель поширення втомних тріщин у наводнених зварних з'єднаннях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2002. — № 6. — С. 18–24.
4. Newman J. C., Raju I. S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack // Int. J. Fract. Mech. — 1981. — 15, № 1/2. — P. 185–192.
5. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 217 с.
6. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. — Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. — 330 с.

Надійшла до редакції
05.04.2012