

УДК 593.375, 620.179.17, 669.788

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ НАВОДНЕНОЇ ТРУБИ ЗА ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Д. В. РУДАВСЬКИЙ, Б. П. КЛИМ,
С. П. ПОЧАПСЬКИЙ, Р. Я. ЯРЕМА, В. Р. БАС

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Запропоновано методику оцінювання залишкової довговічності наводненого елемента труби із тріщиноподібним дефектом на його внутрішній поверхні. Досліджено кінетику поширення тріщини із врахуванням впливу концентрації водню в стінці трубопроводу. Локацію тріщиноподібного дефекту у стінці труби та його початкові розміри встановлювали методом акустичної емісії. Для визначення концентрації водню у металі трубопроводу запропоновано застосовувати метод магнето-акустичної емісії. Показано, що коливання внутрішнього тиску в нафто- чи газопроводі та наводнювання його стінок залежно від початкових розмірів тріщиноподібного дефекту можуть спровокувати його втомне поширення.

Ключові слова: поверхнева тріщина, акустична емісія, концентрація водню, втомне руйнування, залишкова довговічність.

Для встановлення термінів безпечної експлуатації нафтогазопроводів та їх елементів виконують технічну діагностику небезпечних ділянок. Найпоширенішими та розвинутими серед сучасних методів неруйнівного контролю для виявлення експлуатаційних дефектів типу тріщин є акустичні методи [1–3]. Мета роботи – створити на основі розрахункової моделі методику оцінювання залишкового ресурсу елемента наводненої труби нафто- чи газопроводу з тріщиною за результатами акустико-емісійного та магнето-акустико-емісійного діагностування.

Формулювання розрахункової моделі. Одні із найтипівіших поверхневих дефектів, які виявляють на внутрішніх стінках труб нафтогазопроводів, є достатньо близькими за формою до півеліптичної тріщини. Тому розглянемо задачу про ріст такої поверхневої півеліптичної втомної тріщини у стінці труби (рис. 1) за циклічної зміни внутрішнього тиску p із деякою асиметрією циклу навантаження R .

Нехай a_0 та b_0 – початкові розміри тріщини; r – внутрішній радіус труби; h – товщина стінки (рис. 1б).

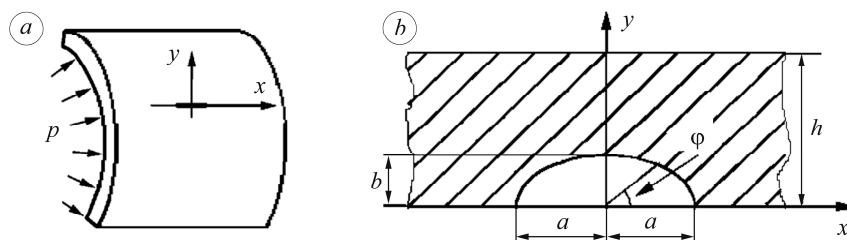


Рис. 1. Схема елемента труби нафтогазопроводу (а) та розташування півеліптичної тріщини (б).

Fig. 1. Scheme of oil-gas pipeline element (a) and semi-elliptic crack location (b).

Відомо [4–6], що водень у конструкційних сталях навіть за порівняно невисокої концентрації може значно понижувати їх тріщиностійкість, пришвидшуючи таким чином ріст тріщин, як статичних, так і втомних. Як показує практика, через присутність у нафті та газі воденьвмісних компонентів стінки труб нафтогазопроводів можуть наводнюватися до значного рівня концентрації водню – 5...7 ppm. Тому під час розрахунків залишкової довговічності елемента труби із тріщиною необхідно враховувати вплив наводнювання матеріалу на його характеристики тріщиностійкості.

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

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = V(K_{I\max}(a, b, \varphi = 0), C_H), \\ \frac{db}{dN} = V(K_{I\max}(a, b, \varphi = \pi/2), C_H) \end{cases}, \quad (1)$$

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.

Крайові умови до системи диференціальних рівнянь (1) запишемо так:

$$a = a_0; \quad b = b_0 \quad \text{при} \quad N = 0; \quad b = h \quad \text{при} \quad N = N_d, \quad (2)$$

де N – кількість циклів зміни внутрішнього тиску в трубі; N_d – залишкова довговічність стінки труби з тріщиною.

Дослідженню кінетики поширення плоских втомних макротріщин присвячена низка праць [7–9]. Зокрема, показано [8, 9], що енергетичний підхід механіки руйнування матеріалів є одним із найефективніших для моделювання росту втомних макротріщин. На основі результатів [9] швидкість росту V півосей a та b контуру тріщини можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} V_a(a, b) &= \frac{0,05\sigma_0^{-2}(1-R)^4 K_{I\max}^4(a, b, 0)}{\alpha \cdot K_{Ic}^2(C_H) - K_{I\max}^2(a, b, 0)}, \\ V_b(a, b) &= \frac{0,05\sigma_0^{-2}(1-R)^4 K_{I\max}^4(a, b, \pi/2)}{\alpha \cdot K_{Ic}^2(C_H) - K_{I\max}^2(a, b, \pi/2)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де σ_0 – модельне значення граници текучості матеріалу [9]; K_{Ic} – його циклічна тріщиностійкість; α – експериментальна константа матеріалу.

Тут КІН для тріщини у кожній точці її контуру можна наближено подати у вигляді [10]

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

де $\xi = b/h$; $\chi = b/a$; $\sigma = p(r/h - 0,5H_1)$; $F = (H_2 + H_3\xi^3 + H_4\xi^4)q^{-1}f_1f_2$; $H_1 = H_5 + (H_6 - H_5)\sin^q\varphi$; $q = 0,2 + \chi + 0,6\xi$; $H_5 = 1 - 0,34\xi - 0,11\chi\xi$; $H_6 = 1 - (1,22 + 0,12\chi)\xi + (0,55 - 1,05\chi^{0,75} + 0,47\chi^{1,5})\xi^2$; $Q = \sqrt{1 + 1,464\chi^{1,65}}$; $H_2 = 1,13 - 0,09\chi$; $H_3 = -0,54 + 0,89(0,2 + \chi)^{-1}$; $H_4 = -0,5 - 0,1(0,65 + \chi)^{-1} + 14(1 - \chi)^{24}$; $f_1 = (\chi^2 \cos^2\varphi + \sin^2\varphi)^{1/4}$; $f_2 = 1 + (0,1 + 0,35\chi^2)(1 - \sin\varphi)^2$.

Розв'язок системи звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку (1) з крайовими умовами (2) можна побудувати числовим методом, наприклад, методом Рунге-Кутти [11]. Для оцінювання на основі наведеної вище розрахункової моделі залишкової довговічності елемента труби із тріщиною необхідно знати її початкові розміри. Таку інформацію можна отримати за парамет-

рами сигналів пружних хвиль на основі методу акустичної емісії (АЕ), який добре зарекомендував себе під час локації та визначення розмірів тріщиноподібних дефектів у металевих матеріалах [1–3, 12].

Метод магнето-акустичної емісії для оцінки водневої пошкодженості феромагнетного матеріалу. Вплив наводнювання під час експлуатації нафтогазової труби на її залишкову довговічність проявляється у зниженні характеристик тріщиностійкості матеріалу трубопроводу та залежить від концентрації C_H водню у його стінці. Тому необхідно розробити ефективну неруйнівну методику оцінювання зміни характеристик тріщиностійкості експлуатованого матеріалу внаслідок його локальної водневої пошкодженості. На підставі розроблених апаратурних засобів та результатів експериментальних і теоретичних досліджень [13] розроблено методику магнето-акустичної емісії (МАЕ) для оцінювання водневої пошкодженості феромагнетних матеріалів елементів конструкцій. Вона ґрунтується на явищі магнетопружної акустичної емісії і полягає у реєстрації та аналізі пружних хвиль АЕ, спричинених ефектом Баркгаузена [13]. МАЕ виникає у результаті магнетострикційних деформацій у локальних областях феромагнетика та раптових змін положення доменних стінок під впливом квазістатичного зовнішнього магнетного поля. Детальніше спосіб оцінки наводнення феромагнетних сплавів методом МАЕ описано раніше [14, 15].

До характерних особливостей методики МАЕ, які визначають її переваги, належать: можливість здійснювати контроль феромагнетних матеріалів без прикладання зовнішнього механічного навантаження, тиску, температурного поля тощо (пружні механічні напруження у феромагнетному матеріалі створює зовнішнє магнетне поле); чутливість до реєстрації переміщень (10^{-12} ... 10^{-14} м), спричинених рухом доменних стінок за ефекту Баркгаузена, і можливість отримати необхідні дані для їх розрахунку за дії на феромагнетик зовнішнього магнетного поля; чутливість до зміни структури феромагнетика; можливість виявляти ступінь водневого деградування феромагнетних матеріалів і конструкцій; простота у застосуванні за виробничих умов.

Недоліком методу є труднощі (у деяких випадках) виділення сигналів МАЕ на фоні завад. Це пояснюється тим, що сигнали МАЕ характеризують стохастичний імпульсний процес.

Методику рекомендується використовувати під час діагностування феромагнетних матеріалів і елементів конструкцій, для яких недопустиме додаткове зовнішнє навантаження під час їх експлуатації. У разі виявлення на об'єкті контролю ділянок, де параметри сигналів МАЕ істотно відрізняються, їх додатково обстежують одним із методів неруйнівного контролю (ультразвуковим, радіаційним, магнетним, проникаючими речовинами тощо), передбаченим нормативно-технічними документами. Якщо у результаті цього в об'єкті виявлено той чи інший дефект, то метод МАЕ можна використовувати для моніторингу його розвитку.

На основі розроблених раніше [1, 16] АЕ методик для визначення характеристик тріщиностійкості металевих матеріалів будують криві їх залежності від наводнювання металу. Маючи встановлені в лабораторних умовах такі залежності, можна оцінити ступінь пониження характеристики тріщиностійкості матеріалу об'єкта контролю під час його діагностування методом МАЕ.

Аналіз результатів розрахунку залишкової довговічності елемента нафтопроводу помпувальної станції. Щоб виявити зародження чи розвиток тріщиноподібних дефектів у стінці трубопроводу, використовували відомі методи локації джерел АЕ [1, 3]. При цьому коефіцієнт п'єзочутливості первинного перетворювача АЕ (ПАЕ) становив $\eta = 1,6 \cdot 10^9$ V/m. Внаслідок АЕ контролю зареєстрували 3 події з амплітудами на виході ПАЕ – 3; 3,8; 5 mV. Відстань від джерела АЕ до ПАЕ – 2,8 м.

Згідно з концепцією визначення об'ємної пошкодженості матеріалу [2], встановлювали еквівалентну площу новоутворених поверхонь тріщин, які генерували АЕ, а саме – радіус r_0 еквівалентного круга, за формулою

$$u_{\max} = \delta_i \frac{\sigma_0 \Phi_i^{(d)}(\theta) r_0^2}{T_r \rho c_1^2 R_1}, \quad (5)$$

де u_{\max} – 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_1 – відстань від джерела хвилі до точки спостереження. Для цього враховували зникання амплітуди пружної хвилі АЕ [2].

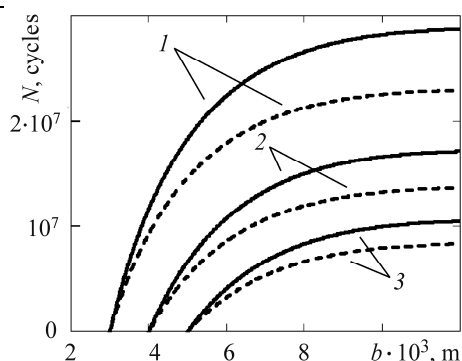
Отримали, що сумарна еквівалентна площа відповідає радіусу $r_0 \approx 10^{-4}$ м. Матеріал досліджуваної ділянки труби – сталь 16ГС. Її основні механічні характеристики такі: границя текучості σ_T – 450 МПа, нижнє порогове значення циклічної тріщиностійкості K_{th} – $3,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, циклічна тріщиностійкість K_{Ic} – $120 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

За допомогою методу МАЕ [13–15] встановлено концентрацію водню у стінці труби (3 ppm), якій відповідає експериментально визначене за допомогою методу АЕ [16] пониження тріщиностійкості K_{Ic} матеріалу труби на 20%.

Зображено (рис. 2) результати розрахунку кінетики поширення поверхневої тріщини у стінці труби нафтопроводу на основі розв'язку системи рівнянь (1) для різних значень початкової площі виявленої тріщини. Згідно з крайовою умовою (2), розрахункова залишкова довговічність N_d відповідає кількості циклів зміни внутрішнього тиску в трубопроводі, за якої піввісь b контуру поверхневої тріщини досягає товщини стінки h (рис. 2). Розраховували за таких вихідних даних: максимальний внутрішній тиск у трубопроводі $p_{\max} = 3,7 \text{ МПа}$; $R = 0,85$; $h = 0,012 \text{ м}$, $r = 0,53 \text{ м}$.

Рис. 2. Ріст втомної поверхневої тріщини за різних значень її початкового розміру: 1 – $r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $r_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м (суцільні лінії – без урахування наводнювання стінки труби, пунктирні лінії – із урахуванням).

Fig. 2. Surface fatigue crack growth curves for different crack initial size: 1 – $r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$ m; 2 – $r_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ m; 3 – $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ m (solid lines – non-hydrogenated pipe wall, dotted lines – hydrogenated).



Розрахунок показав, що тріщини із початковим радіусом поверхні $r_0 < 3 \cdot 10^{-3}$ м не розвиваються, оскільки за цих умов експлуатації нафтопроводу КІН для таких тріщин менший його порогового значення K_{th} . Отже, тріщиноподібні дефекти розміром $r_0 \approx 10^{-4}$ м, виявлені під час АЕ діагностування ділянки нафтопроводу помпувальної станції, є безпечними з точки зору втомного розтріскування за цих умов експлуатації. Однак слід зауважити, що, згідно зі законом Сівертса [5], збільшення внутрішнього тиску в трубопроводі призводить до підвищення концентрації водню на його внутрішній поверхні, а отже, і в околі вершини тріщини. Це, згідно з розрахунками (рис. 2), може стати причиною значного зменшення залишкової довговічності елемента труби нафтогазопроводу.

ВИСНОВКИ

Ефективність методики полягає у тому, що застосовуються два методи неруйнівного контролю, які мають різну фізичну природу. Їх використання дало змогу отримати необхідні параметри для розв'язку диференціальних рівнянь кінетики поширення тріщини. Цю методику можна ефективно використати під час

технічного діагностування стану реально діючих трубопроводів, які експлуатуються в умовах впливу воденьвмісних середовищ.

РЕЗЮМЕ. Предложена методика оценки остаточной долговечности наводороженного элемента трубы с трещиноподобным дефектом на его внутренней поверхности. Исследована кинетика распространения трещины с учетом влияния концентрации водорода в стенке трубопровода. Локацию трещиноподобного дефекта в стенке трубы и его начальные размеры определяли методом акустической эмиссии. Для определения концентрации водорода в металле трубопровода предложено использовать метод магнито-акустической эмиссии. Показано, что колебания внутреннего давления в нефте- или газопроводе, а также наводороживание его стенок в зависимости от начальных размеров дефекта могут спровоцировать его усталостный рост.

SUMMARY. The method of residual lifetime estimation of hydrogenated element of the pipeline with an internal surface crack was proposed. Crack growth kinetics in hydrogenated pipeline wall was investigated. Defect location and its initial sizes were determined with a help of acoustic emission method. To determine hydrogen concentration level in the pipeline wall it was proposed to use the method of magneto-acoustic emission. It was shown that pipeline internal pressure fluctuations in oil and gas pipeline and also its walls hydrogenation, depending on the initial defect size, could cause its fatigue growth.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3 т. – К.: Наук. думка, 2009. – 888 с.
2. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.
3. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідн. пос. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / З. Т. Назарчук, В. В. Кошовий, В. Р. Скальський, О. П. Бухало, Р. А. Воробель; під заг. ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фіз.-мех. ін-т, 2001. – 1134 с.
4. Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Харин В. С. Теоретический анализ роста трещин в металлах при воздействии водорода // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 4. – С. 61–75.
5. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 218 с.
6. Андрейків О.Є., Рудавський Д. В., Гембара О. В. Розрахункова модель поширення втомних тріщин у наводнених зварних з'єднаннях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – **38**, № 6. – С. 18–24.
(Andreikiv O. E., Rudavs'kyi D. V., and Gembara O. V. Computational model of propagation of fatigue cracks in hydrogenated welded joints // Materials Science. – 2002. – **38**, № 6. – P. 780–788.)
7. Андрейків А. Е., Дарчук А. И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
8. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
9. Рудавський Д. В. Оцінювання залишкової довговічності тривимірного твердого тіла із плоскою тріщиною за циклічного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 3. – С. 46–54.
10. Newman J. C. and Raju I. S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack // Int. J. Fract. Mech. – 1981. – **15**, № 1/2. – P. 185–192.
11. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Бином, 2001. – С. 363–375.
12. Скальський В. Р., Сулим Г. Т. Основи акустичних методів неруйнівного контролю. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. – 386 с.
13. Назарчук З. Т., Андрейків О. Є., Скальський В. Р. Оцінювання водневої деградації феромагнетиків у магнетному полі. – К.: Наук. думка, 2013. – 272 с.
14. Патент № 88249 Україна, МПК G01N29/14; G01N17/00. Спосіб оцінки ступеня наводнення феромагнітних сплавів / В. Р. Скальський, З. Т. Назарчук, Б. П. Клим, С. П. Почапський, В. Б. Михальчук. – Опубл. 25.09.2009; Бюл. № 18.
15. Почапський С. П. Розроблення засобів діагностування феромагнетних елементів конструкцій // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – № 26. – С. 3–10.
16. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: Сполум, 2005. – 396 с.

Одержано 25.06.2015