

значення частоти на певний приріст, який є незмінним. Це робимо для пошуку місцезнаходження мод. Наступним кроком є визначення точного значення потрібних параметрів алгоритмом поділу відрізка навпіл.

Отримані результати опису хвильового поля для пластинчастої ультразвукової хвилі можна використовувати в неруйнівному контролі для визначення таких експлуатаційних параметрів газопроводів, як товщина стінки та оцінки напружено-деформованого стану.

1. Lamb, H. On waves in an elastic plate. Proc. Roy. Soc., Vol 93 PT Series A, 1917. – P. 114-128. 2. Kolsky, H. Stress waves in solids. Dover Publications, New York, 1963. 3. Brekhovskikh, L.M., Goncharov V.

Mechanics of continua and wave dynamics. Springer-Verlag, Berlin, 1985. 4. Dewen, P.N., Lowe, M.J.S., Cawley, P. The determination of the cohesive properties of bonded joints using Lamb wave data - a feasibility study. Submitted to J. Nondestr. Eval., 1992. 5. Мандра А. А., Лютак З. П. Розробка математичної моделі поширення ультразвукових хвиль у хвилеводах // Праці ІВ МАІ № 2 (11) – 2005.- С. 147-154. 6. Malvern, L.E. Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall, New Jersey, 1969. 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 8. Timoshenko, S. (1934), Theory of Elasticity, New York, McGraw-Hill. 9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1977. – Т. 2. – 568с.

УДК 539.375

ПРОГНОЗУВАННЯ РОСТУ ВТОМНИХ ТРІЩИН В МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ НАВАНТАЖЕННЯ

© Банахевич Ю.В., Дарчук О.І., 2006

Управління магістральних газопроводів "Львівтрансгаз",
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

Проведено статистичний аналіз циклічних навантажень в трубах під зміною тиску перекачування нафти в процесі експлуатації. Досліджено ріст втомних тріщин і визначено залишковий ресурс трубопроводу в таких умовах

Наявність надійних методів оцінки небезпечності різного роду дефектів та пошкоджень в трубопроводах - необхідна передумова створення ефективних систем діагностики та контролю їх технічного стану. Це стосується і корозійно-втомних тріщин, які є однією із найпоширеніших причин руйнування трубопроводів в процесі їх експлуатації. Незважаючи на високий ступінь розвитку механіки руйнування [1], яка слугує методологічною основою для аналізу росту тріщин, практичні методи розрахунку стосовно підземних газо- та нафтопроводів ще не забезпечують бажаної точності. Насамперед це зумовлено недостатньо повним відображенням реальних умов навантаження і впливу середовища на кінетику руйнування.

В даній роботі розглянуто можливості вдосконалення методу розрахунку трубопроводів з тріщиноподібними дефектами, виходячи із отриманих безпосередньо в експлуатації даних про їх навантаження.

Магістральні газо- та нафтопроводи номінально працюють при постійному тиску

перекачування $p=p_0=const$. Проте планові і аварійні зупинки, зміна режимів перекачування, засмічування труби, утворення повітряних корків та інші причини зумовлюють короткотермінові або тривалі зміни тиску [2]. Як результат, труби піддаються дії змінного, нерегулярного малоциклового навантаження, яке і є визначальним фактором втомного руйнування матеріалу і росту в ньому тріщин.

Для моделювання реального навантаження нафтогазопроводу використані графіки неперервного запису робочих параметрів на виході із проміжної перекачувальної станції і встановлені послідовні максимальні та мінімальні значення тиску в трубі. Отримана таким чином інформація оброблена за методом повних циклів відповідно до вимог стандарту [3], виділяючи окремі цикли із загальної історії навантаження та визначаючи перепади тиску $\Delta p = p_{max} - p_{min}$, які їм відповідають. Подальший статистичний аналіз проведено згідно із відомими методами [4]. Зокрема, для кожного з інтервалів перепаду тиску Δp визначена відносна (у процентах) кількість циклів навантажень у

загальному спектрі, як представлено на гістограмі (рис. 1). Виходячи з цього встановлено також, що розподіл випадкової величини Δp близький до нормального закону і його можна описати функцією густини розподілу імовірностей у вигляді

$$f(\Delta p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_{\Delta p}} \exp\left(-\frac{(\Delta p - \mu_{\Delta p})^2}{2s_{\Delta p}^2}\right), \quad (1)$$

де середнє значення $\mu_{\Delta p} = 1,2 \text{ MPa}$, а дисперсія $s_{\Delta p} = 0,33\mu_{\Delta p}$.

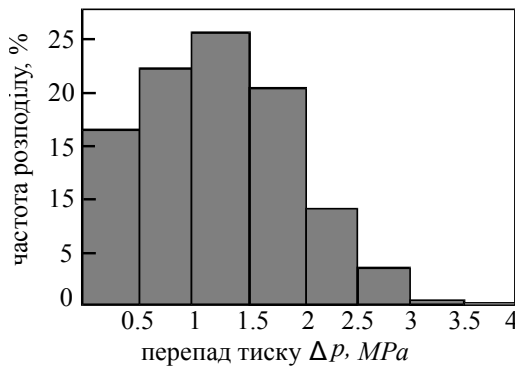


Рис. 1. Гістограма циклічних навантажень в нафтогазопроводі

Наявні дані зміни тиску в нафтогазопроводі показують, що тривалість окремих циклів змінюється у дуже широких межах. Проте вона не приймалася до уваги, оскільки в подальших розрахунках часовий фактор не враховувався. Не проведено також детального аналізу випадкової зміни асиметрії циклу зміни тиску в процесу навантаження, що впливає на швидкість росту тріщин. Натомість використана спрощена схема, згідно з якою для всіх циклів максимальна величина p_{\max} приймається рівною робочому тиску $p_{\max} = p_0$, а мінімальне значення p_{\min} визначається залежністю $p_{\min} = p_0 - \Delta p$. Таке спрощення в загальному завищує реальну асиметрію і є консервативним. Поряд із цим враховано напружено-деформований стан трубопроводу від дії не лише внутрішнього тиску, але і залишкових напружень від зварювання, температурних деформацій, поздовжніх та поперечних зусиль від переміщень труби і т.ін. Внесок вказаних додаткових факторів можна оцінити, зокрема, розрахунково-експериментальним методом, запропонованим в роботі [5].

Базуючись на традиційних підходах лінійної механіки втомного руйнування, визначатимемо швидкість росту тріщини залежно від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень у вигляді

$$v = db/dN = v(\Delta K),$$

де b – довжина (глибина) тріщини; N – число

циклів навантаження; $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$; K_{\max} , K_{\min} – максимальне та мінімальне значення коефіцієнтів інтенсивності напружень в циклі. Функція $v(\Delta K)$ описує кінетичну діаграму втомного руйнування матеріалу і встановлюється експериментально за результатами випробувань стандартних зразків з тріщинами.

Представимо функцію $v(\Delta K)$ у вигляді степеневі відомої залежності Періса [1, 6], поширивши її на весь діапазон зміни величини ΔK – від порогового ΔK_{th} , до критичного ΔK_{fc} значень:

$$v(\Delta K) = \begin{cases} C(\Delta K)^n, & \Delta K_{th} < \Delta K < \Delta K_{fc} \\ 0, & \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{cases} \quad (2)$$

Таке спрощення допустиме для практичних розрахунків, оскільки в цілому не впливає суттєво на період росту втомних тріщин.

Залежність (2) приймає більш загальну, незалежну від асиметрії циклу ($R = K_{\min}/K_{\max}$), інваріантну форму у “ефективних” координатах

$$v = C_0 (\Delta K_{eff})^n, \quad (3)$$

або, якщо перейти до змінних,

$$\Delta K_{eff} = \Delta K \cdot U(R), \quad (4)$$

де $U(R)$ – коефіцієнт закриття тріщини [7].

Подамо крім того величину ΔK у вигляді

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi b} Y(b, c_k), \quad (5)$$

враховуючи розмах напружень в циклі $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ та безрозмірну функцію $Y(b, c_k)$, яка залежить від розмірів тріщини b і конфігурації пошкодження та інших геометричних параметрів c_k .

У випадку нерегулярного, відмінного від циклічного навантаження, кінетику втомного руйнування можна описати [8], використовуючи усереднену швидкість росту тріщини для M циклів

$$v_* = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_i$$

Для умов повільного розвитку тріщин та нехтуючи взаємодією циклів з різною амплітудою, із отриманих вище залежностей слідує, що

$$\frac{db}{dN} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_0 (\Delta \sigma_i \sqrt{\pi b} Y(b, c_k) U(R_i))^n. \quad (6)$$

Це дає можливість звести рівняння кінетики руйнування під дією змінного випадкового навантаження, до традиційного у такому вигляді:

$$\frac{db}{dN} = C_0 (\Delta \sigma_* \sqrt{\pi b} Y(b, c_k))^n, \quad (7)$$

де величина $\Delta \sigma_*$ відповідає регулярному циклу навантаження, еквівалентного до заданого спектру експлуатаційних навантажень, тобто

$$(\Delta\sigma_*)^n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\Delta\sigma_i U(R_i))^n \quad (8)$$

Як у (6), так і у (8) слід враховувати лише пошкоджуючі цикли, для яких ефективний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень перевищує порогове значення $\Delta K_{th\,eff}$ [8]. Цю умову можна записати у напруженнях $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{th}$, де $\Delta\sigma_{th}$ є розв'язком трансцендентного рівняння виду

$$\Delta\sigma_{th} \sqrt{\pi b} Y(b, c_k) U(R) = \Delta K_{th\,eff}.$$

У загальному випадку, якщо спектр напружень $\Delta\sigma$ заданий через функцію густини розподілу ймовірності $f(\Delta\sigma)$, то, аналогічно (6), можна записати, що

$$(\Delta\sigma_*)^n = \int_{\Delta\sigma_n}^{\infty} (\Delta\sigma \cdot U(R(\Delta\sigma)))^n f(\Delta\sigma) d(\Delta\sigma), \quad (9)$$

враховуючи тут також, що коефіцієнт асиметрії пов'язаний з розмахом напружень $R = R(\Delta\sigma)$.

Підсумовуючи, визначимо кількість циклів навантаження N (залишковий ресурс трубопроводу) до руйнування:

$$N = \frac{1}{C_0} \int_{b_0}^b \frac{db}{(\Delta\sigma_*)^n (\sqrt{\pi b} Y(b, c_k))^n}, \quad (10)$$

де b_0 - початковий; b_c - критичний розмір дефекту.

Розглянемо як приклад розрахунку трубопровід, який працює під робочим тиском $p_0 = 4\text{ MPa}$ і має діаметр труби $2r = 1020\text{ mm}$ та товщину стінки $h = 15\text{ mm}$. Із зовнішньої поверхні труби в поздовжньому її січенні розвивається тріщина у вигляді півеліпса з постійним співвідношенням півосей $b/a = 0,2$ (рис. 2).

Оскільки відношення h/r мале, окружні напруження від тиску в стінці труби практично постійні і визначаються залежністю $\sigma = pr/h$. Зміна розмаху напружень $\Delta\sigma$ в процесі помпування, як і перепад тиску Δp (1), описується нормальним законом розподілом із середнім значенням $\mu_{\Delta\sigma} = \mu_{\Delta p} r/ha$ та дисперсією $s_{\Delta\sigma} = 0,33\mu_{\Delta\sigma}$. Коефіцієнт інтенсивності напружень у найглибшій точці контуру на тріщини задається згідно (4), причому геометрична функція отримана із [9]:

$$Y = 1,13 - 0,09(b/a) + (-0,54 + 0,89/(0,2 + b/a))(b/h)^2 + (0,5 - 1/(0,65 + b/a) + 14(1 - b/a)^{24})(b/h)^4 \times \frac{1}{\sqrt{1 + 1,464(b/a)^{1,65}}} \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

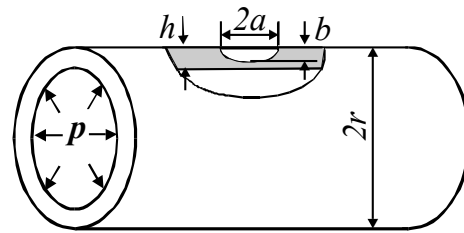


Рис. 2. Схема трубопроводу з тріщиною

Враховуючи дію постійних технологічних напружень $\sigma_0 = 140\text{ MPa}$, визначимо асиметрію циклу навантаження за співвідношенням $R(\Delta\sigma) = (p_0 r/t + \sigma_0 - \Delta\sigma)/(p_0 r/t + \sigma_0)$.

Коефіцієнт закриття тріщини вибрано аналогічно як у [7]:

$$U(R) = \Delta K_{eff} / \Delta K = 0,749 - 0,255R - 0,465R^2.$$

Для характеристик тріщиностійкості трубної сталі проведена наближена оцінка корозійного впливу ґрунту на швидкість росту втомних тріщин, виходячи із наявних в літературі експериментальних даних [10].

Результати розрахунку періоду залишкової довговічності трубопроводу до його руйнування (утворення наскрізної тріщини) наведені на рис. 3.

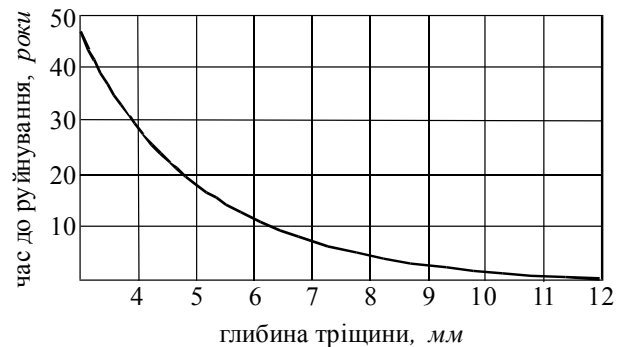


Рис. 3. Залежність залишкового ресурсу від розмірів дефекту

1. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособие в 4-х т. / Под общей ред. Панасюка В.В. - Киев: Наук. думка, 1998-1990. 2. Разработка методов повышения ресурса длительно эксплуатирующихся нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Гумеров, А.В. Росляков // Нефтяная промышленность. Сер. Транспорт и хранение нефти: Обзор. информ. - 1991. -С. 1-84. 3. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. - Введ. 01.07.83. - М.: Изд-во стандартов. -1983. - 29 с. 4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. -М.: Мир, 1989. -540 с.

5. Осадчук В.А. Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* –2003. –46, №1. –С. 88-104. 6. Андрейкив А.Е., Дарчук А.И. Усталостное разрушения и долговечность конструкций. – Киев: Наук. думка. –1992. –184 с. 7. Дарчук О.І., Драгілев А. Моделювання впливу залишкових напружень на швидкість росту втомних тріщин в зварних з'єднаннях // *Машинознавство.* –2005, № 3.

–С. 7–12. 8. Дарчук О.І. Застосування імовірнісної механіки втомного руйнування до оцінки надійності зварних конструкцій // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* –2003, №4. –С 19-26. 9. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. –Киев: Наук. думка, 1988. – 620с. 10. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных материалов. –М.: Металлургия, 1986. –294 с.

УДК 62.026.004.67

МЕТОДИКА ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТНИХ БАНДАЖІВ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРУВАННЯ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

© Копей Б.В., Найда А.М., 2006,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

© Розгонюк В.В., 2006

Представництво ТзОВ “Газекспорт” в Україні (м.Київ),

© Ройзман В.П., Горошко А.В., 2006,

Хмельницький національний університет “Поділля”

Розглянуто засоби та методи підготовки тензометрування сталевих трубопроводів з склотканинним бандажем і визначення початку руйнівних процесів методом акустичної емісії. Крім цього, певна увага приділена препаруванню тензодатчиками досліджуваної труби, підготовці тензоапаратури і акусто-емісійної апаратури з метою оцінки міцності бандажа та зміцненої ним труби

У нафтогазовидобувній промисловості широко використовують металеві трубопроводи. У процесі їх експлуатації за певних технологічних умов навантаження поява і злиття мікротріщин у трубі може призвести до її руйнування та виникнення аварійної ситуації. Для захисту металевих трубопроводів від негативних чинників (зокрема, низької корозійної стійкості) та підвищення характеристик міцності розробляють різні методи. Серед них ефективним способом є нанесення на зовнішню чи внутрішню поверхню труби покриття захисного шару із полімерного композитного матеріалу [1,2].

В роботі розглядається спосіб оцінки міцності і надійності сталевих труб з бандажем при дії внутрішнього тиску. Технологія підсилення полягає у нанесенні на зовнішню поверхню труби (у разі пошкодженості матеріалу тріщинами чи виразками) зміцнювального шару – композитного бандажу. Цей шар формується за спеціально розробленою технологією із тканого композиту (склопластика) і виконує функцію зміцнення сталеві труби.

Місцезнаходження та рівень пошкодженості сталеві труби і бандажа встановлюється за експериментальною методикою.

Оцінку експлуатаційної міцності металеві труби з пошкодженістю та нанесеним композитним бандажем виконували тензометруванням та методом АЕ (акустичної емісії).

Об'єктом дослідження була сталева труба довжиною 390 мм, зовнішнім діаметром 89мм і товщиною стінки 4 мм.

З обох кінців до труби були приварені шарові заглушки. В одній із них був вмонтований штуцер, через який здійснювали нагнітання в трубу рідини і створювали необхідний тиск.

При підготовці до проведення випробувань було вирішено розташувати вздовж зразка 7 штук тензодатчиків КФ 5П1-10-200-Б-12 (рис.1) та стільки ж вздовж з протилежного боку для дублювання та підвищення точності вимірювань таким чином, щоб крайні датчики розташовувались поблизу торців сталеві труби на відстані 15 мм, а решта були рівновіддаленими один від одного на