

# НАФТОГАЗОПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ

УДК 620.191.33:620.194.8

## ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРУ РОЗВИТКУ ТРИЩИНОПОДІБНИХ ДЕФЕКТІВ У СТІНКАХ НАФТОПРОВОДУ

<sup>1</sup>Р.С.Грабовський, <sup>2</sup>Я.Т.Федорович, <sup>1</sup>В.С.Лужецький, <sup>3</sup>М.М.Кулик

<sup>1</sup>ДДПУ, 82100, Львівська обл., м. Дрогобич, вул. Стрийська, 3, тел. (0324) 438935,  
e-mail: ipf@drohobych.net

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 242353  
e-mail: no@nung.edu.ua

<sup>3</sup>ФМІ НАНУ, 79601, м. Львів, вул. Наукова, 5 тел. (0322) 631400  
e-mail: dmtr@ipm.lviv.ua

*Произведена числовая оценка кинетики и изменения формы трещиноподобных дефектов при их развитии в стенке трубы магистрального нефтепровода. Показано влияние формы начального трещиноподобного дефекта и его начальной глубины на долговечность трубопровода.*

*The numerical assessment of kinetics and shape variables of crack-like defects during their propagation in tube wall of trunk oil-pipeline is proposed. An influence of the initial shape and initial depth of crack-like defect on pipeline's lifetime has been shown.*

Забезпечення надійності магістральних нафтопроводів, які експлуатуються тривалий час, є в Україні актуальною проблемою [1]. Надійна робота трубопровідних систем залежить від експлуатаційних чинників.

По-перше, характерною особливістю магістральних нафтопроводів, що в кінцевому випадку створює аварійні ситуації, є нестабільний процес протікання нафти. Тиск і витрата нафти змінюються по довжині трубопроводу внаслідок несанкціонованого відбору, включення і виключення насосних агрегатів [2], перекриття замочних пристроїв, зміни в'язкості перекачаного продукту при послідовному перекачуванні, появи аварійних витоків нафти і т.д. [3]. Так, наприклад, в процесі перекачування нафти і нафтопродуктів по схемі „з насоса в насос” при відключенні насосних агрегатів на одній із станцій в трубопроводі виникають хвилі підвищення і зниження тиску, які досягають сусідніх станцій [4].

По-друге, досвід тривалої експлуатації магістральних нафтопроводів свідчить, що значний відсоток пошкоджень пов'язаний із виникненням в стінках основного металу та зварних швах експлуатаційних корозійних виразок, тріщин та інших дефектів, подальший розвиток яких призводить до руйнування окремих елементів чи конструкції загалом [5, 6].

Причини руйнування магістральних трубопроводів можна згрупувати таким чином [4]:

- наскрізні локальні корозійні пошкодження (свищі);
- розриви монтажних кільцевих стиків, що виконані безпосередньо на трубопроводі;
- розриви заводських стиків;
- розриви труб по основному (цілому) металу на відстані від зварних швів.

Довговічність магістральних нафтопроводів визначається закономірностями розвитку в них дефектів тріщиноподібного типу в умовах сумісної дії робочих середовищ та експлуатаційних циклічних навантажень. Розвиток таких дефектів у елементі конструкції представляють у вигляді діаграм циклічної тріщиностійкості [5], які є залежностями швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$ . Ці діаграми розміщуються між двома його граничними значеннями: нижнім пороговим значенням  $K_{Ib}$ , що відповідає значенню  $K_I$ , при якому не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини; і верхнім  $K_{Ic}$ , що відповідає значенню  $K_I$ , при якому настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Продовження терміну служби і забезпечення надійної експлуатації магістральних трубопроводів вимагає розробки відповідних методів технічної діагностики [7] та оцінки кри-

тичних експлуатаційних дефектів. В роботі, на прикладі однієї з ділянок магістрального нафтопроводу „Дружба”, запропонована методика чисельної оцінки кінетики та зміни форми тріщиноподібних дефектів при їх розвитку в стінці труби, що дає змогу прогнозувати особливості їх руйнування в експлуатаційних умовах.

### 1. Методика та послідовність розрахунку кінетики та зміни форми тріщиноподібних дефектів

Об’єктом розгляду є труба (рис. 1) з внутрішнім діаметром  $d$  та товщиною стінки  $t$ , яка містить тріщиноподібний дефект, розташований паралельно її осі. При цьому в основу чисельної оцінки кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів у стінці труби покладено такі припущення [8]:

1. Тріщиноподібний дефект у стінці трубопроводу має напівеліптичну форму з розмірами півосей  $c$  та  $a$  (рис. 1).

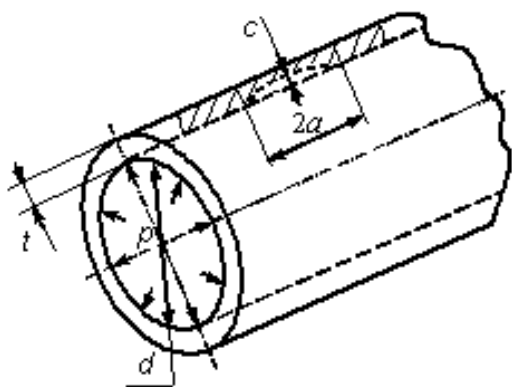


Рисунок 1 – Схематичне представлення дефекту в стінці труби

2. Початок розвитку дефекту за втомним механізмом настає при досягненні у будь-якій точці його контура граничної величини коефіцієнта інтенсивності напружень, тобто при  $\Delta K_I = K_{th}$ .

3. Тріщиноподібний дефект поширюється при зростанні числа циклів навантаження  $N$ , зберігаючи при цьому напівеліптичну форму з величиною співвідношення півосей  $c$  та  $a$

$$c/a = f(C_m, N), \quad (1)$$

а кінетика його росту залежить від системи „матеріал–середовище”, яка характеризується деякими сталими  $C_m$ .

4. Процес поширення тріщини як у напрямку півосі  $c$ , так і у напрямку півосей  $a$  повністю визначається відповідною діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу, яка аналітично описується за допомогою степеневі залежності Паріса [9]

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (2)$$

де  $C$  та  $n$  – константи системи „матеріал–середовище”.

Значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_I$  обчислювалося за залежністю [10]

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi c} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1,12 - 0,48\beta + 0,13 \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 \cdot \beta(3\beta - 2 - \alpha)}{1 - \alpha(1 - 0,75\beta)} + 1,13k_f \left[ \beta \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^2 \cdot (\alpha - 0,4 + 0,6\beta) + \beta(1 - 1,4\alpha) + 0,62\lambda(1 - \beta) \cdot \psi(\alpha) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1; & \alpha \geq 1/20, \\ 1,15 - 60(\alpha)^2; & 0 \leq \alpha \leq 1/20 \end{cases}$$

$$\psi(\alpha) = (\alpha)^{-1/2} \cdot \sqrt{(1 - \alpha)^{-3} - (1 - \alpha)^3},$$

де:  $\Delta \sigma$  – розмах розтягувальних напружень за цикл навантаження,  $\Delta \sigma = (\Delta p \cdot d)/2t$ ,  $\Delta p$  – зміна тиску робочого середовища у трубопроводі за цикл навантаження;  $d$  – внутрішній діаметр труби;  $t$  – товщина стінки труби;  $c$  – глибина тріщини;  $\alpha = c/t$ ;  $\beta = c/a$ ; ( $0 \leq \beta \leq 1$ ;  $0 \leq \alpha \leq 0,4$ );  $a$  – півдовжина тріщини;  $\theta$  – кут від малої осі напівеліптичної тріщини (рис. 1);  $k_f$  – коефіцієнт, що враховує відхилення поперечного перерізу труби від колового.

При розрахунку кінетики розвитку тріщини за базу було вибрано її розвиток углиб стінки, тобто у напрямку півосі  $c$ , причому початковий розмір (глибина) тріщини становить  $c_0 = 0,5$  мм.

Розрахунок проводився із припущення, що тріщина розвивається стрибкоподібно з деяким постійним кроком  $\Delta c_i = 0,25$  мм. При розрахунку діапазон зміни глибини тріщини становив  $c_{th} \leq c \leq 0,8t$  [6], де  $t$  – товщина стінки труби.

За результатами обчислень визначалися критичні розміри напівеліптичної тріщини  $(c/a)_*$  та число циклів навантаження до досягнення руйнування  $(N^{\sigma*})$  залежно від її початкової форми  $(c/a)_0$ , а також вивчали експлуатаційні можливості труби залежно від початкової глибини  $c_0$  тріщиноподібного дефекту.

### 2. Результати досліджень та їх обговорення

Розрахунки проведені для нафтопроводу „Дружба” ( $d = 510$  мм,  $t = 10$  мм) при максимальному тиску  $p_{max} \approx 4,1$  МПа та коефіцієнті асиметрії циклу навантаження  $R \approx 0,9$ , що призводить до пульсацій тиску  $\Delta p \approx 0,41$  МПа. Труби виготовлені зі сталі 13ГС ( $\sigma_{0,2} = 380$  МПа). Діаграми циклічної тріщиностійкості сталі 13ГС на повітрі одержано експериментально при випробуваннях зразків, виготовлених з фрагменту труби перерізом  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup> на чистий згин. Частота циклічного навантаження синусоїдальної форми становила 1 Гц. У таблиці 1 наведено значення констант степеневі залежності (2), яка аналітично описує відповідну діаграму циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу при випробуваннях на повітрі.

Були розглянуті два найбільш характерні випадки форми початкових тріщин, які виявляються методами неруйнівного контролю при діагностичному огляді трубопроводів та підтвер-

Таблиця 1 – Значення констант у степеневій залежності (2)

Система “матеріал-середовище”	$C$	$n$
Новий метал – повітря	$1,00 \cdot 10^{-11}$	4,93

джені теоретичними розрахунками [11]: перший – при  $(c/a)_0=1/20$ , що відповідає корозійному пошкодженню типу риски; другий – при  $(c/a)_0=1/3$ , що відтворює тріщиноподібний дефект у вигляді корозійної виразки.

На основі наведеної вище методики розрахунку кінетики та зміни форми тріщиноподібних дефектів були одержані відповідні дані щодо зміни форми тріщини при її розвитку у глибину стінки труби. Вони представлені у вигляді графічних залежностей відношення  $c/a$  від числа циклів навантаження  $N$  (рис. 2). Вертикальні ділянки на кривих відображають процес прискореного розвитку тріщини, що призводить до катастрофічного руйнування труби. Час досягнення цього стану характеризується числом циклів навантаження  $N_*$  (див. табл. 2).

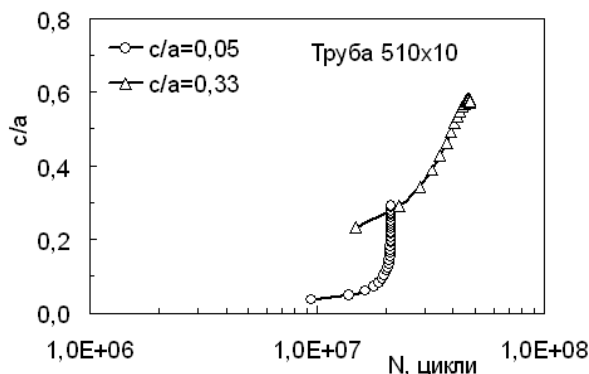


Рисунок 2 – Зміна форми тріщини від числа циклів навантаження  $N$  в стінці нової труби при випробуваннях на повітрі

Таблиця 2 – Значення параметрів  $N_*$  та  $(c/a)_*$

$(c/a)_*=1/20$		$(c/a)_*=1/3$	
$N_*$ , цикли	$(c/a)_*$	$N_*$ , цикли	$(c/a)_*$
$4,73 \cdot 10^7$	0,292	$2,12 \cdot 10^7$	0,578

Представлені результати вказують, що форма початкового дефекту, розміщеного на внутрішній поверхні труби, суттєво впливає на критичне число циклів навантаження  $N_*$ . Тобто експлуатаційні можливості труби, що містить дефект у вигляді риски ( $(c/a)_0=1/20$ ) в 2,2 рази менші від аналогічної труби з дефектом у вигляді виразки ( $(c/a)_0=1/3$ ).

Залежно від форми початкового дефекту, що визначається відношенням  $(c/a)_0$ , подальші стадії розвитку тріщини в стінці труби мають свої особливості. Розглянемо їх більш детально (рис. 3).

Для початкового дефекту, що відповідає пошкодженню типу риски  $(c/a)_0=1/20$  (рис. 3),

розвиток тріщини характеризується стійким однотипним та стабільним поширенням як в глибину, так і вздовж твірної труби аж до її кінцевого руйнування. Розрахункова критична ширина тріщини ( $2a_*$ ) в новій трубі є рівною 54,9 мм, а співвідношення руйнівного розміру напівеліптичної тріщини до товщини стінки труби ( $2a_*/0,8t$ ) в даному випадку складає 6,9 рази.

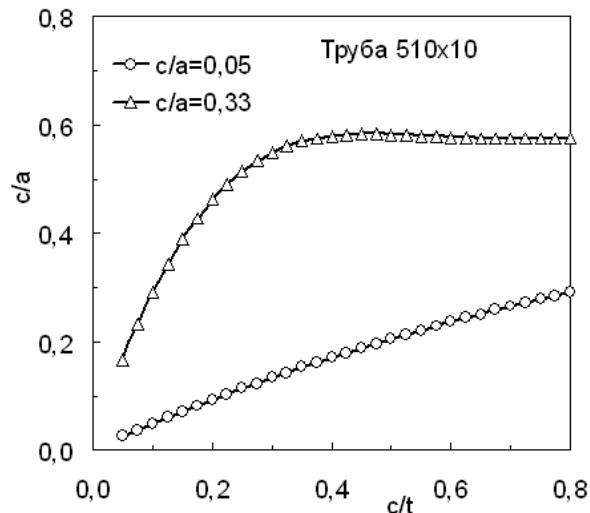


Рисунок 3 – Зміна форми тріщини при її розвитку по глибині стінки нової труби при випробуваннях на повітрі

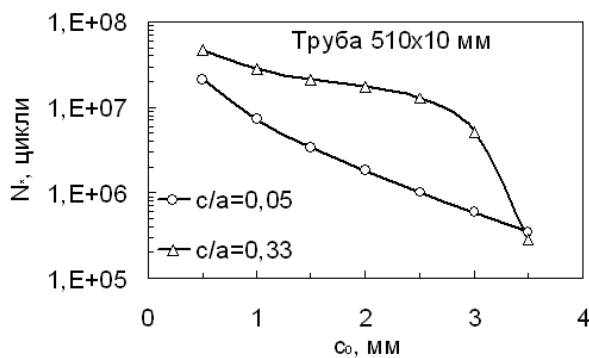
У випадку початкового дефекту, що моделює виразку  $(c/a)_0=1/3$  (рис. 3), розвиток тріщини в стінках нової труби в інертному середовищі (повітря) характеризується двома етапами.

На першому етапі ( $0,05 \leq c/t \leq 0,3$ ) відбувається переважаючий розвиток тріщини в глибину стінки труби (вісь  $c$ ). Другий етап ( $0,3 \leq c/t \leq 0,8$ ) характерний стабільним розвитком тріщини як в глибину (вісь  $c$ ), так і в ширину (вздовж твірної) труби (вісь  $a$ ) аж до її кінцевого руйнування.

Розрахункова критична ширина тріщини ( $2a_*$ ) в новій трубі є рівною 27,7 мм, а співвідношення руйнівного розміру напівеліптичної тріщини до товщини стінки труби ( $2a_*/0,8t$ ) в даному випадку складає 3,5 рази.

Аналіз розглянутих вище випадків показує, що початкова форма дефекту, розміщеного на внутрішній поверхні труби, суттєво впливає на тривалість її експлуатації (в 2,2 рази). Крім того, розрахункова критична ширина тріщини ( $2a_*$ ) для труби з початковим дефектом  $(c/a)_0=1/20$  удвічі більша, ніж для аналогічної труби з початковим дефектом  $(c/a)_0=1/3$ .

Слід зауважити, що крім початкової форми дефекту  $(c/a)_0$  розміщеного на внутрішній поверхні труби, його початкова глибина  $c_0$  також суттєво впливає на її експлуатаційні можливості. На рис. 4 представлено графічні залежності зміни критичного числа циклів навантаження  $N_*$  від початкової глибини тріщиноподібного дефекту  $c_0$ .



**Рисунок 4 – Зміна критичного числа циклів навантаження  $N^*$  від початкової глибини дефекту  $c_0$  наявного на внутрішній стінці нової труби при випробовуваннях на повітрі**

Їх аналіз свідчить, що збільшення початкової глибини тріщиноподібного дефекту у формі риски ( $(c/a)_0=1/20$ ) значно зменшує експлуатаційні можливості труби.

**Висновки**

Одержані результати засвідчили такі тенденції кінетики розвитку втомних тріщин в стінках труби магістрального нафтопроводу.

1. Довговічність нової труби із наявним тріщиноподібним дефектом у вигляді риски ( $(c/a)_0=1/20$ ) в 2,2 рази менша за тривалість експлуатації аналогічної труби з наявним дефектом у вигляді виразки ( $(c/a)_0=1/3$ ).

2. У випадку руйнування нової труби із наявним тріщиноподібним дефектом у вигляді риски ( $(c/a)_0=1/20$ ) очікуваний розрив удвічі більший ніж у випадку з аналогічною трубою з наявним дефектом у вигляді виразки ( $(c/a)_0=1/3$ ).

Початкова глибина тріщиноподібного дефекту  $c_0$  та його початкова форма  $(c/a)_0$  суттєво впливають на експлуатаційні можливості труби.

**Література**

1 Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В.Панасюка. — Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАНУ, 2004. — 912 с.

2 Зайцев Л.Ф. Регулирование режимов работы магистральных нефтепроводов. — М.: Недра, 1982. — 240 с.

3 Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л. Методы защиты нефтепроводов от разрывов при неустановившихся режимах. — М.: ВНИИОЭНГ, 1976. — 40 с.

4 Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа. — М.: Наука, 1982. — 207 с.

5 Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие в 4-х т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. — К.: Наук. думка, 1988–1990. — 352 с.

6 Panasyuk V.V. Strength and fracture of solids with cracks. — Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute National Academy of Sciences of Ukraine, 2002. — 468 p.

7 Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 368 с.

8 Грабовський Р.С., Лужецький В.С., Горб'як Т.М. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів // *Машинознавство*. — 2005. — № 4. — С. 7-10.

9 Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // *Trans. ASME, J. Basic Engng.* — 1963. — 15, № 4. — P. 528–534.

10 Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАНУ, 1999. — 341 с.

11 Фартушок І.М., Касій О.Т., Матієчко О.В. До оцінки потенційно небезпечних розмірів тріщиноподібних корозійно-механічних дефектів в трубопроводах // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2006. — Спец. вип. — № 5. — С. 321-324.