

ОЦІНКА УМОВ РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВІДІВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

¹Р.С. Грабовський, ¹О.М. Лепак, ¹М.П. Мазур, ¹І.Я. Федорович, ²Р.А. Барна

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 507626,
e-mail: hrabovskyy.r@gmail.com

²Фізико-механічний інститут НАН України, 79601, м. Львів, вул. Наукова, 5,
тел. (0322) 631400, e-mail: barna@ipm.lviv.ua

Для тривало експлуатованих сталей магістральних нафтогазопроводів на основі методики аналітично-числової оцінки кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів у процесі їх розвитку в стінці труби обчислено руйнівні розміри напівеліптичної тріщини ($2a^*$). Запропоновано методику визначення дослідним шляхом критичної тріщиностійкості J_{Ic} трубопровідних сталей на основі експериментально одержаної діаграми руйнування зразків "зусилля-прогин". Обчислено за критерієм тріщиностійкості розміри наскрізних критичних тріщин $2a_c$ та оцінено початкові розміри і форму тріщиноподібних дефектів для досліджуваних магістральних нафтогазопроводів. Одержані дані можуть слугувати базою для інтерпретації виявлених у процесі технічного діагностування тріщиноподібних дефектів.

Ключові слова: магістральні трубопроводи, руйнівні розміри напівеліптичної тріщини, наскрізна критична тріщина, критична тріщиностійкість, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, діаграма "зусилля-прогин".

Для длительно эксплуатируемых сталей магистральных нефтегазопроводов на основании методики аналитически-числовой оценки кинетики и изменения формы коррозионно-механических трещиноподобных дефектов в процессе их развития в стенке трубы вычислены разрушительные размеры полуэллиптических трещины ($2a^*$). Предложена методика определения опытным путем критической трещиностойкости J_{Ic} трубопроводных сталей, на основании экспериментально полученной диаграммы разрушения образцов "усилие-прогиб". Вычислено по критерию трещиностойкости размеры сквозных критических трещин $2a_c$ и оценены начальные размеры и форма трещиноподобных дефектов для исследуемых магистральных нефтегазопроводов. Полученные данные могут служить базой для интерпретации выявленных в процессе технического диагностирования трещиноподобных дефектов.

Ключевые слова: магистральные трубопроводи, разрушительные размеры полуэллиптических трещины, сквозная критическая трещина, критическая трещиностойкость, критический коэффициент интенсивности напряжений, диаграмма "усилие-прогиб".

For long-term operation of main oil and gas pipeline steels using the technique of analytical and numerical evaluation of kinetics and changing in the shape of corrosion and mechanical crack-like defects in the process of their development in the wall of the pipe, the destructible sizes of semi-elliptical cracks ($2a^*$) were calculated. The technique of deterring the critical crack growth resistance J_{Ic} of pipeline steels by investigation using experimentally obtained diagram of "force-deflection" samples destruction was suggested. The sizes of through critical cracks $2a_c$ were calculated and the initial sizes and the shape of crack-like defects for the investigated main gas and oil pipelines were evaluated. The obtained data can serve as a basis for interpretation of the detected crack-like defects during technical diagnosis.

Key words: main pipelines, destructive sizes of semi-elliptical crack, through critical crack, critical crack growth resistance, stress intensity critical factor, "force-deflection" diagram.

Вступ

Забезпечення надійності магістральних трубопроводів, які експлуатуються тривалий час, є актуальною проблемою [1, 2].

У процесі транспортування нафти на лінійних ділянках магістральних нафтопроводів обсяг утрат складає 0,5% від загального обсягу продукту [3]. Основною причиною цих утрат є систематичні аварійні ситуації, які призводять до порушення режиму роботи магістральних нафтопроводів, до виникнення витоків нафти, а також створюють небезпеку для людей та об'єктів, що розміщені поблизу траси [4, 5, 6]. Так, наприклад, 2 грудня 2009 року в Становлянському районі Липецької області (Росія) стався розрив труби (рис. 1) на нафтопроводі "Дружба-1", у результаті якого розлилося бли-

зько 200 тонн нафти [7]. Крім того, збільшення обсягів транспортованих продуктів шляхом розширення діаметра та експлуатаційного тиску в трубі у разі виникнення аварії призводить до істотного забруднення навколишнього середовища в результаті викиду великого обсягу нафтопродуктів.

Аварії магістральних газопроводів часто супроводжуються вибухами та пожежами, а фрагменти трубопроводу опиняються розкритими і викинутими на декілька десятків метрів від місця розриву. Збитки, пов'язані з такими аваріями, складаються з витрат, пов'язаних з утратою газу, вартості ремонтно-відновних робіт, а також унаслідок втрат від недопостачання газу споживачам. Останні можуть бути найбільш суттєвими оскільки магістральні газопро-



Рисунок 1 – Повздовжній розрив труби діаметром 530 мм магістрального нафтопроводу “Дружба” [7]

води проходять, як правило, в районах, віддалених від населених пунктів, а це збільшує терміни ремонту пошкоджених ділянок [5, 6].

Аналіз масштабних аварій, які виникали на магістральних газопроводах України у 2003–2007 роках, засвідчив, що характерною причиною таких руйнувань було утворення тріщиноподібних дефектів довжиною 0,6 – 3,0 м та глибиною 6 – 12 мм за механізмом корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) внаслідок пошкодження захисного покриття труб, високої корозійної активності ґрунтів та порушення режимів електрохімічного захисту на аварійних ділянках траси [1, 9, 10].

Так, у квітні 2003 р. на магістральному газопроводі “Уренгой–Помари–Ужгород” (ділянка КС “Ставище” – КС “Іллінці”) діаметром 1420 мм стався розрив газопроводу. Згідно з висновком Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона руйнування магістрального газопроводу відбулося внаслідок корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) металу труби, яке сталося вперше в практиці експлуатації газопроводів в Україні. Причиною руйнування була тріщина глибиною 8 мм та довжиною 650 мм. Для відновлення магістрального газопроводу було замінено понад 80 м труби [1, 9, 10].

Незважаючи на проведені значні комплексні обстеження, на магістральному газопроводі “Уренгой–Помари–Ужгород” у травні 2007 р. у районі КС “Ставище” внаслідок корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) металу труби сталася аварія з розривом трубопроводу. У цьому випадку причиною руйнування була тріщина глибиною 6,8 мм та довжиною 470 мм. Причиною аналогічної аварії, що трапилася у грудні 2007 р. в районі КС “Іллінці” (рис. 2), була тріщина глибиною 11,8 мм та довжиною 600 мм [9, 10].

Також суттєвим виявився вплив добових коливань робочого тиску в газопроводах, що у поєднанні з дією експлуатаційного середовища спричиняв появу та розвиток тріщиноподібних дефектів у стінках труб за механізмом корозійної втоми [11]. Утворення втомних тріщин після



Рисунок 2 – Характерний приклад катастрофічного руйнування труби діаметром 1420 мм магістрального газопроводу “Уренгой–Помари–Ужгород” (2007 р. біля КС “Іллінці”)

15 років експлуатації другої нитки магістрального газопроводу на 383 км “Краснодарський край – Серпухов” у 1999 р. (спіральні труби діаметром 1020×10,5 мм) також виникло через значне коливання робочого тиску (від 3,62 до 5,07 МПа) протягом двох місяців [12]. Аналогічна причина руйнування (сліди втомних тріщин на поверхні руйнування) була відзначена під час аварії на магістральному газопроводі “Новопсков–Аксаї–Моздок” у 1996 р. (труби діаметром 1220×15,4 мм з поздовжнім швом) після 13 років експлуатації [12].

Одночасна дія у процесі тривалої експлуатації на магістральні газопроводи статичних, циклічних та динамічних навантажень і вплив корозійного середовища [3, 11, 12] спричиняє зародження та розвиток тріщиноподібних дефектів і корозійно-втомних тріщин, які, досягаючи критичних розмірів, призводять до їх руйнування [12].

Причини аварійних ситуацій, що виникають на магістральних трубопроводах внаслідок дії експлуатаційних чинників (статичних, циклічних та динамічних навантажень, а також корозивних середовищ), можна згрупувати таким чином [6, 10]:

- наскрізні локальні корозійні пошкодження (виразки, свищі);
- розриви труб, пов’язані з утворенням та розвитком до критичних розмірів корозійно-втомних тріщин як у базовому металі так і в металі зони термічного впливу зварного шва труби.

З метою уникнення аварійних ситуацій, а також їх попередження широко використовують сучасні методи діагностики та визначення технічного стану трубопроводних систем [13–17], які створюють основу для прогнозування залишкового ресурсу експлуатованих трубопроводів – тривалості експлуатації від моменту контролю технічного стану до досягнення гранично-рівноважного стану дефектної труби [3]. Одержані таким чином розрахункові оцінки залишкової довговічності дефектних трубопроводів не тільки попереджують аварійні ситуації

ції, але й уможливають їх розгляд як систему управління процесом експлуатації, технічного обслуговування і капітального ремонту магістральних трубопроводів [15, 18].

Згаді вище методики оцінювання міцності дефектних трубопроводів ґрунтуються на гранично-рівноважному стані трубопроводу з дефектами відповідного типу (корозійні виразки або тріщини). Використовуючи такі методики, можна достовірно спрогнозувати й оцінити умови катастрофічного руйнування дефектної труби. Однак вони не розглядають процес розвитку тріщиноподібних дефектів, який призводить до досягнення цього граничного стану.

Аналіз аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації трубопроводів, засвідчує можливість реалізації двох сценаріїв [1]. У першому випадку спостерігається розгерметизація труби, другий випадок характеризується катастрофічним (лавинним) руйнуванням трубопроводу, яке інколи сягає декількох кілометрів [1, 5]. Визначальною умовою реалізації одного з двох сценаріїв є критичний розмір наскрізного тріщиноподібного дефекту, який залежить від багатьох факторів (низька температура транспортованого продукту, наявність залишкових напружень, термічне та деформаційне старіння, характер зовнішнього середовища тощо).

У зв'язку з цим, визначення критичних розмірів наскрізних тріщиноподібних дефектів та прогнозування умов неконтрольованого руйнування дефектних труб магістральних нафтогазопроводів є актуальною науково-технічною проблемою.

Метою даної роботи є оцінка умов руйнування магістральних трубопроводів тривалої експлуатації, що ґрунтується на підходах механіки руйнування.

Методика оцінювання умов руйнування експлуатованих трубопроводів

Відомо [19], що процесу руйнування металу трубопроводу притаманна певна стадійність, яка визначається впливом як робочих корозійних середовищ, так і тривалих механічних навантажень. На першій стадії на поверхні металу труби наявні технологічні (риски) або утворені корозійні (пітинги, виразки) дефекти (рис. 3, а) переростають у макротріщину з пороговим розміром c_{th} внаслідок електрохімічної корозії, активованій механічними напруженнями, рівень яких у вершині корозійної тріщини, у кінці першої стадії, досягає порогового значення коефіцієнта інтенсивності навантажень K_{th} .

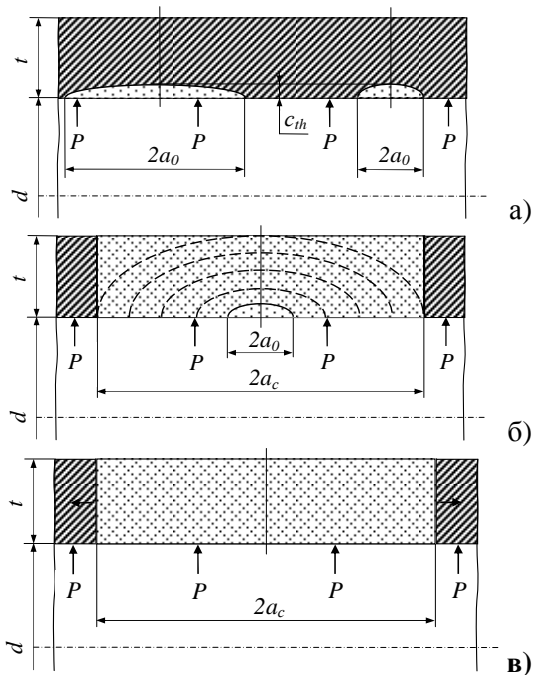
На другій стадії (рис. 3, б), при домінуючій участі механічного фактору, відбувається поширення макротріщини під впливом діючих у трубі циклічних навантажень K_I , які змінюються в діапазоні $K_{th} \leq K_I < K_{fc}$, до критичних розмірів $2a_c$. Слід зауважити, що довговічність трубопровідних систем різноманітного призначення визначається закономірностями розвитку тріщин під впливом втомних навантажень [20], які представляють у вигляді діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості, що є залежностями швидкості росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I . Такі діаграми розміщені по осі абсцис між двома його граничними значеннями: нижнім пороговим значенням K_{th} , яке відповідає значенню K_I , за якого не відбувається ріст втомної тріщини, і верхнім K_{fc} , яке відповідає значенню K_I , за якого настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини. Вони визначаються експериментальним шляхом, мають вигляд S-подібної кривої і складаються з трьох ділянок: низько- та високоамплітудної, де невеликі зміни величини коефіцієнта інтенсивності напружень викликають значне збільшення швидкості росту тріщини, а також середньоамплітудної, яка аналітично описується залежністю Паріса [21]:

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K_I)^n, \quad (1)$$

де C, n – експериментально визначені характеристики матеріалу, які залежать від його властивостей і умов випробувань;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень циклу;

K_{max} і K_{min} – відповідно найбільше і найменше значення коефіцієнта інтенсивності напружень циклу. Друга стадія завершується утворенням наскрізної тріщини в стінці труби (свища), тобто відбувається прорив труби.



а – формування порогових тріщин з розмірами півосей c_{th} та a_0 ; б – розвиток порогової тріщини до критичних розмірів $2a_c$; в – неконтрольований розвиток тріщини вздовж твірної труби (напрямок поширення вказаний стрілкою)

Рисунок 3 – Схематичне представлення стадійності руйнування трубопроводу

Слід зауважити, що викладені вище положення ґрунтуються на фізичному припущенні, що розміри пластично деформованої ділянки матеріалу в околі вершини тріщини є малими в порівнянні з розмірами тріщини та тіла. Дане припущення справджується за умови, згідно якої розмір пластичної зони в напрямку розвитку тріщини буде в 10...15 разів меншим порівняно з довжиною тріщини і відстанню її вершини від межі тіла [20], тобто:

$$l, b-l \geq (1,5 \dots 2,5) \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2. \quad (2)$$

Третя стадія (рис. 3, в) характеризується за певних умов [5, 22, 23] катастрофічним (неконтрольованим) поширенням тріщини вздовж твірної труби. Тут виникає принципово інша ситуація, яку вперше вивчив Гріфітс на початку 20-х років минулого століття [24]. В середині ХХ століття Дж. Ірвіном запропонував силовий підхід до вивчення початку поширення тріщин у деформованому тілі, який для тріщин нормального відриву полягає в тому, що коефіцієнт інтенсивності напружень K_I у околі вершини тріщини в момент її локального росту при квазістатичному збільшенні навантаження вважався рівним деякій константі матеріалу K_{Ic} , яка характеризує опір матеріалу поширенню у ньому тріщини за плоскодеформованого стану. У цьому випадку реалізується силовий критерій руйнування: тріщина починає рости, якщо коефіцієнт інтенсивності напружень K_I досягає критичної величини K_{Ic} , тобто

$$K_{I*} = K_{Ic}. \quad (3)$$

Оцінюючи цілісність трубопроводу з наскрізною тріщиною, слід однак мати на увазі, що при переході від плоскої деформації до плоского напруженого стану, умови реалізації якого більш ймовірні у процесі експлуатації трубопроводів, початок розповсюдження наскрізної тріщини у стінці труби необхідно оцінювати за енергетичним [25] критерієм руйнування: тріщина починає рости, якщо інтенсивність енергії J , що звільнилася, досягає критичної величини J_c .

$$J_* = J_c. \quad (4)$$

Враховуючи стадійність процесу руйнування металу трубопроводу, умови руйнування експлуатованих трубопроводів оцінювали у два етапи.

Використовуючи методику [26] аналітично-числового оцінювання кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів у процесі їх розвитку в стінці труби, яка дає змогу прогнозувати особливості її руйнування в експлуатаційних умовах, розраховували траєкторії розвитку втомної тріщини у стінках труб магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” та магістрального нафтопроводу “Дружба” залежно від початкових розмірів $(c/a)_0$ наявних технологічних (риски) або експлуатаційних (пітинги, виразки) дефектів і обчислили руйнівні розміри напівеліптичної тріщини $(c/a)^*$.

Руйнівними ($2a^*$) вважали розміри, в перерізах яких для дефектних труб магістральних газопроводу “Київ–Західна Україна” та нафтопроводу “Дружба” виникає стан пластичного колапсу, який настає у випадку, коли робочий тиск у досліджуваних трубопроводах досягає руйнівних значень, тобто виконується умова $p_{\max} = p_f = 5,4$ МПа та $p_{\max} = p_f = 4,1$ МПа відповідно.

Досліджували експлуатований 41 рік за максимального робочого тиску газу $p_{\max} = 5,4$ МПа метал (сталь 17Г1С, $\sigma_B = 562,5$ МПа, $\sigma_{0,2} = 357,5$ МПа, $\delta = 27,0\%$) магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” та експлуатований 47 років за максимального тиску нафти $p_{\max} = 4,1$ МПа метал (сталь 10Г2БТЮЗ, $\sigma_B = 584,7$ МПа, $\sigma_{0,2} = 451,3$ МПа, $\delta = 24,8\%$ магістрального нафтопроводу “Дружба”.

Випробування проводили як на повітрі так і в корозивному середовищі (pH 6,7) NS4 (0,483 NaHCO₃ g/l; 0,120 KCl; 0,137 CaCl₂; 0,131 MgCl₂·H₂O), яке слугувало моделлю ґрунтової води [27]. Температура досліджуваних середовищ була постійною $T = 20^\circ C$.

У таблиці 2 наведено значення констант степеневі залежності 1, що аналітично описує відповідні діаграми циклічної тріщиностійкості металу нафтогазопроводів.



Рисунок 4 – Загальний вигляд досліджуваних зразків з прямокутним перерізом із сталей 10Г2БТЮЗ (а) та 17Г1С (б)

Таблиця 1 – Довжина та поперечні розміри зразків

Тип трубопроводу ($D \times t$, мм)	$l \times b \times h$, мм
Нафтопровід “Дружба” (530×9)	200×10×9
Газопровід “Київ – Західна Україна” (1020×14)	300×50×14

Цілісність трубопроводу з наскрізною тріщиною (рис. 3, а) оцінювали шляхом порівняння її розміру $2a_i^*$ із обчисленим за формулою 5 розміром наскрізної критичної тріщини $2a_c$, визначеної за критерієм тріщиностійкості [28, 29]:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{F_I \cdot \sigma_p} \right)^2, \quad (5)$$

Таблиця 2 – Характеристики циклічної тріщиностійкості експлуатованих сталей нафтогазопроводів

Система “сталь – середовище”	$C,$ $\frac{мм}{цикл} \cdot (МПа\sqrt{м})^{-n}$	n	$\Delta K_{th},$ $(МПа\sqrt{м})^{-n}$	$\Delta K_{fc},$ $(МПа\sqrt{м})^{-n}$
10Г2БТЮ3–повітря	$1,70 \cdot 10^{-15}$	5,44	12,43	41,17
10Г2БТЮ3–NS4	$2,91 \cdot 10^{-31}$	17,19	15,23	31,08
17Г1С – повітря	$7,56 \cdot 10^{-12}$	2,99	8,59	41,87
17Г1С – NS4	$4,96 \cdot 10^{-14}$	5,14	10,93	37,12

Таблиця 3 – Наскрізні $2a_t^*$ та критичні $2a_c$ розміри корозійно-втомних тріщини для труби газопроводу

Система “сталь – середовище”	c_{th}/a_0	$(c/a)^*$	$2a^*,$ мм	$2a_t^*,$ мм	$K_{Jc},$ МПа $\sqrt{м}$	$2a_c,$ мм
10Г2БТЮ3–повітря	1/5	0,59	30,3	30,3	431,8	426,8
10Г2БТЮ3–повітря	1/40	0,28	64,6	64,6	431,8	426,8
10Г2БТЮ3–повітря	1/300	0,02	366,0	376,7	431,8	426,8
10Г2БТЮ3–NS4	1/5	0,47	38,5	38,5	421,4	419,2
10Г2БТЮ3–NS4	1/40	0,21	87,4	87,4	421,4	419,2
10Г2БТЮ3–NS4	1/225	0,01	417,1	419,2	421,4	419,2
10Г2БТЮ3–NS4	1/300	0,01	543,5	555,9	421,4	419,2
17Г1С–повітря	1/5	0,52	52,4	53,3	232,8	248,6
17Г1С–повітря	1/40	0,10	208,0	214,9	232,8	248,6
17Г1С–NS4	1/5	0,48	55,7	56,7	201,8	220,0
17Г1С–NS4	1/38	0,10	214,0	220,0	201,8	220,0
17Г1С–NS4	1/40	0,09	234,8	242,2	201,8	220,0

де σ_p – максимальні розтягувальні напруження,

$$\sigma_p = \frac{P_{max} R}{t}, \lambda = \frac{a_{K_I}}{\sqrt{R \cdot t}};$$

a_{K_I} – півдовжина наскрізної тріщини;

$$F_I = 1 + 0,072449 \cdot \lambda + 0,64856 \cdot \lambda^2 - 0,2327 \cdot \lambda^3 + 0,038154 \cdot \lambda^4 - 0,0023478 \cdot \lambda^5.$$

Значення довжини тріщини $2a_c$, за якого розпочинається процес спонтанного поширення тріщини вздовж осі труби, вважали критичним.

Подані в роботі характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) представили критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{Jc} , що визначали за допомогою рівняння [30]

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1-\mu^2)}}, \quad (6)$$

де J_{Jc} – критична тріщиностійкість;

E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па);

μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Критичну тріщиностійкість J_{Jc} визначали дослідним шляхом згідно з методикою визначення характеристики тріщиностійкості матеріалів при згині зразків з прямокутним перерізом,

використовуючи експериментально одержану діаграму руйнування зразків “зусилля–прогин”.

Для визначення критичної тріщиностійкості металу трубопроводів використовували зразки прямокутного перерізу, розміри яких подані в таблиці 1. Зразки готували до експерименту таким чином: після механічної обробки, наносили V-подібні концентратори напружень глибиною 10% від товщини зразка. Після цього встановлювали зразок на високочастотну установку консольного згину, за допомогою якої утворювали початкову втомну тріщину, довжина якої (включаючи глибину V-подібного концентратора) складала 40-50% товщини зразка [31]. Навантаження підбирали таким чином, щоб воно було на 10-15% менше від початкового значення в експерименті. У зоні V-подібного концентратора напружень з боку розтягуючих напружень кріпили давач прогину, що конструктивно складався із двох консолей, на які наклеєні тензорезистори, з’єднані за мостовою схемою. На одну з діагоналей моста подавали напруга 12 В, з іншої знімали сигнал, який змінювався пропорційно до прогину зразка. Живлення моста здійснювали постійним струмом від блока живлення ВИП-09, а діаграму деформування записували на самописці ПДА1-01.

Випробування проводили на універсальній розривній машині FP-100/1. Швидкість навантаження зразка становила 1 мм/хв і залишалася постійною протягом усіх випробувань.

Експериментальну процедуру починали із заміру вихідних розмірів робочого перерізу зразка і відстаней між опорами. Зразок встановлювали на навантажуючий пристрій і закріплювали давачі прогину. Здійснивши балансування вимірювальної апаратури, навантажували зразок до втрати ним несучих властивостей із одночасним записом діаграми руйнування. Після експерименту проводили заміри зламу поверхні деформування (руйнування) зразка та визначали її площу S (рис. 5) згідно з рівнянням

$$S = (h - l^*) \cdot b.$$

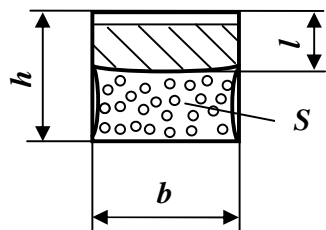


Рисунок 5 – Визначення площі деформованого зразка S

За даними експерименту визначали роботу руйнування (заштрихована область діаграми на рис. 6)

$$A = \int_0^{f_{\max}} P(f) df.$$

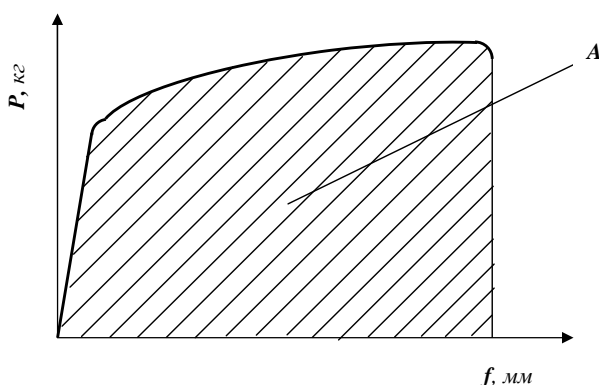


Рисунок 6 – Діаграма деформування $P-f$

Величину J_c визначали як роботу A , витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною, як елемента конструкції, при якій він вичерпує свої несучі властивості, віднесені до нетто площі деформованої поверхні зразка S (рис. 5)

$$J_c = \frac{A}{S}.$$

Крім того, обчислюючи критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} , враховували ту обставину, що він має розмірність $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$. Оскільки розміри конструктивних елементів подавали у міліметрах, то при розрахунку K_{Jc} одержаний результат множили на $\sqrt{10^{-3}}$.

Аналіз зведених до таблиці 2 результатів дає підстави зробити висновок, що в повітряному середовищі немає умов для катастрофічного руйнування як тривало експлуатованої дефектної нафтопровідної труби ($c_{th}/a_0 \leq 1/300$) так і тривало експлуатованої дефектної газопровідної труби ($c_{th}/a_0 \leq 1/40$). У цих випадках можливе лише утворення “свища”, оскільки виконується умова $2a_t^* < 2a_c$.

У ґрунтовій воді (NS4) для дефектних труб досліджуваних нафтогазопроводу виконується умова $2a_c < 2a_t^*$, а отже, існує потенційна можливість їх катастрофічного руйнування. Так, за умови $c_{th}/a_0 \geq 1/250$ потенційно можливе руйнування труби магістрального нафтопроводу “Дружба”, а за умови $c_{th}/a_0 \geq 1/38$ потенційно можливе руйнування труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна”.

Висновки

Запропоновано методику визначення критичної тріщиностійкості металу трубопроводів, яка на базі експериментально одержаних діаграм руйнування зразків “зусилля–прогин” враховує процеси старіння та деградації в тривало експлуатованих трубопровідних сталях.

Розраховано за критерієм тріщиностійкості критичні розміри наскрізної тріщини ($2a_c$) для досліджуваних нафтогазопроводів.

Обчислено руйнівні розміри напівеліптичних тріщин ($2a^*$) з урахуванням початкової форми півеліптичних експлуатаційних дефектів та використанням методики аналітично-числової оцінки кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів у процесі їх розвитку в стінці труби.

Одержані числові дані можуть слугувати базою для інтерпретації тріщиноподібних дефектів, виявлених у процесі технічного діагностування тривало експлуатованих нафтогазопроводів.

Література

- 1 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов – М.: Елима, 2004. – 1104 с.
- 2 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 1 – 457 с.
- 3 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / під заг. ред. В. В. Панасюка / [Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк, І. В. Ориняк та ін.]; – Львів: Сполом, 2009. – Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів; під ред. Г. М. Никифорчина – 504 с.

- 4 Гумеров А. Г. Старение труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров – М.: ВНИИСПТнефть, 1995. – 218 с.
- 5 Иванцов О.М. Надежность магистральных трубопроводов / О.М. Иванцов, В.И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – 167 с.
- 6 Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С.Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 207 с.
- 7 Аварійний нафтопровід “Дружба-1” відновить роботу 4 грудня [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://ukranews.com/uk/news/ukraine/2009/12/03/7337>.
- 8 Яковлев А. Я. Стресс-коррозия на магистральных газонефтепроводах. – Киров: ОАО “Кировоградская областная типография”, 2009. – 320 с.
- 9 Ничипоренко М. В. Досвід діагностування магистральних газопроводів ДК “Укртрансгаз” за допомогою внутрішньо трубних інспекцій поршнів / М. В. Ничипоренко, Є. Б. Іваник // Трубопровідний транспорт. – 2010. – № 6 (66). – С. 7-8.
- 10 Красовський А.Я. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стресс-корозією / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, І.В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18-21.
- 11 Крижанівський Є. І. Вплив середовища та нерівномірності споживання газу на безаварійну експлуатацію газопроводу / Є. І. Крижанівський, О. С. Тараєвський, С. Й. Тараєвський // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2008): у 2-х томах [специальний випуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”]: IX міжн. конф.-вист., 10-12 черв. 2008 р.: збірник праць. – 2008. – Спец. вип. №7. – С. 791-796.
- 12 Борисенко В. А. Коррозионное разрушение газопроводов / В. А. Борисенко, Ю. П. Нихаенко, В. И. Крикун // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія-2006): у 2-х томах [специальний випуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”]: VIII міжн. конф.-вист., 6-8 черв. 2006 р.: збірник праць. – 2006. – Спец. вип. №5. – С. 296-299.
- 13 Волович О.В. Розробка комплексної методики моніторингу технічного стану зварних трубопроводів / О.В. Волович // Трубопровідний транспорт. – 2009. – № 2 (56). – С. 18–20
- 14 Назарчук З.Т. Комплекс технічних засобів для електромагнітного неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації / З.Т. Назарчук, А.Я. Тетерко, В.Г. Рибачук [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (“РЕСУРС”): звітна сесія цільової комплексної програми, 6-8 січня 2006 р.: наук.-техн. збірник під заг. ред. Б.Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 39-42.
- 15 Методика оцінки технічного стану труб газопроводу з тривалим строком експлуатації та його залишкового ресурсу (Затверджено ДК “Укртрансгаз” 15.07.2002), 72 с.
- 16 Дмитрах І.М. Створення сучасних методів технічної діагностики працездатності систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / І.М. Дмитрах, А.М. Сиротюк, Б.П. Русин [та ін.]; під заг. ред. Б.Є. Патона. – Київ: Інститут електрозварки ім. Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 62-66.
- 17 Красовський А.Я. Методологія і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, В.М. Тороп [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (“РЕСУРС”): звітна сесія цільової комплексної програми, 6-8 січня 2006 р.: наук.-техн. збірник під заг. ред. Б.Є. Патона. – К.: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 309–314.
- 18 Дмитриев В.Ф. Оценка остаточного ресурса нефтепровода и планирование его капитального ремонта / В.Ф. Дмитриев, Г.Х. Мурзаханов, Г.А. Филиппов // Строительство трубопроводов. – 1997. – №3. – С. 21-24.
- 19 Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк – Львів: Національна академія наук України. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка. – 1999. – 341 с.
- 20 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / під заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Сташук, Л. Тот; під ред. І.М. Дмитраха. – К.: ВД “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
- 21 Пэрис П. Критический анализ законов распространения трещин / П. Пэрис, Ф. Эрдоган // Техническая механика. – 1963. – Сер. Е, № 4. – С. 60-66.
- 22 Грабовський Р.С. Оцінка ресурсних можливостей магистральних газопроводів із експлуатаційними дефектами / Р.С. Грабовський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №4 (37). – С. 71–82.
- 23 Крижанівський Є.І. Оцінка умов лавинного руйнування трубопроводів із наскрізними та ненаскрізними довільно розміщеними зовнішніми тріщиноподібними дефектами заданої глибини / Є.І. Крижанівський, О.М. Мандрик, Р.С. Грабовський [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – №1 (34). – С. 140–146.
- 24 Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / Панасюк В.В. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
- 25 Орыняк И.В. Прочность трубопроводов с дефектами / И.В. Орыняк – К.: Наукова думка, 2012. – 445 с.
- 26 Грабовський Р.С. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів / Р.С. Грабовський, В.С. Лужецький, Т.М. Горб'як // Машинознавство. – 2005. – №4 (94). – С. 7–10.

27 Caprille J. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Caprille, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2008. – 33, № 24. – P. 7630–7641.

28 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк. – Львів: СПОЛЮМ, 2012. – 316 с.

29 Грабовський Р.С. До оцінки катастрофічного руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами / Р.С. Грабовський, В.С. Лужецький // Наукові нотатки: міжвуз. зб. – Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2006. – Вип. 19. – С. 56–63.

30 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.

31 ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

*Стаття надійшла до редколегії
26.04.15*

*Рекомендована до друку
професором **Паневником О.В.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Стацюком М.Г.**
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України, м. Львів)*