

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

ФЕДОРОВИЧ ІГОР ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 622.691.4

**ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ РУЙНУВАННЯ
МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ З ВИЯВЛЕНИМИ ПОВЕРХНЕВИМИ
ТРІЩИНОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

ІВАНО-ФРАНКІВСЬК – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Грабовський Роман Степанович,
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, професор кафедри будівельної механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Говдяк Роман Михайлович,
Інжинірингова компанія “Машекспорт”, м. Київ,
генеральний директор;

кандидат технічних наук, доцент
Кичма Андрій Олексійович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів, доцент кафедри технічної механіки та динаміки
машин

Захист відбудеться “03” липня 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий “01” червня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04
кандидат технічних наук, доцент



Пилипів Л.Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обґрунтування подальшої експлуатації або виведення із експлуатації вітчизняних магістральних газопроводів має важливе стратегічне і економічне значення, оскільки на сьогодні 76 % з них експлуатується вже понад 30 років. Їх технічний стан є проблемним через значну дефектність. Найчастішою локального руйнування газопроводів є наявність корозійних тріщиноподібних дефектів та втомних і корозійно-втомних тріщин, спричинених сумісним впливом експлуатаційних навантажень, ґрунтових вод, змінами функціональних властивостей покриттів трубопроводів. Тому актуальною стає проблема оцінювання реального технічного стану газопроводів на пізній стадії експлуатації з метою розроблення експертних висновків щодо можливості їх подальшого функціонування.

Основною метою діагностичного обстеження магістральних газопроводів є встановлення їх загального технічного стану і виділення потенційно небезпечних ділянок на трасі. Визначення працездатності дефектних трубопроводів, тобто оцінювання ступеня безпеки та забезпечення надійної експлуатації, викладено в ряді одно- та двопараметричних норм та стандартів, які дають правильний результат, якщо їх застосовують у межах, визначених умовами експерименту. Крім того, в ряді робіт розглянуто вплив умов тривалої експлуатації та оцінено реальний стан експлуатованого металу, зокрема його механічних, корозійно-механічних, електрохімічних та інших характеристик. При цьому як науково-методологічну основу використовують, в першу чергу, підходи механіки руйнування конструкційних матеріалів, які дозволяють оцінити міцність і довговічність елементів конструкцій з тріщиноподібними дефектами, та вивчати вплив корозійних середовищ. Методи матеріалознавства застосовують для оцінки процесів старіння металів труб. Однак тут методи оцінки пошкоджених газопроводів ґрунтуються здебільшого на гранично-рівноважному стані труби із тріщиноподібними дефектами або тріщинами. Такі підходи дають можливість визначати умови і знаходити момент катастрофічного руйнування труби, а також аналізувати причини її руйнування, однак, не розглядають специфіку експлуатаційних умов, зокрема процес розвитку тріщиноподібних дефектів або втомних тріщин.

Розвинуті у роботі положення базуються на доробці таких вітчизняних і зарубіжних вчених, як Є. І. Крижанівський, І. І. Мазур, О. М. Іванцов, В. В. Харіоновський, В. Я. Грудз, Ю. Д. Петрина, Л. С. Шлапак, В. В. Панасюк, В. І. Похмурський, І. М. Дмитрах, Г. М. Никифорчин, А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, І. Рай, Р. Паркінс.

Попри досягнуті результати в розвитку даного напряму досліджень, на сьогодні залишається не вирішеним питання встановлення умов прогнозування розвитку тріщиноподібних дефектів півеліптичної форми в стінці труби. Важливим є дослідити взаємозв'язок між граничними розмірами півеліптичної тріщини і швидкістю її розвитку для досліджуваних систем “метал труби – середовище”, а також встановити критеріальну залежність між початковими (діагностованими) та критичними розмірами і формою тріщин, що спричиняє руйнування труби, за якою можливо оцінити небезпечність виявлених дефектів та інтерпретувати результати діагностичного обстеження тривало експлуатованих газопроводів, а також розробити технологію ремонту сталевих газопроводів, яка б сповільнювала утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні труб.

На сьогодні такі підходи розвинуті недостатньо. У зв'язку з цим розроблення методики оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих магістральних газопроводів за підходами механіки руйнування та результатами їх технічної діагностики, а також розроблення на цій основі технології продовження їх працездатності є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до програми науково-дослідних робіт: “Розроблення та оптимізація технологій і засобів транспортування газу для підвищення енергетичної безпеки держави”, номер державної реєстрації – 0113 U 001101, № теми – Д-19-13-П.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей розвитку тріщиноподібних дефектів у трубних сталях 17Г1С і 10Г2СД і визначення критичних параметрів їх тріщиностійкості, а також розроблення технології усунення впливу експлуатаційних дефектів на працездатність магістральних газопроводів.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення таких завдань:

- визначити базові характеристики міцності та циклічної тріщиностійкості трубних сталей 17Г1С та 10Г2СД із урахуванням впливу параметрів навантаження та експлуатаційного середовища, а також характеристики опору руйнуванню металів тривало експлуатованих магістральних газопроводів;
- адаптувати розрахункову методику прогнозування розвитку тріщиноподібних дефектів напівеліптичної форми в стінці труби за величиною внутрішнього тиску транспортованого продукту;
- встановити закономірності подальшого розвитку і зміни форми діагностованих поверхневих тріщиноподібних дефектів та запропонувати підходи до оцінювання подальшої експлуатації дефектних газопроводів;
- дослідити вплив експлуатаційних факторів (поверхневих дефектів, корозійного середовища, тривалості експлуатації), поверхневого зміцнення та протикорозійної поверхневої обробки металу газопровідної труби на втомну міцність і запропонувати спосіб ремонту газопроводів, який сповільнює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні труб;
- впровадити результати досліджень в інженерну практику при технічному діагностуванні та ремонті тривало експлуатованих магістральних газопроводів.

Об'єкт дослідження – вплив довготривалої експлуатації на тріщиностійкість і втомну міцність трубних низьколегованих сталей магістральних газопроводів за довготривалої дії експлуатаційних чинників.

Предмет дослідження – особливості зміни характеристик тріщиностійкості трубних сталей 17Г1С та 10Г2СД на пізній стадії експлуатації магістральних газопроводів.

Методи дослідження. У ході досліджень використано основні положення механіки руйнування і міцності матеріалів та елементів конструкцій із урахуванням впливу середовища на процеси корозійно-механічної пошкоджуваності при тривалій експлуатації магістральних газопроводів. Зокрема:

- в ході досліджень циклічної корозійної тріщиностійкості та характеристик опору руйнуванню сталей тривало експлуатованих магістральних газопроводів застосовано методи експериментальної механіки руйнування;

- методами матеріалознавства досліджено мікротвердість та визначено розміри зони зварного з'єднання;

- при визначенні закономірностей розвитку початкових тріщиноподібних дефектів та зміни їх форми в стінках труб тривало експлуатованих магістральних газопроводів застосовано числові методи;

- методами експериментальної механіки руйнування досліджено вплив експлуатаційних факторів (поверхневих концентраторів напружень та ґрунтової води), поверхневого зміцнення та протикорозійної обробки металу газопроводів на його втомну міцність.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримано діаграми циклічної тріщиностійкості тривало експлуатованих трубних сталей 17Г1С та 10Г2СД, які є основою для оцінювання працездатності магістральних газопроводів “Київ – Західна Україна І нитка” та “Пасічна – Долина”.

2. Отримано критичні значення параметрів опору руйнуванню трубної сталі 17Г1С, з врахуванням яких встановлено критичні розміри наскрізних дефектів, що є підставою для експертних висновків про небезпеку виявлених тріщиноподібних дефектів.

3. Вперше запропоновано аналітичну залежність взаємозв'язку між початковими та граничними розмірами тріщин, що є основою для прогнозування залишкової довговічності магістрального газопроводу з виявленими тріщиноподібними дефектами.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропоновано методологію оцінювання можливості руйнування та прогнозування терміну безпечної експлуатації лінійних ділянок газопроводів.

2. Отримано нові експериментальні дані про вплив на втомну міцність металу труб експлуатаційного середовища та тріщиноподібних дефектів, що дало можливість трактувати результати технічного діагностування магістральних газопроводів.

3. Запропоновано комплексний спосіб ремонту сталевих газопроводів, який підвищує опір утворенню зовнішніх тріщиноподібних дефектів на їх поверхні.

Положення, що виносяться на захист.

1. Результати досліджень закономірності поширення макротріщини в глибину стінок газопровідних труб із урахуванням терміну їх експлуатації та чинників впливу робочого корозійного середовища (ґрунтових вод), а також методологія оцінки розмірів та форми виявлених тріщиноподібних дефектів для інтерпретації результатів технічного обстеження магістральних газопроводів.

2. Спосіб ремонту сталевих газопроводів, який суттєво сповільнює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні труб.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати дисертації отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належить: в [2, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 17] – постановка задач експериментальних досліджень закономірності поширення макротріщини вглиб стінок газопровідних труб, їх технічна реалізація, дослідження режимів піскоструменевої обробки поверхні трубопроводів, а також узагальнення та інтерпретація отриманих результатів; в [1, 13] – постановка задач аналітичних досліджень та реалізація розрахункових

оцінок розвитку втомних та корозійно-втомних тріщин у стінках магістральних газопроводів; у [8, 16] – запропоновано підхід щодо встановлення закономірності подальшого розвитку та зміни форми діагностованих поверхневих тріщиноподібних дефектів; у [3, 6, 15] – визначення допустимих та критичних розмірів втомних та корозійно-втомних тріщин для лінійних ділянок тривало експлуатованих магістральних газопроводів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на: 3-ій Міжнародній науковій конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій”, (м. Львів, 2012); 5-ій Міжнародній науковій конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”, (м. Львів, 2014); 4-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій”, (м. Львів, 2014); 4-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика”, (м. Івано-Франківськ, 2015); 5-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика”, (м. Івано-Франківськ, 2017).

У повному обсязі робота доповідалась на розширеному науково-технічному семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, (м. Івано-Франківськ, 2018).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових праць, з яких: 8 статей – у фахових наукових виданнях [2-9], 1 стаття – у виданні, яке занесено до міжнародних наукометричних баз [1], 7 тез – у збірниках праць та тез міжнародних конференцій, а також отримано 1 патент України [17];

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 142 найменувань і додатків. Основний зміст роботи викладено на 149 сторінках. Робота містить 58 рисунків та 45 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано вивченість проблеми оцінювання технічного стану тривало експлуатованих газопроводів з наявними дефектами, обґрунтовано актуальність теми, відображено зв'язок роботи з планами та темами, сформульовано мету, основні задачі досліджень, розглянуто методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення основних результатів, подано відомості про їх апробацію.

У першому розділі проаналізовано надійність тривало експлуатованих газопроводів України, оскільки 29,0 тис. км труб (76 % від загальної довжини газопроводу) перебувають в експлуатації понад 30 років і вже формально відпрацювали свій розрахунковий ресурс. Показано, що за аварійністю газотранспортна система України подібна до газотранспортних мереж Європи та Росії. Зазначено, що суттєві проблеми, які виникають під час експлуатації магістральних газопроводів, спричинені дефектами труб. Розглянуто вплив чинників, які сприяють виникненню експлуатаційних дефектів, зменшуючи цим термін працездатності та спричиняючи руйнування магістральних газопроводів. У цьому контексті розглянуто корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти та корозійно-втомні тріщини, що утворилися в

процесі тривалої експлуатації газопровідних труб, а також описано характерні випадки катастрофічного руйнування магістральних газопроводів як в Україні, так і в світі.

Розглянуто широко застосовувані у світі для оцінювання міцності та ризику руйнування газопроводів із тріщиноподібними та корозійно-механічними дефектами однопараметричні підходи механіки деформованого твердого тіла, а також відомий двокритеріальний підхід механіки руйнування, в основі якого лежать незалежні розрахунки і визначення параметрів лінійної механіки руйнування та параметрів теорії граничного стану. Однак у експлуатаційних умовах ці підходи дають певну похибку, оскільки не враховують ряд експлуатаційних чинників (зокрема вплив корозійного середовища та рівень деградації матеріалу труб у процесі експлуатації газопроводів), а також не розглядають розвиток дефектів корозійної та корозійно-втомної природи.

Для оцінювання ризику руйнування, а також можливості подальшої експлуатації дефектних газопроводів найбільш ефективними є методи експериментальної механіки руйнування, якими досліджується вплив експлуатаційних факторів (поверхневих концентраторів напружень та ґрунтової води), поверхневого зміцнення та протикорозійної поверхневої обробки металу газопроводів на його втомну міцність. Вони і становлять науково-методологічну основу цієї роботи.

Крім того, у розділі здійснено критичний аналіз сучасного стану проблеми оцінювання ресурсу газопроводів з наявними корозійно-втомними дефектами, на основі якого сформульовано мету та завдання роботи.

Другий розділ присвячений розробці методичної процедури для дослідження фрагментів експлуатованих труб магістральних газопроводів із закладеною технологією їх виготовлення та адаптовано експериментальні засоби визначення характеристик циклічної корозійної тріщиностійкості базового металу та металу зони термічного впливу зварного шва із урахуванням дії ґрунтових вод. Вивчення процесів поширення корозійно-втомних тріщин у досліджуваних магістральних газопроводах (“Київ – Західна Україна І нитка” та “Пасічна – Долина”), проводили в загальноприйнятих для таких випробувань середовищах. Середовищами для випробувань було атмосферне повітря та нейтральний розчин (pH 6,7) NACE NS4 (0,483 $NaHCO_3$ g/l; 0,120 KCl; 0,137 $CaCl_2$; 0,131 $MgCl_2 \cdot H_2O$), який прийнято вважати моделлю ґрунтової води.

Для реалізації таких досліджень було використано експериментальні установки (рис. 1) для вивчення закономірностей поширення корозійно-втомних тріщин вглиб стінки труби з метою визначення базових характеристик циклічної тріщиностійкості сталей газопроводів, зважаючи на тривалість їх експлуатації та чинник корозійного середовища.

Базові характеристики циклічної тріщиностійкості газопровідних сталей з урахуванням дії експлуатаційних чинників визначали за результатами досліджень, які були подані у вигляді залежностей швидкості поширення втомної тріщини da/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK в околі вершини тріщини, тобто діаграм циклічної корозійної тріщиностійкості. Середньоамплітудні

ділянки цих діаграм у діапазоні зміни швидкостей поширення тріщини $da/dN = 10^{-8} \div 10^{-6}$ м/цикл аналітично описувались степеневою залежністю Паріса:

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

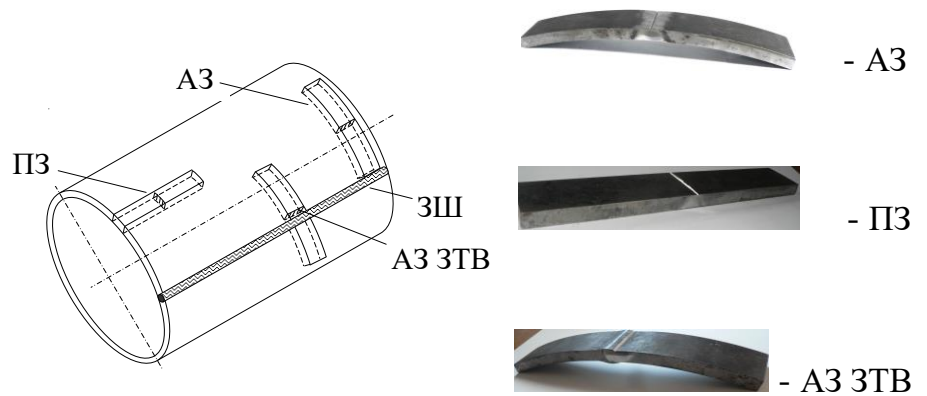
де C та n – постійні системи “матеріал-середовище”.

Окрім C та n визначали ще дві базові характеристики циклічної тріщиностійкості сталей, для кожної з досліджуваних систем “матеріал-середовище” – значення порогового (ΔK_{th}) та критичного (ΔK_{fc}) коефіцієнтів інтенсивності напружень.

Усі базові корозійно-втомні дослідження процесів розвитку тріщин та руйнування газопровідних сталей (17Г1С та 10Г2СД) виконані на зразках, заготовки для яких вирізано з котушок труб за схемою, зображеною на рис. 2.



Рисунок 1 – Загальний вигляд випробувального обладнання для дослідження поширення корозійно-втомних тріщин в глибину стінок газопровідних труб



а) б)

Рисунок 2 – Загальна схема вирізання (а), та вирізані з котушки труби для потреб дослідження закономірностей поширення корозійно-втомних тріщин зразки зі сталі 17Г1С (б): АЗ - арковий, ПЗ - прямокутний, АЗ ЗТВ - арковий, з поздовжнім зварним швом

Зона термічного впливу (ЗТВ) є найбільш слабким місцем зварних швів газопровідних труб. Параметри зони термічного впливу зварного шва фрагменту труби газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка” визначали експериментально за відомою методикою, використовуючи мікротвердомір марки ПМТ-3М.

За експериментально одержаною діаграмою руйнування зразків “зусилля – прогин” визначали критичну тріщиностійкість J_{lc} металу газопровідних сталей. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} визначали за рівнянням

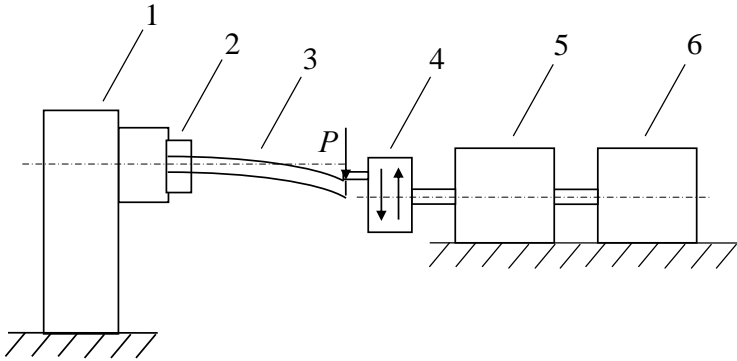
$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_{lc} \cdot E}{(1 - \mu^2)}}, \quad (2)$$

де J_{lc} – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па); μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Нормальні залишкові напруження першого роду в поверхневих шарах фрагментів газопровідних труб визначали за відомою методикою. Осьові залишкові

макронапруження визначали на призматичних зразках $b \times h \times L = 20 \times 12 \times 150$ мм вирізаних із експлуатованих труб та труб запасу газопроводу “Київ – Західна Україна I нитка” після піскоструменевої обробки у різних часових режимах.

Дослідження на втомну міцність фрагментів газопровідних труб проводили на установці, принципова схема якої зображена на рис. 3.



1 – нерухома опора; 2 – нерухомий затискач; 3 – фрагмент труби (зразок);

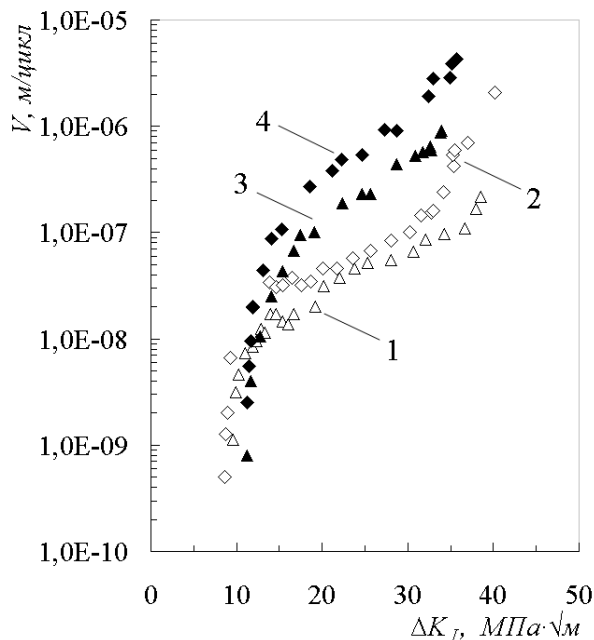
4 – навантажувальний пристрій;

5 – коробка швидкостей;

6 – електродвигун

Рисунок 3 – Принципова схема установки для випробування фрагментів газопровідних труб на втомну міцність

Третій розділ містить результати досліджень базових характеристик тріщиностійкості металу тривало експлуатованих газопроводів (рис. 4 та в табл. 1).



1, 2 – повітря;

3, 4 – середовище NS4;

1, 3 – арковий зразок,

2, 4 – прямокутний зразок

Рисунок 4 – Діаграми циклічної тріщиностійкості базового металу магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна I нитка” у досліджуваному середовищі

Специфіка експлуатації газопроводів полягає в тому, що тиск газу змінюється в часі, зумовлюючи втомні навантаження внаслідок нерівномірного споживання і відбору, підключення та відключення компресорних агрегатів, перекриття запірних пристроїв тощо. Згідно з літературними даними такі зміни робочого тиску складають для газопроводів до 20 %. Отже, у процесі експлуатації метал трубопроводу зазнає впливу циклічного навантаження з коефіцієнтом асиметрії циклу $R \approx 0,8$.

Вивчали особливості розвитку тріщини в досліджуваних середовищах як у осьовому, так і в поперечному напрямках труби. Для досліджень тріщиностійкості металу в осьовому напрямку труби використовували (рис. 2, б) аркові (АЗ), а для досліджень у поперечному напрямі – прямокутні зразки (ПЗ). Як характерний

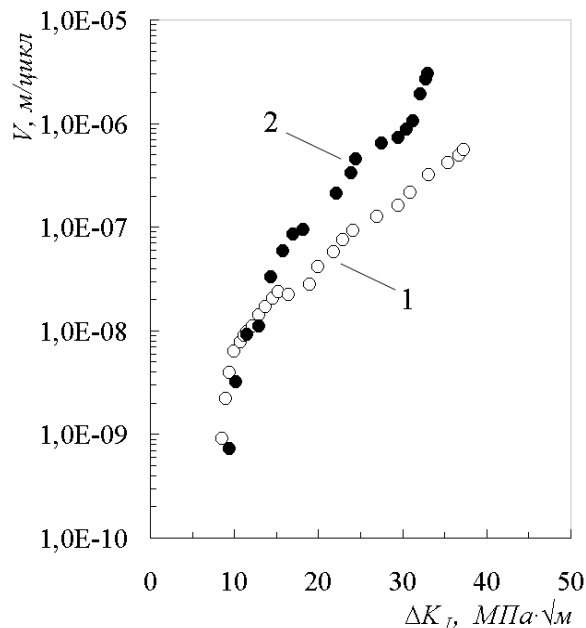
приклад для оцінки тенденції до зміни базових параметрів тріщиностійкості металу газопроводів розглянуто сталь 17Г1С з труби магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка”.

Таблиця 1 – Характеристики циклічної тріщиностійкості експлуатованої сталі магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка”

Система “метал – середовище”	$C,$ $\frac{\text{мм}}{\text{цикл}} \cdot (\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^{-n}$	n	$\Delta K_{th},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\Delta K_{fc},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
17Г1С (ПЗ) – повітря	$7,56 \cdot 10^{-12}$	2,99	8,59	41,87
17Г1С (ПЗ) – NS4	$1,18 \cdot 10^{-13}$	4,84	10,93	37,12
17Г1С (АЗ) – повітря	$2,21 \cdot 10^{-11}$	2,40	9,04	42,44
17Г1С (АЗ) – NS4	$3,20 \cdot 10^{-13}$	4,22	11,58	37,83

Оскільки численні руйнування газопроводів пов'язані з розвитком тріщини, що розвивається вздовж зварювального шва газопровідної труби, то дослідження проведені для експлуатованого металу в зоні повздовжнього зварного шва труби. Для цього визначили розміри зони термічного впливу зварного з'єднання за методикою, описаною у другому розділі.

Досліджували аркові зразки зі зварним швом (рис. 2, б). При цьому концентратор напружень шириною 3,5 мм наносили з боку сталі 17Г1С у визначеній експериментально області зони термічного впливу (ЗТВ), (рис. 5 та табл. 2.).



1 – повітря; 2 – середовище NS4

Рисунок 5 – Діаграми циклічної тріщиностійкості металу зони термічного впливу зварного шва магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка” у досліджуваному середовищі

Таблиця 2 – Характеристики циклічної тріщиностійкості металу ЗТВ зварного шва магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка”

Система “метал – середовище”	$C,$ $\frac{\text{мм}}{\text{цикл}} \cdot (\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^{-n}$	n	$\Delta K_{th},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\Delta K_{fc},$ $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
17Г1С (АЗ ЗТВ) – повітря	$2,95 \cdot 10^{-12}$	3,27	7,83	38,72
17Г1С (АЗ ЗТВ) – NS4	$2,57 \cdot 10^{-14}$	5,19	8,59	34,52

Крім того, досліджено (рис. 6, табл. 3) процес руйнування тривало експлуатованої сталі магістрального газопроводу за процедурою, описаною в другому розділі.

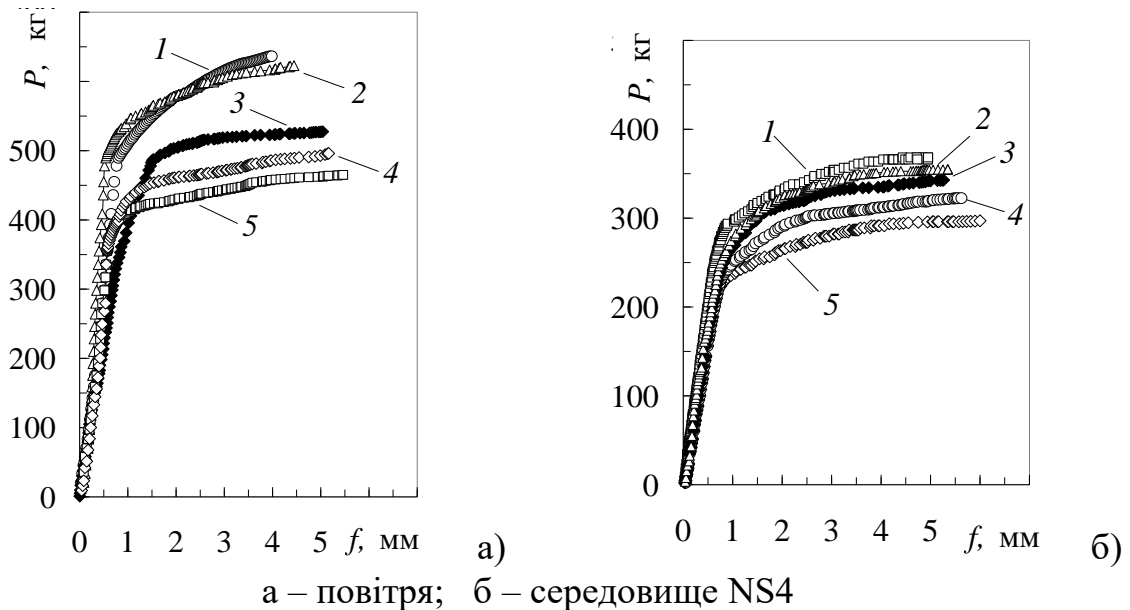


Рисунок 6 – Діаграми деформування $P - f$ металу магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна I нитка”

Таблиця 3 – Значення ΔK_n^* , ΔK_c^* та для систем “сталь 17Г1С – середовище”

Система “матеріал – середовище”	K_{Jc}^{sep} , МПа $\sqrt{м}$	$\Delta = \frac{K_{Jc}^n - K_{Jc}^c}{K_{Jc}^n} \cdot 100\%$
Сталь 17Г1С (ПЗ) – повітря	232,8	13,3
Сталь 17Г1С (ПЗ) – NS4	201,8	

Встановлено, що вплив корозійного середовища (NS4) у вершині тріщини на зону передруйнування зменшує його тріщиностійкість на 13,3 %.

Отримані в розділі базові дані про характеристики циклічної тріщиностійкості трубопровідних сталей надалі використано у розрахункових оцінках міцності та залишкової довговічності елементів тривало експлуатованих газопроводів з урахуванням розвитку тріщиноподібних дефектів.

У четвертому розділі розглянуто методику аналітично-чисельних досліджень кінетики поширення тріщиноподібних дефектів у стінках газопроводів, яка дозволяє врахувати особливості розвитку тріщин різної початкової форми та розмірів у трубі залежно від стану металу та чинника корозійного середовища. В основу методики покладено змодельований у вигляді півеліптичної тріщини з розмірами півосей a та c (рис. 7) корозійно-втомний тріщиноподібний дефект, розміщений на зовнішній стінці труби із зовнішнім діаметром D та товщиною стінки t .

Методика ґрунтується на двох засадах. З одного боку, експериментально визначали закономірність розвитку корозійно-втомної тріщини в металі газопроводу для заданої системи „матеріал – середовище” використовуючи арковий зразок (рис. 2, б) за методикою, описаною в другому та третьому розділах та будували

діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості металу газопроводу, яка аналітично описується за допомогою степеневі залежності Паріса:

$$da/dN = dc/dN = C(\Delta K)^n, \quad (3)$$

Вважали, що визначальним є розвиток тріщини вглиб стінки труби і припускали, що він відбувається стрибкоподібно із приростом тріщини на величину $\Delta a_i = 0,25$ мм. Схематично кінетику розвитку корозійно-втомного тріщиноподібного дефекту зображено на рис. 8.

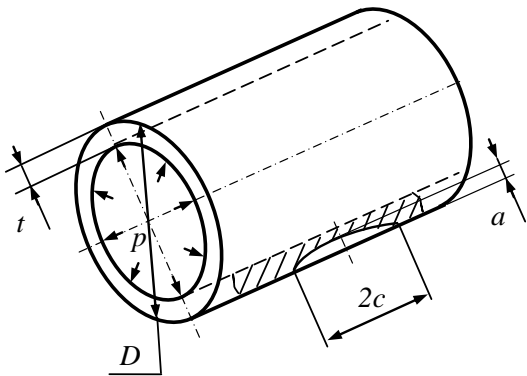


Рисунок 7 – Схематизація дефекту в стінці труби

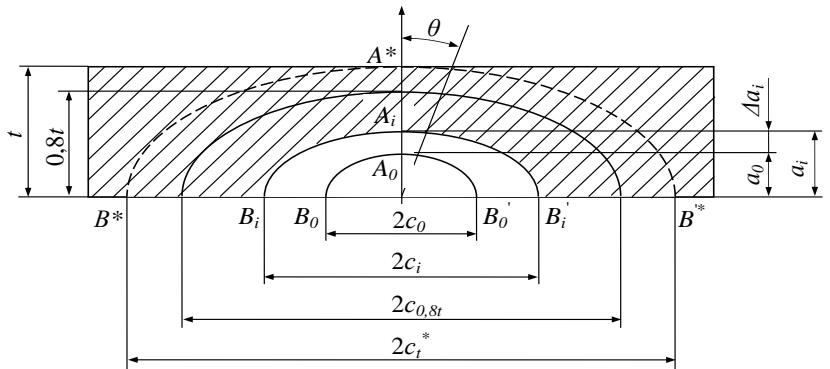


Рисунок 8 – Схема стрибкоподібно i -го поширення тріщини вглиб стінки труби

Визначали очікувану швидкість поширення півеліптичної тріщини ($B_0A_0B_0'$) вглиб стінки труби da/dN з точки A_0 при прирості тріщини на величину $\Delta a_i = 0,25$ мм. При цьому використовували залежність (4) та діаграму циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу для заданої системи „матеріал – середовище” визначали число циклів навантаження ΔN_i , необхідного для заданого приросту тріщини:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a_i}{\Delta N_i} \Rightarrow \Delta N_i = \frac{\Delta a_i}{da/dN}. \quad (4)$$

Одночасно обчислювали значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_i у точках B_0 та B_0' (рис. 8) і визначали для них за діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу для заданої системи „матеріал – середовище” швидкість поширення тріщини в осьовому напрямі, тобто по довжині труби (dc/dN). За одержаним значенням швидкості у точках B_0 та B_0' (dc/dN) знаходили приріст тріщини на величину Δc_i за кількість циклів навантаження ΔN_i , який був визначений раніше:

$$\frac{dc}{dN} = \frac{\Delta c_i}{\Delta N_i} \Rightarrow \Delta c_i = \Delta N_i \cdot \frac{dc}{dN}. \quad (5)$$

Таким чином визначали нові розміри півеліптичної тріщини ($B_iA_iB_i'$) після її стрибкоподібного зростання (рис. 8):

$$\begin{aligned} a_i &= a_0 + \Delta a_i; \\ 2c_i &= 2c_0 + 2\Delta c_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Для обчислення значень коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I використано наступну відому залежність:

$$\Delta K_{I_a} = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot 0,97 \cdot \left(\frac{R_a^2 + R_{\text{вн}}^2}{R_a^2 - R_{\text{вн}}^2} - 1 + 0,5 \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \cdot \frac{t}{R_{\text{вн}}} \cdot 1,07,$$

$$\Delta K_{I_c} = \Delta K_{I_a} \cdot \left(1,1 + 0,35 \cdot \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right) \cdot \sqrt{\frac{a}{c}},$$

$$\text{де } F = \frac{M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t} \right)^4}{\sqrt{Q}}, \quad M_1 = 1,13 - 0,09 \frac{a}{c}, \quad M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}}, \quad (7)$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24}, \quad Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65},$$

де σ – нормальне напруження; t – висота зразка (товщина стінки).

Експериментальну перевірку запропонованої методики чисельної оцінки кінетики та зміни форми корозійно-втомних тріщиноподібних дефектів у процесі їх розвитку в стінці труби здійснили шляхом випробувань фрагмента труби, експлуатованого за максимального робочого тиску газу $p \approx 5,4$ МПа протягом 41 років магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка” діаметром 1020 мм, ($t = 14$ мм). Досліджували зразки (рис. 9, а) довжиною $l = 300$ мм з поперечними розмірами (14×50) мм з наперед утвореними краєвою (рис. 9, б) та півеліптичною (рис. 9, в) тріщинами за умов консольного згинання зразків із частотою $f = 6,5$ Гц при синусоїдальній формі циклу навантаження з коефіцієнтом асиметрії циклу $R = 0,8$, за кімнатної температури ($T = 20^\circ \text{C}$). Середовищем для випробувань слугувало лабораторне повітря.

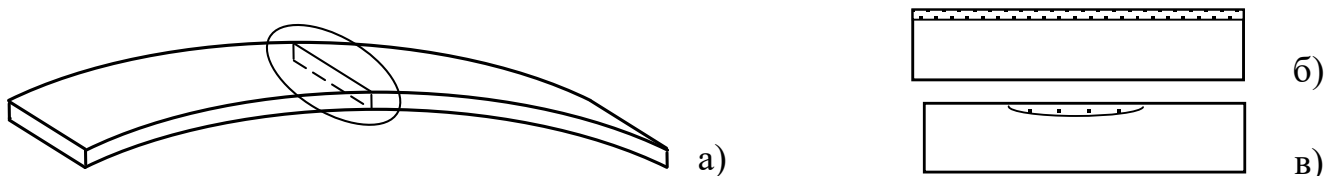


Рисунок 9 – Загальний вигляд зразка, вирізаного з фрагменту газопровідної труби

Результати випробувань зразків з краєвою тріщиною подані у вигляді діаграми циклічної тріщиностійкості (рис. 10) і аналітично описані за допомогою степеневі залежності Паріса (1) (табл. 4).

Таблиця 4 – Значення констант у степеневій залежності (1) для сталі 17Г1С

Назва системи	$C,$ м/цикл · (МПа $\sqrt{м}$) ⁻ⁿ	n	$\Delta K_{th},$ МПа $\sqrt{м}$	$\Delta K_{fc},$ МПа $\sqrt{м}$
Експлуатована сталь 17Г1С – повітря	$9,12 \cdot 10^{-13}$	3,62	8,59	41,87

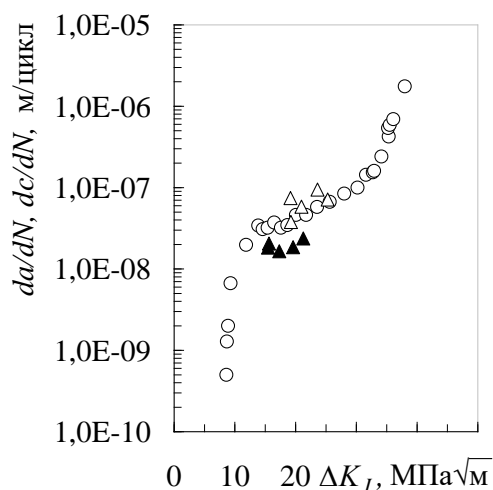


Рисунок 10 – Діаграма циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С на повітрі (колові точки), а трикутними точками відображено результати початкових (Δ) та завершальних стадій (\blacktriangle) досліджуваних етапів

Щоб визначити траєкторію розвитку півеліптичної тріщини застосували поетапний метод “відбитків”. На першому етапі початкове значення коефіцієнта інтенсивності напружень циклу ΔK_I у точках B_0 та B'_0 (рис. 11) було рівне $\Delta K_I = 20 \text{ МПа}\sqrt{м}$ і відповідало середньому значенню коефіцієнта інтенсивності напружень середньоамплітудної ділянки Паріса (рис. 10). Після одержання приросту тріщини $B_1B_0 \approx B'_1B'_0 \approx 1 \text{ мм}$ (світла смуга півеліпса на рис. 11), значення коефіцієнта інтенсивності напружень циклу ΔK_I зменшували на 30 %, наближаючись у такий спосіб до початку ділянки Паріса. Закінчувався перший етап приростом тріщини $B_2B_1 \approx B'_2B'_1 \approx 1,5 \text{ мм}$ (темна смуга півеліпса на рис. 11). Відтак розпочинали другий етап і так далі. У результаті одержали відбитки фронту поширення півеліптичної тріщини у стінці газопровідної труби (рис. 11).

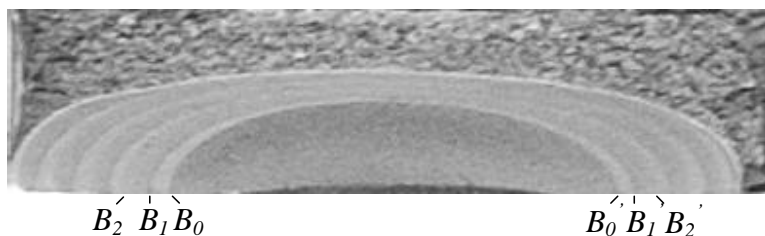


Рисунок 11 – Розвиток півеліптичної тріщини в стінці газопровідної труби

Результати розрахунку кінетики розвитку тріщини за методикою та експериментально встановленою траєкторією її розвитку подано на рис. 12.

Отримані результати засвідчують можливість застосування даної методики з метою інтерпретації виявлених у процесі технічної діагностики тріщиноподібних дефектів.

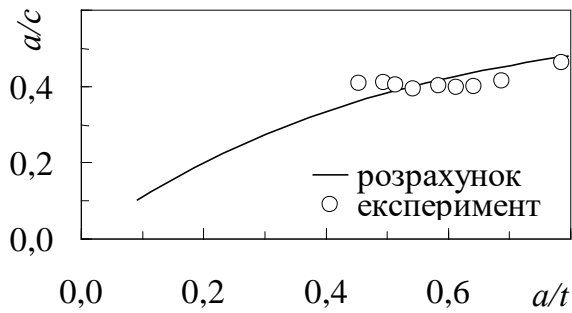


Рисунок 12 – Зміна форми тріщини (a/c) при її розвитку вглиб (a/t) стінки експлуатованої газопровідної труби під час проведення випробувань на повітрі

Вивчали два типи найбільш характерних форм тріщиноподібних дефектів: технологічні ризики, видовжені експлуатаційні боріздки (канавки), які розглядали в інтервалі $1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/10$, та корозійні виразки – в інтервалі $1/10 < (a/c)_i \leq 1/3$.

Таблиця 5 – Граничні розміри $(a/c)_t^*$ та характерні глибини $(a/t)^*$ осьових корозійно-втомних тріщин, що розвиваються у напрямку від зовнішньої стінки труби

Середовище	$(a_{th}/c)_0$		a_{th} , мм	$(a/c)_t^*$	$(a/t)^*$	$\Delta N_c = N_c - N_{th}$, цикли	q
	рис. 13-14						
Повітря	6	1/3	8,72	0,475	-	$8,05 \cdot 10^5$	1,00
	5	1/5	7,20	0,364	-	$7,67 \cdot 10^5$	1,05
	4	1/10	6,11	0,225	-	$5,82 \cdot 10^5$	1,38
	3	1/20	5,49	0,127	0,204	$3,95 \cdot 10^5$	2,04
	2	1/50	5,09	0,055	0,168	$2,67 \cdot 10^5$	3,02
	1	1/100	4,95	0,028	0,158	$2,32 \cdot 10^5$	3,47
NS4	6	1/4	9,89	0,346	-	$2,43 \cdot 10^5$	1,00
	5	1/5	9,09	0,303	-	$2,32 \cdot 10^5$	1,05
	4	1/10	7,47	0,188	-	$1,54 \cdot 10^5$	1,58
	3	1/20	6,55	0,107	0,208	$0,91 \cdot 10^5$	2,67
	2	1/50	5,98	0,047	0,169	$0,60 \cdot 10^5$	4,05
	1	1/100	5,79	0,024	0,159	$0,52 \cdot 10^5$	4,67

Результати оцінювання умов та специфіки руйнування тривало експлуатованого газопроводу з використанням запропонованого підходу подані в таблиці 6. Зауважимо, що з метою порівняння швидкості розвитку тріщиноподібного дефекту заданої форми $(a/c)_i$ для досліджуваних систем “метал труби – середовище” визначали параметр:

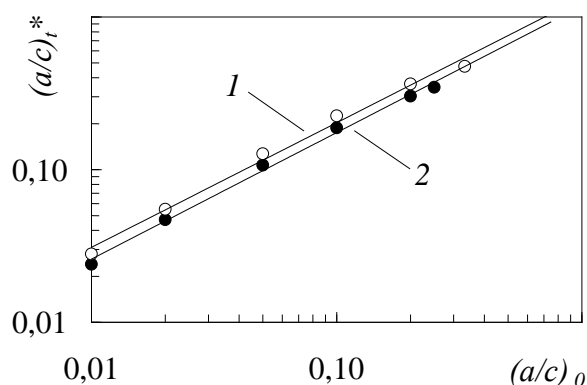
$$q_i = N_t^{max} / N_t^{min}, \quad (8)$$

де N_t^{max} та ΔN_t^{min} – відповідно кількість циклів, необхідних для наскрізного розвитку півеліптичних тріщини (табл. 5) в досліджуваному діапазоні $1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/3$.

Встановлено, що гранична форма півеліптичної тріщини в логарифмічній системі координат ((рис. 13, табл. 6) практично лінійно пов’язана з її початковою формою.

Аналіз взаємозв’язку між початковими та граничними формами півеліптичних

тріщин для досліджуваних магістральних газопроводів дає підстави стверджувати, що між ними існує певна критеріальна залежність, за якою можна інтерпретувати результати технічного діагностування та оцінити небезпечність виявлених дефектів та ризик їх руйнування.



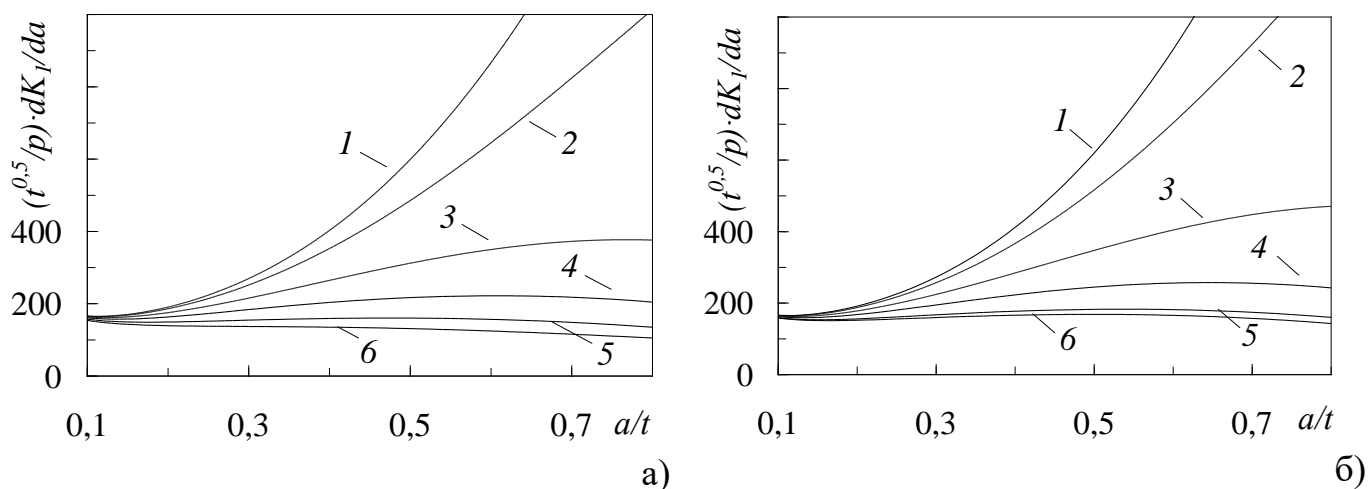
1 – повітря; 2 – середовище NS4
Рисунок 13 – Взаємозв'язок між початковими $(a/c)_0$ та граничними $(a/c)_i^*$ формами тріщин для труб магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна I нитка”

$$(a/c)_i = B \cdot ((a/c)_0)^m \quad (9)$$

Таблиця 6 – Значення констант та коефіцієнта кореляції (R^2) у залежностях (9) для досліджуваних систем

Система “метал труби – середовище”	B	m	R^2
17Г1С – повітря	1,33	0,82	0,99
17Г1С – NS4	1,18	0,83	0,99

Оцінювали також міцність та ризик руйнування газопровідних труб, на основі показника “опірності елемента конструкції (труби) поширенню тріщини”. Також, визначали глибину корозійно-втомної тріщини (рис. 14), тобто характерний для системи “метал труби – середовище” параметр $(a/t)^*$, починаючи з якого різко зростає швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I .



1 – $(a_{th}/c)_0 = 1/100$; 2 – $(a_{th}/c)_0 = 1/50$; 3 – $(a_{th}/c)_0 = 1/20$; 4 – $(a_{th}/c)_0 = 1/10$;
5 – $(a_{th}/c)_0 = 1/5$; 6 – $(a_{th}/c)_0 = 1/3$ (а) або 6 – $(a_{th}/c)_0 = 1/4$ (б)

Рисунок 14 – Порівняльне оцінювання небезпеки розвитку зовнішніх осьових півеліптичних тріщин різних форм $(a/c)_i$ у стінці труби магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна I нитка” на повітрі (а) та в середовищі NS4 (б)

Аналіз отриманих результатів, по-перше, засвідчує, що розвиток видовжених півеліптичних тріщин ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) відбувається за умови різкого зростання параметра (dK_I/da), тоді як для коротких півеліптичних тріщин ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$) параметр (dK_I/da) змінюється несуттєво. Як наслідок, за умови $(a/t)^* < (a_{th}/t)$ різко зростає швидкість поширення тріщини. Також із зменшенням співвідношення $(a/c)_i$ значення параметра $(a/t)^*$ знижується, що свідчить про зниження міцності сталі.

По-друге, тривалість експлуатації трубопроводів та середовище (NS4) суттєво впливають на швидкість поширення тріщин. Так, для металу газопроводу “Київ–Західна Україна” вона в 1,35 рази більша, ніж на повітрі.

Таким чином, видовжені півеліптичні тріщини ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) більш небезпечні за короткі з формою у вигляді корозійної виразки ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$).

Отже, встановлені у розділі результати дають можливість виокремити потенційно небезпечні та потенційно безпечні корозійно-втомні тріщини, оцінити кінетику їх розвитку та залишкову довговічність (кількість циклів до руйнування) газопроводу.

У п'ятому розділі вивчали вплив та можливість усунення впливу експлуатаційних дефектів та корозійного середовища на працездатність експлуатованих газопроводів. Експериментально досліджували накопичення втомних пошкоджень при циклічному пружно-пластичному деформуванні матеріалу газопровідних труб за жорсткою схемою навантажування консольним згином з амплітудами деформації $a = 3,5 \dots 4,8$ мм. Дослідження зразків із сталі 17Г1С, проводили за циклічної частоти $f = 3,0$ Гц та максимально допустимого рівня навантаженості газопроводу $\sigma_2^* = 368,0$ МПа (табл. 7).

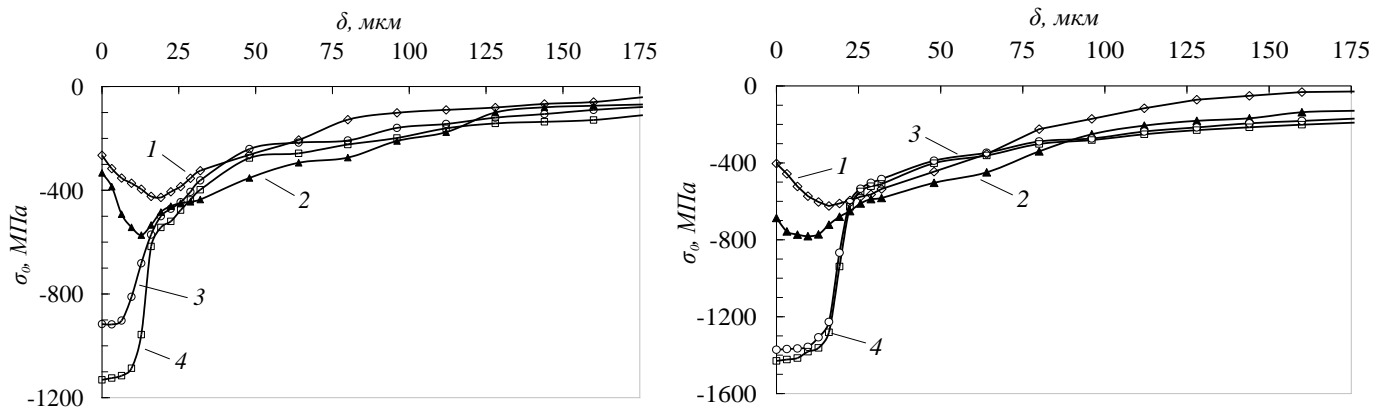
Проводили порівняльне досліджування експлуатованої газопровідної труби та труби запасу. Фрагмент труби (котушка $D_{зовн} = 1020$ мм, $t = 12$ мм) після 41 року експлуатації був вирізаний на ділянці між КС “Красилів” та КС “Тернопіль” з повністю заміненого дефектного переходу через автомобільну дорогу Тернопіль-Скалат та прилеглої ділянки загальною довжиною 127 метрів. Зразки та дослідне обладнання описано в другому розділі. За результатами експериментів визначали кількість циклів до руйнування досліджуваного фрагменту труби (табл. 7).

Таблиця 7 – Результати експерименту на втомну міцність фрагментів труб у досліджуваних середовищах

Стан експлуатації	Умови експерименту	Середовище	N, циклів	σ^* , МПа	Результат експерименту
нова	без концентратора	повітря	10001395	371,0	без руйнування
експлуатована	без концентратора	повітря	1000435	368,0	без руйнування
нова	з концентратором	повітря	758667	369,0	руйнування
експлуатована	з концентратором	повітря	707954	366,0	руйнування
нова	з концентратором	NS4	325648	369,0	руйнування
експлуатована	з концентратором	NS4	297034	367,0	руйнування

У розділі також експериментально визначали ступінь зміцнення поверхні фрагментів труб, вирізаних із нового та експлуатованого газопроводів (рис. 15, табл. 8).

Очищені і знежирені фрагменти труб піддавали піскоструменевій обробці на спеціальному комплексі термоабразивного очищення КТО-1. Для оброблення поверхні труб запасу вибирали такі часові режими: 15; 40; 70; 100 с, а для оброблення поверхні експлуатованих труб вибирали дещо більші часові режими: 25; 55; 90; 150 с. Поверхню трубопроводу обдували кварцовим піском, який проходив крізь спеціальне сопло діаметром 10 мм, розташоване на відстані 70 - 150 мм від зразка з кутом нахилу струменя піску до поверхні в межах $70^\circ - 90^\circ$. Пісок виходив крізь сопло під тиском, що змінювався в межах 0,5 - 0,55 МПа.



а) – 1 – 15 с; 2 – 40 с; 3 – 70 с; 4 – 100 с

б) – 1 – 25 с; 2 – 55 с; 3 – 120 с; 4 – 150 с

Рисунок 15 – Розподіл залишкових напружень в поверхневих шарах фрагментів нових (а) та експлуатованих (б) труб

Таблиця 8 – Результати експерименту на втомну міцність зміцнених при оптимальних режимах піскоструменевої обробки поверхневих фрагментів труб

Стан експлуатації	Умови експерименту	Середовище	N, циклів	σ^* , МПа	Результат експерименту
нова	з концентратором та піскоструменева обробка 40 с	NS4	2261847	366,0	руйнування
експлуатована	з концентратором та піскоструменева обробка 55 с	NS4	1981714	370,0	руйнування
нова	з концентратором, піскоструменева обробка 40 с, модифіковане покриття	NS4	5657412	364,0	руйнування
експлуатована	з концентратором, піскоструменева обробка 55 с, модифіковане покриття	NS4	5311374	367,0	руйнування

Також, на очищену і поверхнево зміцнену поверхню фрагментів досліджуваних труб, що містили концентратор напружень, наносили композицію, що складалась з бігумно-полімерної мастики та інгібітора "Г" у співвідношенні 1:0,05 мас.%. Для зміцнення поверхні газопроводів по шару модифікованої мастики додатково наклеювали ізоляційну стрічку. Завдяки запропонованому способу досягалося структурно-однорідне покриття з високими механічними показниками.

У результаті втомних випробувань у корозійному середовищі NS4 фрагментів як з труб запасу, так і експлуатованих труб, з концентратори напружень, зміцнених піскоструменевою обробкою поверхонь та оброблених спеціальною ґрунтівкою і модифікованою мастикою мало місце руйнування в обох випадках. Однак кількість циклів до руйнування поверхнево зміцнених та протикорозійно оброблених фрагментів досліджуваних труб у 2,5 рази більша від протикорозійно не оброблених (табл. 8).

Таким чином, запропоновано спосіб ремонту сталевих трубопроводів, який суттєво сповільнює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні газопровідних труб.

Окремі результати роботи прийнято для впровадження у виробничий процес у філії УМГ "Прикарпаттрансгаз" ПАТ "Укртрансгаз".

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації обґрунтовано і вирішено науково-технічну задачу, яка полягає у розробленні методики оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих магістральних газопроводів за підходами механіки руйнування та результатами їх технічної діагностики, а також розробленні на цій основі технології подовження їх працездатності. Отримано такі основні результати:

1. Одержано комплекс нових експериментальних даних про базові характеристики міцності та циклічної тріщиностійкості трубних сталей 17Г1С та 10Г2СД, що враховують вплив параметрів навантаження та експлуатаційного середовища. При цьому виявлено відчутний вплив корозійного середовища NS4 на швидкість поширення втомної тріщини у тривало експлуатованих трубопровідних сталях. Зокрема для сталі 17Г1С, як у повздовжньому ($k_c = 4,6$), так і в поперечному напрямках ($k_c = 8,3$), а також у повздовжньому ($k_c = 10,5$) для сталі 10Г2СД. Визначені характеристики опору руйнуванню металу тривало експлуатованих магістральних газопроводів вказують на наявність впливу корозійного середовища (NS4) у вершині тріщини на зону передруйнування, що зменшує його тріщиностійкість на 13,3 %.

2. Адаптовано розрахункову методику прогнозування розвитку тріщиноподібних дефектів напівеліптичної форми в стінці трубопроводу в залежності від величини внутрішнього тиску транспортованого продукту.

3. Встановлено закономірності подальшого розвитку та зміни форми діагностованих поверхневих тріщиноподібних дефектів у трубі магістрального газопроводу "Київ – Західна Україна І нитка".

Зокрема:

- встановлено умови, за яких можливе утворення корозійно-втомних тріщин, а також взаємозв'язок між пороговими глибинами та початковими формами тріщин, розміщених на зовнішній стінці труби магістральних газопроводів;

- оцінено кінетику розвитку тріщиноподібних дефектів і залишкову довговічність (кількість циклів до руйнування) газопроводу;

- середовище (NS4) суттєво впливає на швидкість поширення корозійно-втомних тріщин, зокрема для металу газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка” вона в 1,35 рази більша, ніж на повітрі;

- виокремлено потенційно небезпечні та потенційно безпечні осьові корозійно-втомні тріщиноподібні дефекти. Встановлено, що видовжені півеліптичні корозійно-втомні тріщини ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) більш небезпечні, ніж короткі тріщини з формою у вигляді корозійної виразки ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$). Також встановлено залежність граничних форм тріщин від параметра q , який показує, що видовжені ($(a/c)_i = 1/100$) півеліптичні корозійно-втомні тріщини на повітрі у 3,5 рази, а в середовищі NS4 у 4,7 разів швидше поширюються вглиб стінки труби порівняно із короткими ($(a/c)_i = 1/3$);

- встановлено залежність граничних розмірів та форми тріщин від порогових, яка дає можливість оцінити небезпечність діагностованих дефектів та інтерпретувати результати обстеження тривало експлуатованих газопроводів;

- обчислено руйнівні розміри $2c^*$ наскрізних повздовжніх тріщин у трубі. Так, для системи “17Г1С – повітря” вони рівні $2c^* = 240,9$ мм, а для системи “17Г1С – NS4” – $2c^* = 214,0$ мм відповідно. На цій основі запропоновано підходи до оцінювання можливості подальшої експлуатації дефектних трубопроводів.

4. Запропоновано спосіб ремонту сталевих трубопроводів, який суттєво сповільнює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні газопровідних труб.

Зокрема:

- визначено оптимальні параметри процесу зміцнення поверхні фрагментів труб, вирізаних із нового (труб запасу) та експлуатованого газопроводів. Встановлено, що кількість циклів до руйнування відповідно поверхнево зміцнених фрагментів труб запасу та експлуатованих труб в порівнянні із аналогічними не зміцненими фрагментами труб за однакових умов проведення експерименту в 6,9 рази, а експлуатованих – в 6,7 рази більша;

- встановлено, що кількість циклів до руйнування поверхнево зміцнених та оброблених протикорозійно досліджуваних фрагментів труб запасу більша в 2,5 рази від протикорозійно не оброблених, тоді як кількість циклів до руйнування аналогічних експлуатованих в 2,7 рази більші від поверхнево зміцнених, але не оброблених проти корозії фрагментів труб.

5. Окремі результати роботи відображені у методиці експрес прогнозування безпеки та умов руйнування тривало експлуатованих газопроводів, яку прийнято для впровадження у виробничий процес у філії УМГ “Прикарпаттрансгаз” ПАТ “Укртрансгаз”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Федорович І. Я., Барна Р. А. Оцінювання кінетики руйнування елементів експлуатованого газопроводу. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2015. Т.51, № 1. С. 13-19.
(Kryzhanivskyi E. I., Hrabovskiy R. S., Fedorovych I. Ya., Barna R. A. Evaluation of the Kinetics of Fracture of Elements of a Gas Pipeline After Operation. *Materials Science*. 2015. 51, № 1. P.7-14.) (Scopus).
2. Крижанівський Є. І., Полутренко М. С., Федорович Я. Т., Рудко В. В., Федорович І. Я. Відновлення протикорозійного захисту підземних газонафтопроводів в сильномінералізованих ґрунтах. *Нафтогазова енергетика*. 2011. №1(14). С.34-38.
3. Грабовський Р. С., Федорович І. Я. Оцінка умов експлуатації газопроводу з експлуатаційними дефектами. *Машинознавство*. 2013. №9-10 (195-196). С. 29-34.
4. Крижанівський Є. І., Полутренко М. С., Федорович Я. Т., Федорович І. Я., Квич В. І. Оцінка впливу якості підготовки поверхні нафтогазопроводів на стійкість до відшарування протикорозійних покриттів в умовах катодної поляризації. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 2 (52). С. 7-13.
5. Грабовський Р. С., Барна Р. А., Мазур М. П., Федорович І. Я., Лепак О. М. Визначення характеристик тріщиностійкості металу трубопроводів тривалої експлуатації. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2014. №1 (25). С. 63-76.
6. Грабовський Р. С., Лепак О. М., Мазур М. П., Федорович І. Я., Барна Р. А. Оцінка умов руйнування трубопроводів тривалої експлуатації. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2015. №1 (38). С. 46-53.
7. Полутренко М. С., Федорович І. В., Боднарук І. Л., Федорович І. Я. Підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації підземних газопроводів. *Нафтогазова енергетика 2015*. №1 (23). С.25-31.
8. Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Федорович І. Я., Лепак О. М. Оцінювання небезпеки руйнування магістральних нафтогазопроводів у залежності від форми поверхневих тріщиноподібних дефектів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. №1 (40). С.20-30.
9. Федорович І. Я. Оцінка характеристик опору поширення корозійно-втомних тріщин тривало експлуатованого металу місцевого газопроводу. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2017. №2 (38). С. 253-266.
10. Грабовський Р. С., Федорович І. Я. Оцінка характеристик опору поширення корозійно-втомних тріщин тривало експлуатованого металу газопроводу. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей 3 Міжнар. наук-техн. конф. (Львів, 7-9 лист. 2012 р.)*. Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2012. С. 58-60.
11. Полутренко М. С., Федорович Я. Т., Федорович І. Я. Оцінка впливу якості підготовки поверхні трубопроводів перед нанесенням протикорозійних покриттів і умовах катодної поляризації. *Нафтогазова енергетика 2013: Матеріали 4 Міжнар. наук.-техн. конф. (Івано-Франківськ, 7-11 жовт. 2013 р.)*. Івано-Франківськ, 2013. С. 446-448.

12. Полутренко М. С., Федорович Я. Т., Федорович І. Я., Боднарук І. Л. Забезпечення екологічної безпеки експлуатації підземних газопроводів. *Нафтогазова освіта і наука: стан та перспективи*: Матеріали Міжнар. наук-техн. конф. (Івано-Франківськ, 10-12 груд. 2014 р.). Івано-Франківськ, 2014. С. 248-250.

13. Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Федорович І. Я. Прогнозування кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів у стінках тривало експлуатованих газопроводів. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*: Зб. праць під заг. ред. В. В. Панасюка 5 Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 24-27 черв. 2014 р.). Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 2014. С. 779-782.

14. Федорович І. Я. Оцінка кінетики розвитку тріщиноподібних дефектів у стінках тривало експлуатованого газопроводу „Київ–Західна Україна”. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій*: Тези доповідей 4 Міжнар. наук-техн. конф. (Львів, 30-31 жовт. 2014 р.). Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2014. С. 92-93.

15. Федорович І. Я., Лепак О. М. Експрес-оцінка умов потенційного руйнування дефектних трубопроводів. *Нафтогазова енергетика 2015*: Матеріали 4 Міжнар. наук-техн. конф. (Івано-Франківськ, 21-24 квіт. 2015 р.). Івано-Франківськ, 2015. С. 58-60.

16. Грабовський Р. С., Федорович І. Я., Лепак О. М. Прогнозування працездатності тривало експлуатованих нафтогазопроводів. *Нафтогазова енергетика 2017*: Матеріали 6 Міжнар. наук-техн. конф. (Івано-Франківськ, 15-19 трав. 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 351-352.

17. Пат. 84769 Україна. Спосіб ремонту сталених трубопроводів. Опубл. 25.11.2008.

АНОТАЦІЯ

Федорович І. Я. Оцінювання небезпеки руйнування магістральних газопроводів з виявленими поверхневими тріщиноподібними дефектами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дисертація присвячена проблемам розроблення методики оцінювання умов руйнування тривало експлуатованих магістральних газопроводів за підходами механіки руйнування та результатами їх технічної діагностики, а також розроблення на цій основі технології продовження терміну їх експлуатації.

Одержано нові експериментальні дані про зміну характеристик циклічної тріщиностійкості газопровідних сталей залежно від сумісного впливу тривалості часу експлуатації та корозійних середовищ. На основі проведених досліджень виявлено в поперечному перерізі труби магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка” більш прискорений розвиток втомної ($k_{\perp} = 1,3$) та корозійно-втомної тріщин ($k_{\perp} = 2,4$) ніж у осьовому (повздожньому) напрямку.

Адаптовано розрахункову методику прогнозування розвитку тріщиноподібних дефектів напівеліптичної форми в стінці трубопроводу в залежності від величини внутрішнього тиску газу і на цій основі встановлено закономірності подальшого

розвитку та зміни форми діагностованих поверхневих тріщиноподібних дефектів у трубі магістрального газопроводу “Київ – Західна Україна І нитка”. Обґрунтовано, що видовжені півеліптичні корозійно-втомні тріщини ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) більш небезпечні ніж “короткі” з формою у вигляді корозійної виразки ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$).

Запропоновано залежність граничних розмірів та форми тріщин від порогових (початкових), яка дає можливість оцінити небезпечність діагностованих дефектів та інтерпретувати результати обстеження тривало експлуатованих газопроводів.

Запропоновано спосіб ремонту сталевих газопроводів, який суттєво ускладнює утворення втомних та корозійно-втомних тріщин на оброблюваній поверхні цих труб.

Ключові слова: газопроводи, втомне навантаження, корозійне середовище, тріщиноподібні дефекти, корозійно-втомні тріщини, коефіцієнт інтенсивності напружень, швидкість поширення тріщини, допустима глибина тріщиноподібних дефектів, критична довжина наскрізної тріщини, руйнівний тиск.

АННОТАЦІЯ

Федорович І. Я. Оценка опасности разрушения магистральных газопроводов с выявленными поверхностными трещиноподобными дефектами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2018.

Диссертация посвящена проблемам разработки методики оценки условий разрушения длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов согласно подходов механики разрушения и результатами их технической диагностики, а также разработка на базе этой технологии и продления термина их эксплуатации.

Получены новые экспериментальные данные об изменении характеристик циклической трещиностойкости газопроводных сталей в зависимости от совместного влияния длительности времени эксплуатации и коррозионных сред. По результатам проведенных исследований выявлен в поперечном разрезе трубы магистрального газопровода “Киев -Западная Украина I нить” выявлено более ускоренное развитие усталостной ($k_{\parallel} = 1,3$) и коррозийно-усталостной трещин $k_{\parallel} = 2,4$, чем в осевом (продольном) направлении.

Адаптирована расчетная методика прогнозирования развития трещиновидных дефектов полуэллиптической формы в стенке трубопровода в зависимости от величины внутреннего давления газа и установлены закономерности дальнейшего развития и изменения формы диагностированных поверхностных трещиновидных дефектов в трубе магистрального газопровода. Обосновано, что удлиненные полуэллиптические коррозийно-усталостные трещины ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) опаснее коротких в виде коррозийной язвы ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$).

Предложена зависимость предельных размеров и формы трещин от пороговых (начальных), которая позволяет оценить степень опасности диагностированных дефектов и интерпретировать результаты обследования длительно эксплуатируемых

газопроводов.

Предложен способ ремонта стальных газопроводов, который существенно усложняет образование усталостных и коррозионно-усталостных трещин на обрабатываемой поверхности этих труб.

Ключевые слова: газопроводы, усталостная нагрузка, коррозионная среда, трещиновидные дефекты, коррозионно-усталостные трещины, коэффициент интенсивности напряжений, скорость роста трещины, допустимая глубина трещиновидных дефектов, критическая длина сквозной трещины, разрушающее давление.

SUMMARY

I. Fedorovych. Estimation of the danger of the main gas pipelines with detected surface crack-like defects destruction. - The manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.15.13 - pipeline transport, oil and gas storage. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The dissertation focuses on problems of the development of a method for assessing the conditions of long operating main gas pipelines destruction in accordance with the approaches of fracture mechanics and the results of their technical diagnostics, as well as the development of technology on the basis of continuing their performance on this basis.

The methodical procedure for studying fragments of exploited pipes of gas pipelines with the laid technology of their production has been developed and experimental means for determining the characteristics of cyclic corrosion cracking resistance of base metal and metal of the zone of thermal influence of weld seam have been adapted, taking into account the effect of groundwater. New experimental data on changes in the characteristics of the cyclic fracture resistance of gas-fired steels are obtained, depending on the combined effect of the duration of operating time and corrosion media. On the basis of the conducted researches, in the cross section of the pipe of the main gas pipeline "Kyiv - West Ukraine I thread" more accelerated development of fatigue ($k_{II}=1,3$) and corrosion-fatigue cracks ($k_{II}=2,4$) than in the axial (longitudinal) direction. The sizes of zones of thermal influence for the pipe of the main gas pipeline "Kyiv - West Ukraine I thread" are determined and the metal zone of thermal influence of welded joints is more sensitive to the development of fatigue and corrosion-fatigue cracks compared to the main metal of the gas pipe. Significant influence of corrosive environment NS4 (ground water model), on the rate of fatigue crack propagation in prolonged exploited pipeline steels was revealed.

The calculation method for predicting the development of crack-like defects of semi-elliptical shape in the pipeline wall is adapted, depending on the internal pressure of the gas, and on this basis the regularities of the further development and change of the shape of the diagnosed surface cracked defects in the pipe of the main gas pipeline "Kyiv - Western Ukraine I thread" are established. It is substantiated that extended semielliptical corrosion-fatigue cracks ($1/100 \leq (a/c)_i \leq 1/20$) are more dangerous than "short" ($1/10 \leq (a/c)_i \leq 1/3$) in the form of a corrosive ulcer.

The dependence of the limiting sizes and the shape of the cracks from the threshold (initial) is proposed, which makes it possible to assess the danger of the diagnosed defects and interpret the results of the survey of long exploited gas pipelines.

For the results of experimental and design studies, the destructive dimensions of semi-elliptic cracks are calculated taking into account the initial form of semielliptical operational defects and using the method of analytical-numerical estimation of kinetics and changes in the shape of corrosion-mechanical cracks defects in the process of their development in the pipe wall. It is established that for system for “17G1C – air” system $2c^*=240,9$ mm, for system “17Г1С – NS4” $2c^*=214,0$ mm. The critical dimensions of the cross-sectional crack for the pipe ($D=1020$ mm, $t=14$ mm) of the automobile transition on the site between the Krasyliv and KP “Ternopil” of the explored main gas pipeline “Kyiv - Western Ukraine I thread” were calculated according to the criterion of crack resistance. In particular, “17Г1С – air” $2c_c=246,8$ mm, for the system “17Г1С – NS4” $2c_c=220,0$ mm.

The technique for testing the fatigue strength of fragments of gas pipelines has been adapted, as well as a technique and experimental equipment for determining the normal residual stresses of the first kind in the surface layers of the strengthened surface of fragments of these pipes.

It was investigated that the condition of the surface of gas pipelines significantly affects their efficiency. In particular, the impact of the stress concentrator more than an order of magnitude compared with the given experiment base reduces the number of cycles to fracture of the investigated fragments of gas pipelines, and the corrosive environment NS4 more than doubles the number of cycles to the destruction of the investigated fragments of pipes.

The influence of surface treatment on the durability of pipe elements under conditions of maximum allowable loading of the gas pipeline and the optimal parameters of strengthening the surface of fragments of gas pipelines have been experimentally determined. It is established that the number of cycles before the destruction of surface-strengthened pipe fragments increases by almost 7 times in comparison with similar unshielded fragment tubes for other similar conditions of the experiment.

It was established that the number of cycles prior to the destruction of superficially strengthened and treated corrosion-resistant fragmentation of the stock pipes is 2,5 times larger than anti-corrosion-free anticorrosion corrugated pipe fragments.

The method of repair of steel gas pipelines is proposed, which significantly impedes the formation of fatigue and corrosion-fatigue cracks on the treated surface of these pipes.

Based on the results of technical diagnostics and calculations for the long-running operated pipeline “Pasichna – Dolyna”, the value of destructive pressure was determined and both safe and inadmissible defect-mosque areas were determined, as well as a transition zone in which the operation of the gas pipeline without carrying out repair work to eliminate existing crack-like defects It is possible only if the working pressure is lowered. It is substantiated, taking into account the size of crack-like corrosion-mechanical defects and the speed of their maximum development, the correct reduction of working pressure at the second stage of operation.

Keywords: gas pipelines, fatigue loading, corrosive environment, crack-like defects, corrosion-fatigue crack, stress intensity factor, crack growth rate, permissible depth of cracks defects, critical crack length, failure pressure.