

622.692.4(043)

Б23

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

**БАНАХЕВИЧ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**



УДК 622.692.4 (043)

Б23

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ  
ДЛЯНОК НАФТОГАЗОПРОВІДІВ З ДЕФЕКТАМИ ЗА  
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ**

Спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2011

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий консультант** доктор фізико-математичних наук, професор *Осадчук Василь Антонович*, Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор *Капцов Іван Іванович*, ДК “Укргазвидобування”, філія українського науково-дослідного інституту природних газів “УкрНДДГаз”, Харків, завідувач відділу транспорту газу;

доктор фізико-математичних наук, професор член-кореспондент НАН України *Красовський Арнольд Янович*, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України Київ, старший науковий співробітник;

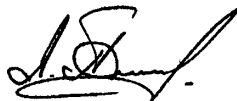
доктор технічних наук, професор *Никифорчин Григорій Миколайович*, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, завідувач відділу.

Захист відбудеться *30 червня* 2011 р. о 10 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019.

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

Автореферат розісланий «*25*» травня 2011 р.

**Вчений секретар**  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент



Пилипів Л.Д.



an2180

**ь теми.** Безпечення надійної експлуатації магістральних нафтогазопроводів стало однією із найважливіших загальнодержавних задач, оскільки аварії трубопроводів можуть спричинити величезні економічні і екологічні збитки народному господарству. Сьогодні в Україні експлуатується значна кількість магістральних трубопроводів (МТ), термін служби яких перевищує 20–30 років. Їх експлуатація в умовах дії зовнішніх силових навантажень, перепадів температур, залишкових технологічних, зокрема зварювальних, напружень, циклічної зміни експлуатаційного тиску, протікання корозії тощо призводить до виникнення різного роду дефектів у матеріалі труб, найнебезпечніші з яких – тріщини. Тому гостро постає проблема комплексної діагностики технічного стану трубопроводів, оцінки їх залишкового ресурсу і розробки ефективних технологій ремонту та відновлення пошкоджених ділянок.

В існуючій практиці оцінки залишкового ресурсу МТ помітна тенденція переходу від дефектоскопії до методів технічної діагностики, які поєднують механіку руйнування, металознавство і неруйнівний контроль. Відомі методи оцінки напруженого стану, міцності і довговічності МТ тривалої експлуатації з дефектами не враховують окремі особливості умов експлуатації. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення існуючих і створення нових методів і засобів діагностування напруженого стану і оцінки залишкової міцності і довговічності МТ, які дали б змогу брати до уваги такі важливі умови експлуатації нафтогазопроводів, як: двовісне і двочастотне силове навантаження, період зародження тріщини біля концентраторів напружень, вплив корозивно агресивних і водневовмісних середовищ, вологого сірководню, випадковості навантажень, змінних за довжиною і товщиною труби залишкових напружень у зонах зварних з'єднань, які сприяють зменшенню їх міцності і довговічності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконано в рамках програми “Нафта і газ України до 2010 року”, регіональної програми “Визначення залишкового ресурсу конструкцій, споруд і машин тривалої експлуатації та розробка заходів щодо підвищення терміну їх безаварійної роботи” та ДБ/ОКТЕ “Розроблення методів та засобів визначення напруженого стану різновисинних зварних з'єднань оболонкових конструкцій тривалої експлуатації”, 2008–2009рр., номер держреєстрації 0108U000338; госпдоговору №0318 “Створення математичної моделі і експериментального устаткування для визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань ділянок газопроводів, прилеглих до компресорних станцій” 2009 р.; ДБ/МТ “Розроблення методів діагностування напруженого стану зварних з'єднань труб нафтогазопроводів з великою різницею товщин стінок і оцінки запасу міцності різновисинних з'єднань з гострокінцевими дефектами”, 2010–2011рр., номер держреєстрації 0110U001115, де дисертант був керівником, відповідальним виконавцем і виконавцем робіт.

**Мета і задачі дослідження** – розробка наукових основ визначення напруженого стану і прогнозування залишкової міцності та довговічності труб і

зварних з'єднань з тріщиноподібними дефектами на базі розвитку існуючих і створення нових методів оцінки їх роботоздатності.

Для досягнення поставленої в роботі мети необхідно розв'язати такі наукові задачі, спрямовані на вирішення важливої проблеми – забезпечення безаварійного функціонування трубопровідного транспорту:

- побудувати критеріальні співвідношення для визначення циклічної міцності ділянок трубопроводів з тріщинами та оцінки їх залишкового ресурсу з урахуванням випадковості навантаження в експлуатаційних умовах та дії двовісного двочастотного навантаження;

- дослідити закономірності впливу концентраторів напружень на період зародження і докритичного розвитку корозійно-механічної тріщини на поверхнях трубопроводів тривалої експлуатації;

- встановити залежності впливу на залишковий ресурс трубопроводу зародження та розвитку блістерів в умовах дії вологого сірководню з використанням запропонованої моделі кінетики їх поширення;

- визначити вплив геометричних параметрів тріщиноподібного дефекту на залишковий ресурс балкового переходу газопроводу за вітрового навантаження на основі розробленої моделі розрахунку періоду зародження і докритичного росту втомних тріщин;

- оцінити вплив геометрії тріщиноподібних дефектів та їх розміщення на коефіцієнти запасу міцності конкретних ділянок трубопроводів з тріщинами у зварних з'єднаннях з урахуванням змінних вздовж труби і за її товщиною залишкових напружень на основі розробленої методики;

- встановити значення усереднених на поверхні тріщини колових залишкових напружень і їх вплив на критичну кількість циклів навантаження труби внутрішнім тиском для прогнозування залишкового ресурсу зварних з'єднань трубопроводів з дефектами на основі запропонованих методик.

*Об'єктом дослідження* є магістральні трубопровідні системи з тріщиноподібними дефектами і процеси їх руйнування за тривалих квазістатичних і циклічних навантажень.

*Предметом дослідження* є залишкова міцність і довговічність труб магістральних трубопроводів та їх зварних з'єднань з тріщиноподібними дефектами, що в експлуатаційних умовах зазнають дії двочастотних і двовісних змінних силових навантажень, зварювальних залишкових напружень, корозивно-агресивних і водневовмісних середовищ.

*Методи досліджень.* Дослідження ґрунтуються на застосуванні методів і критеріїв механіки руйнування, першого закону термодинаміки для оцінки енергетичного балансу поширення втомних тріщин за змінних у часі навантажень, методів фізико-хімічної механіки руйнування з урахуванням сумісної дії експлуатаційних навантажень та корозивно агресивних і водневовмісних середовищ, теорії оболонок, прямого методу інтегрування рівнянь для тривісного розподілу залишкових напружень, інтегральних перетворень, багатопараметричної апроксимації і числового розв'язку нелінійних інтегральних

рівнянь, розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень, неруйнівного визначення характеристик напруженого стану, двокритеріального визначення граничного стану трубопроводів.

**Положення, що виносяться на захист:**

- Закономірності впливу змінного в часі двовісного навантаження на зародження і ріст втомних тріщин в трубопроводах за наявності концентраторів напружень та корозивно-агресивних і водневовмісних середовищ з метою розроблення моделей та методології прогнозування їх залишкового ресурсу в реальних умовах експлуатації.

- Залежності коефіцієнтів запасу міцності у зварних з'єднаннях з дефектами типу тріщин від рівня та градієнтів залишкових напружень ділянок трубопроводів.

- Закономірності впливу змінних за товщиною і довжиною труби залишкових напружень на довговічність ділянки трубопроводу з поверхневою тріщиною у зварному шві.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у побудові критерію циклічної міцності елементів трубопроводу з тріщинами, що дає можливість визначати такі параметри циклічного навантаження, за яких забезпечується заданий ресурс експлуатації. Також розроблено розрахункову модель для визначення періоду зародження втомної тріщини біля сплюсненого концентратора напружень на поверхні трубопроводу. Це дало змогу оцінити залишковий ресурс балкового переходу газопроводу з таким дефектом за його вітрового навантаження.

Встановлено вплив корозивно-агресивних і водневовмісних середовищ на міцність і довговічність газопроводів шляхом прогнозування росту корозійно-механічної тріщини в трубопроводах, виготовлених з високопластичних і високоміцних матеріалів, та визначення залишкового ресурсу труби газопроводу з дефектом в умовах дії вологого сірководню на основі створення математичних моделей.

Отримано співвідношення, за якими вдалось кількісно оцінити вплив осьової компоненти на довговічність поверхневої (вздовж твірної) тріщини за циклічного навантаження труби внутрішнім тиском, а також вирази для кількісної оцінки відомих у літературі експериментальних результатів про значне скорочення циклічної довговічності на стадії розвитку втомної тріщини внаслідок накладання високочастотної компоненти з невисокою амплітудою на низькочастотну. При цьому наслідок дії такого накладання перевищує результати простого додавання амплітуд цих компонент.

На основі аналізу тривісних залишкових напружень і деформацій у зонах кільцевих зварних швів магистральних трубопроводів і створеної математичної моделі знайдено розподіл залишкових несумісних деформацій.

Вперше отримано замкнуті формули для обчислення коефіцієнтів запасу міцності (КЗМ) ділянок трубопроводів з тріщинами у зварних з'єднаннях з урахуванням змінних вздовж труби і за її товщиною залишкових напружень. Оцінено вплив цих напружень на статичну міцність ділянки трубопроводу з поверхневими тріщинами у зварному шві і згідно з нормативними документами встановлено категорійність їхньої небезпеки. В рамках концепції ефективного розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) з урахуванням

закриття тріщини розроблено методу оцінки впливу залишкових напружень на довговічність ділянки трубопроводу з поверхневою тріщиною у зварному шві. Для конкретного зварного з'єднання побудовано діаграми для визначення критичної кількості циклів навантаження внутрішнім тиском для довільних рівнів усереднених по поверхні тріщини колових залишкових напружень.

**Достовірність отриманих результатів і висновків** забезпечується використанням фундаментальних положень фізики і механіки руйнування конструкційних матеріалів, застосуванням сучасних числових методів розрахунку, коректною постановкою експериментальних досліджень, зіставленням деяких часткових і узагальнених результатів із відомими, застосуванням в експериментальних дослідженнях сучасних засобів вимірювання і оброблення результатів експериментів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Сформульовано критерій циклічної міцності тонкостінних елементів конструкцій і з його використанням знайдено параметри безпечного циклічного навантаження труб з тріщинами, зокрема, труби нафтопроводу за реальних умов навантаження. Запропоновано спосіб визначення залишкового ресурсу балкового переходу газопроводу з дефектом за вітрового навантаження.

Запропоновано методику для визначення періоду докритичного росту втомних тріщин за двовісного і двочастотного навантаження і побудовано метод розрахунку залишкового ресурсу труби нафтопроводу з внутрішньою поверхневою тріщиною з урахуванням реальних умов експлуатації. Це дало змогу розрахувати довговічність реальної ділянки трубопроводу з тріщинами.

Оцінено вплив параметрів, що характеризують ширину зон локалізації і градієнтів за довжиною і товщиною труб термопластичних деформацій, на рівень і розподіл залишкових напружень у зонах кільцевих зварних швів трубопроводів.

Проаналізовано зміну рівнів КЗМ для різних глибин і довжин тріщин і відповідно до цього згідно з нормативними документами встановлено категорійність їхньої небезпеки. Побудовано діаграми для визначення критичної кількості циклів навантаження внутрішнім тиском для довільних рівнів усереднених по поверхні тріщини колових залишкових напружень. Отримані в дисертації результати увійшли в Положення про "Діагностування напружено-деформованого стану і оцінка довговічності зварних з'єднань ділянок газопроводів, прилеглих до компресорних станцій" ДК Укртрансгаз і в "Методику розрахунку оцінки впливу залишкових напружень на міцність ділянок нафтопроводів з дефектами в зоні зварних з'єднань труб", Львів – 2010.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати отримані дисертантом самостійно. У працях, написаних у співавторстві [25, 26, 51], автор запропонував методи оцінки критичних розмірів дефектів у трубах нафтогазопроводів за експлуатаційних навантажень, а у працях [7, 10, 15, 17, 18, 22, 27, 28, 44, 47, 50, 52] – підхід для дослідження процесів руйнування металічних матеріалів за дії силових і фізико-хімічних факторів, а також визначення за цих обставин залишкового ресурсу. Низку розрахункових методів для визначення періодів докритичного росту тріщини в стінці труби газопроводу до їх розгерметизації за його експлуатаційних механічних, воднево-механічних навантажень та фізико-хімічних факторів подано у працях [16, 29, 41, 42, 53], а у [6, 24, 40] розвинуто теоретико-експериментальний метод, для оцінки напруженого стану в зонах зварних

з'єднань трубопроводів. У працях [4, 9, 13, 14, 20, 43, 46, 48] дисертант взяв участь в обговоренні постановки задачі, оцінці одержаних результатів їх апробації у виробничих умовах, у [1-3, 5, 8] – узагальнив проблеми, пов'язані з протикорозійним захистом зовнішніх і внутрішніх поверхонь магістральних нафтогазопроводів і сформував рекомендації із застосування сучасних ізоляційних матеріалів і технологій з урахуванням підземної, надземної і підводної експлуатації трубопроводів. У публікаціях [30-39] автор, узагальнюючи теоретичні і експериментальні результати, запропонував низку конструкційних і технологічних рішень, новизна яких захищена патентами.

Здобувач брав безпосередню участь у плануванні і проведенні усіх експериментальних досліджень і натурних випробувань та аналізі їх результатів, розробці практичних рекомендацій щодо підвищення рівня надійності потенційно небезпечних ділянок діючих нафтогазопроводів та їх впровадженні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на: III Міжнародній конференції з діагностування “Diagnostics-2004” (Республіка Польща, 2004); VIII Науково-практичній конференції “Нафта і газ України – 2004” (Судак, 2004); XIV Міжнародній діловій зустрічі “Диагностика-2004” (Стилет, 2004); III Міжнародній конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій” (Львів, 2004); Науково-практичному семінарі “Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике” (Київ, 2004); VII Міжнародній науково-технічній конференції “Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów” (Республіка Польща, 2005); XV Міжнародній діловій зустрічі “Диагностика-2005” (Сочі, 2005); V Науково-практичній конференції (Стилет, 2007); Науково-практичній конференції “Екологічні проблеми нафтогазового комплексу” (с. Синяк, 2007); 37-й Міжнародній конференції “Defektoskopie 2007” (Чехія, 2007); Міжнародній науково-технічній конференції “ІФНГУНГ-40” “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці” (Івано-Франківськ, 2007); XIV колоквиумі “Механічна втома металів” (Болгарія, 2008); Міжнародній науково-практичній конференції “Міцність та надійність магістральних трубопроводів” (Київ, 2008); IV та V Міжнародних науково-технічних конференціях і виставках “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання” (Івано-Франківськ, 2005, 2008); Міжнародній конференції “Pipeline Technology 2009” (Бельгія, 2009); IV Міжнародній конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій” (Львів, 2009); VII; VIII та IX Міжнародних симпозиумах українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2005, 2007, 2009); Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи” (Івано-Франківськ, 2009); науково-технічній нараді “Підвищення надійності та ефективності роботи лінійної частини магістральних газопроводів газотранспортної системи ДК “Укртрансгаз” (Яремче, 2010).

У повному обсязі результати досліджень доповідались на розширеному засіданні кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій Національного університету “Львівська політехніка” (головуючий – д.т.н., професор М.В. Большаков); розширеному семінарі відділу міцності зварних конструкцій Інституту електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України (керівник – зав. відділу міцності зварних конструкцій Інституту електрозварювання, член-кор. НАН України, д.т.н. В.І. Кир'яні);

розширеному науковому семінарі факультету нафтогазопроводів ІФНТУНГ (керівник – д.т.н., професор, зав. кафедри спорудження і ремонту газонафтопроводів та газонафтосховищ В.Я. Грудз).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 53 наукові праці [1–53], у тому числі 25 – у фахових наукових виданнях [4–27] та одержано 10 патентів України на винаходи і корисні моделі, решта – у збірниках праць та тезах конференцій.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, які містять 135 рисунків і 12 таблиць, висновків, а також п'яти додатків та списку літератури, що має 373 найменування. Загальний обсяг дисертації 314 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито її сутність і стан досліджень, сформульовано мету дисертаційного дослідження, аргументовано її новизну, наукове та практичне значення, наведено дані про апробацію отриманих результатів і про публікації, які відображають основний зміст роботи.

**У першому розділі** проаналізовано методи сучасного діагностування напруженого стану, залишкової міцності та довговічності магістральних нафтогазопроводів з дефектами та визначені основні задачі дослідження. Показано, що розв'язанню широкого кола теоретичних і практичних задач проектування, будівництва, експлуатації і діагностування технічного стану трубопроводів присвячені праці відомих спеціалістів А.Б. Айбіндера, В.П. Березіна, Б.С. Білобрана, П.П. Бородавкіна, В.Я. Грудза, І.І. Капцова, С.І., Крижанівського, І.В. Ориняка, Й.В. Перуна, Ю.Д. Петрини, А.О. Рибаківа, М.Д. Середюк, Д.Ф. Тимківа, Л.С. Шлапака та інших. Технічне діагностування технологічних напружень у зварних з'єднаннях конструкцій і споруд висвітлено в працях В.А. Вінокурова, К.М. Гатовського, Б.С. Касаткіна, В.І.Кирияна, В.В. Книша, А.Я. Недосеки, Г.А. Ніколаєва, Л.М. Лобанова, В.І. Махненка, В.А.Осадчука, Я.С. Підстригача, В.М. Прохоренка, Т.В. Талипова, І.П. Трочуна та інших. Фундаментальні дослідження з теорії граничної рівноваги тіл з тріщинами, за результатами яких сформульовані деформаційні критерії граничної рівноваги тіл з тріщинами, визначали: М.Я. Леонов, В.В. Панасюк, П.М. Витвицький, О.С. Андрейків, Н.А. Махутов, Ю. Муракамі, П.С. Періс, Дж. Ірвін та інші. Розв'язанню задач математичної теорії тріщин (обчислення КІН) та експериментальним методам визначення тріщиностійкості матеріалів присвячені праці: І.М. Дмитраха, О.М. Гудзя, С.С. Ковчика, А.Я. Красовського, Г.М. Никифорчина, О.М. Романіва, М.П. Саврука, В.Р. Скальського, С.Я. Яреми, В.Т. Трощенко, В.І. Труфякова та інших.

Підсумовано, що регламентовані у нормативних документах і нині діючі розрахункові методи оцінки напруженого стану і прогнозування залишкової



міцності та довговічності труб і зварних з'єднань МТ розвинуті недостатньо і потребують нових підходів з урахуванням досягнень сучасної науки з руйнування матеріалів, а також числових методів розрахунку напруженого стану елементів конструкцій.

У другому розділі дисертаційної роботи запропоновано критерій оцінки циклічної міцності тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами за двовісного їх розтягу. Його суть полягає в тому, що враховується пластичність матеріалу, яка виникає біля вершини тріщини за дії осьової і нормальної компонент напруженого стану, тобто береться до уваги умова пластичності Губера–Мізера. Раніше подібні задачі були розв'язані для крихких і квазікрихких високоміцних матеріалів, де цього не враховували.

Спочатку на основі  $\delta_c$ -моделі розкриття вершини тріщини, що є функція кутів  $\alpha$  і  $\theta$ , визначали через нормальний і дотичний розкриття тріщини. Встановлено аналітичні залежності (1) для визначення зовнішніх критичних зусиль  $p_*$  (колові напруження) і  $q_*$  (напруження прикладені вздовж осі труби), за досягнення яких настане гранично рівноважний стан пластини із тріщиною і відбудеться її поширення:

$$p_* = \left( \frac{\delta_c E \sigma_T}{\pi l_0} \right)^{1/2} \left[ -0,5\xi + \sqrt{1 - 0,75\xi^2} \right]^{1/2}; \quad (1)$$

$p_{0*} = p_*(\pi l_0)^{1/2} (\delta_c E \sigma_T)^{-1/2}$ ;  $q_* = p_* \eta$ ;  $\eta = qp^{-1}$ , де  $l_0$  – півдовжина тріщини;  $E$  – модуль Юнга;  $\delta_c$  – критичне розкриття вершини тріщини;  $\sigma_T$  – межа текучості матеріалу. Визначено взаємовплив прикладених зовнішніх навантажень (рис. 1) і отримано як граничні випадки найнебезпечніші орієнтації тріщини, коли домінує одно із них. Якщо  $p > q$ , таким кутом є  $\theta = \pi/2$ , а у випадку  $q > p$  – кут  $\theta = 0$ .

У цьому ж розділі методом граничної інтерполяції із використанням методу еквівалентних напружених станів побудовано вирази (2) для визначення КІН  $K_I$  біля напівкільцевої тріщини, яка зароджується з напівкульової порожнини, через величину розкриття її вершини  $\delta(\varphi)$ , що дозволило змоделювати розвиток руйнування трубопроводів з поверхневих корозійних виразок (ямок):

$$\delta(\varphi) \approx 2\pi\sigma_0 E^{-1} (1 - \nu^2) (1 - \sqrt{1 - \eta^2}) [2,2430 - \lambda^{0,5} (1,5430 + 0,1273 \sin \varphi - 0,0637 \sin^2 \varphi)]^2, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль пружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_0$  – усереднене напруження в зсні передруйнування біля контуру тріщини;  $\varphi$  – кут в циліндричній системі координат;  $\lambda = l/R$ ,  $l$  – глибина тріщини;  $R$  – зовнішній радіус труби.

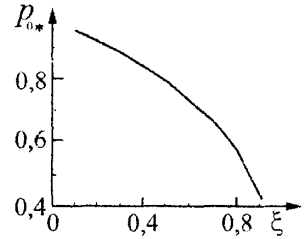


Рис. 1. Залежність критичних зусиль  $p_{0*}$  від безрозмірного параметра  $\xi$  ( $\xi = q\sigma_T^{-1}$ )

У розділі розглянуто також випадки, коли присутні системи паралельних і колінеарних тріщин, і побудовано формули для розрахунку силових критеріїв руйнування з урахуванням їх взаємовпливу. Далі, виходячи з того, що на поверхні трубопроводів втомні тріщини можуть зароджуватися з гладких поверхневих дефектів (пітинги, корозійні виразки тощо), сформульовано розрахункову модель і отримано аналітичну залежність (3) для визначення періоду зародження втомної тріщини біля сплюсненого концентратора напружень радіуса  $\rho$ :

$$N_* = K_{fC}^4 (1 + \rho / \rho_0)^2 / (K_{I_{max}} - K_{I_{min}})^4, \quad (3)$$

де  $K_{fC}$  – критичне значення КІН за циклічного навантаження;  $K_{I_{max}}$ ,  $K_{I_{min}}$  – відповідно, максимальне і мінімальне значення  $K_I$  для амплітудних значень зовнішніх зусиль  $P_{max}$  і  $P_{min}$ ;  $\rho_0 = \frac{2K_{fC}^2}{\pi E \sigma_0 \epsilon_{fC}}$ ;  $\epsilon_{fC}$  – критичне значення деформації

за циклічного навантаження. Припускали, що втомне руйнування протікає в умовах малоциклової втоми, а період  $N_*$  зародження втомної тріщини визначається розмахом пластичної деформації за законом Коффіна–Менсона.

Отримані результати лягли в основу створення критерію циклічної міцності тонкостінних елементів конструкцій (4), за яким можна визначити таке максимальне циклічне навантаження, за якого упродовж заданого часу  $t_*$  (або кількості циклів  $N_*$ ) руйнування не відбувається (рис. 2):

$$N_* = \frac{\sigma_{0f} E K_{fC}^2}{\alpha_0 \pi^2 l_0 F^4}, \quad F = \begin{cases} p, & \alpha = \pi/2, \eta_0 < 1; \\ q, & \alpha = 0, \eta_0 > 1, \end{cases} \quad (4)$$

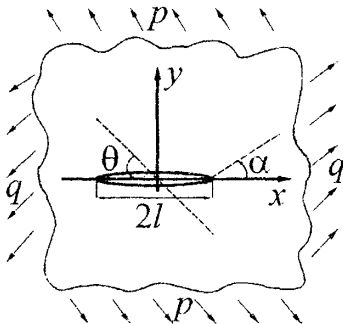


Рис. 2. Схема втомного навантаження пластины з тріщиною

де  $\alpha_0, \sigma_{0f}$  – характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів. Вважали, що прикладені нормальні і осьові зусилля змінюються з часом  $t$  циклічно за синусоїдальним законом синхронно і з однаковою частотою (віднульовий цикл).

Коректність критерію підтверджена результатами відомих експериментальних досліджень і за ним знайдено параметри безпечного циклічного навантаження труб з тріщинами. Зокрема, розглянуто нафтопровід “Кременчук – Херсон”, для якого були визначені параметри труби  $b_1, b_2, 2h, d_1, \alpha, \sigma_{0f}, K_{fC}, N_1$  і задача полягала у знаходженні такого внутрішнього тиску (рис. 3), коли за виявленої в трубі поверхневої тріщини початкової площі  $S_0 = \pi a_0 b_0 = 12 \text{ мм}^2$  залишковий її ресурс повинен становити не менше ніж  $N_* = 20$  років.

У результаті нескладних обчислень на основі отриманих у розділі залежностей знайдено, що амплітуда тиску нафти у трубопроводі для таких експлуатаційних умов не повинна перевищувати  $p_* = 3,5 \text{ МПа}$ .

У третьому розділі подано розрахункові моделі для оцінки впливу різних середовищ на залишкову довговічність труб з тріщинами. В літературі відома низка спроб створення такої теорії, але вони, в основному, базувалися на прикладах опису тільки конкретних експериментальних результатів.

Тому на цих теоретичних засадах можна визначати ресурс лише тих елементів конструкцій, для матеріалів яких отримані експериментальні дані.

У цьому розділі на основі деформаційного підходу запропоновано універсальний теоретичний підхід для опису сповільненого руйнування металевих матеріалів в умовах дії механічних навантажень, а також водневовмісних і корозивно-агресивних середовищ. В його основу покладено розрахункову модель, суть якої полягає в такому. Металева пластинка послаблена тріщиною довжини  $l$  і розтягується довготривалими зусиллями  $p$ . Вважатимемо, що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщини, а сама пластинка знаходиться в корозивно-агресивному середовищі з певним рН, яке потрапляє в тріщину. Приймаємо, що кінетика наводнювання металу в зоні передруйнування залежить від параметрів напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини та інтенсивності нестационарного потоку водню  $J(\tau)$  з поверхні поділу метал-середовище в метал. Зміна потоку обумовлена електрохімічними процесами біля вершини тріщини. В умовах електрохімічної корозії водень проникає в метал під час катодного процесу. Оскільки дифузія водню зі значних віддалей достатньо повільна, то зона передруйнування наводнюється, в основному, через поверхню локальних катодних зон.

Під час пасивації різних систем "метал – середовище" на металі можливе утворення або щільної плівки з високими корозивно-захисними характеристиками, або високодисперсної колоїдної суміші гідратів, або пористої плівки, яка лише уповільнює корозію. Локалізація катодних і анодних зон у кожному випадку буде інша (рис. 4). Отже, для визначення кінетики наводнювання зони передруйнування необхідно враховувати тип пасивувального шару і закономірності його утворення, чого не відтворюють існуючі моделі. Вони також не враховують експериментальних результатів, які свідчать, що електрохімічні реакції між вершиною тріщини і її берегами протікають переважно на відстанях, сумірних із розкриттям у вершині.

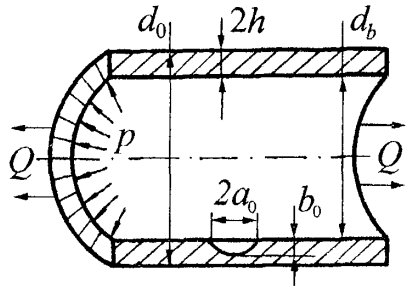


Рис. 3. Схема навантаження труби з внутрішньою тріщиною

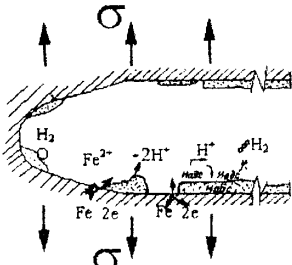


Рис. 4. Схема електрохімічних процесів біля верхньої тріщини

Вперше у запропонованій математичній моделі росту розвитку корозивно-механічної тріщини під дією напружень і водневовмісного корозивного середовища розглядається як безперервне чергування двох взаємозв'язаних стадій: електрохімічної, тривалої в часі, і стрибкоподібного поширення тріщини. Впродовж електрохімічної стадії тріщина проростає на глибину  $x_a$  внаслідок анодного розчинення. Ця стадія триває до моменту  $t_*$ , коли концентрація водню  $C_H$  у зоні передруйнування досягне критичного для цього напруження значення. В момент часу  $t = t_*$  тріщина стрибкоподібно просунеться на глибину  $x_m$ ,

що дорівнює довжині зони, де концентрація водню перевищила критичну. Тоді загальну швидкість росту тріщини визначатиме залежність (5), а довжину механічного стрибка тріщини  $x_m$  можна подати наближено формулою (6). У результаті знайдено співвідношення для цих двох швидкостей у вигляді рівнянь (7), де враховано закон Фарадея для швидкості анодного розчинення металу  $V_a$ . Виходячи з кінетики росту корозивної статично навантаженої тріщини, отримали вираз (8) для визначення механічної компоненти швидкості її росту:

$$dl / dt = V = V_a + V_m = (x_a + x_m) / t_*, \quad (5) \quad x_m = \alpha \delta, \quad (6)$$

$$V_a = Fm^{-1} n^{-1} t_*^{-1} \int_0^1 i(x_m t_*) dx, \quad V_m = x_m t_*^{-1} = \alpha \delta t_*^{-1}, \quad (7)$$

$$V_m = G_1 \delta \left[ (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4} - 1 \right]. \quad (8)$$

Сумарну швидкість росту корозивної тріщини визначали, підставляючи вирази (7) і (8) у співвідношення (5). У результаті для визначення періоду  $t = t_*$  докритичного росту корозивно-механічної тріщини отримали диференціальне рівняння (9) за початкових і кінцевих умов (10). Таким чином, маючи з експерименту необхідні константи (характеристики системи матеріал-середовище)  $G_1, G_2, G_3, \delta_C, \delta_{SCC}$ , період докритичного росту корозивно-механічної тріщини визначали за формулою (11). Справедливість отриманого виразу перевірена на експериментальних літературних даних, а коректність формул – на прикладі розв'язку аналога задачі Гріффітса:

$$dl / dt = G_2 - G_1 \delta + (G_1 \delta - G_2 G_3) (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4}, \quad (9)$$

$$\tau = 0, l(0) = l_0; \tau = \tau_*, l(\tau_*) = l, \delta(l^*) = \delta_C, \quad (10)$$

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} [G_2 - G_1 \delta + (G_1 \delta - G_2 G_3) (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - \delta)^{-4}]^{-1} dl. \quad (11)$$

Умови експлуатації нафтогазового устаткування і трубопроводів призводять до суттєвого зниження безпеки їх функціонування. Ця проблема загост-

рюється через наявність у продуктах, що видобувають, агресивних компонентів, особливо сірководню, здатний спричинити сірководневе корозивне розтріскування під напруженням та пухиріння (блістероутворення), а також водневе розтріскування (рис. 5) сталей, оскільки значно інтенсифікує проникнення водню в сталь.

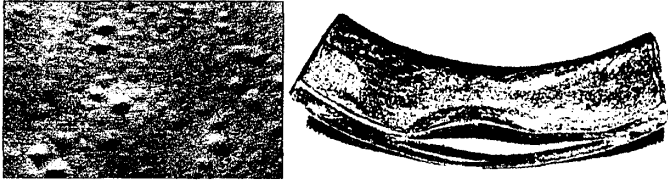


Рис. 5. Водневі блістери та розтріскування сталі на внутрішній поверхні трубопроводів

Тому запропонована розрахункова модель кінетики поширення водневих блістерів у нафтогазопроводах. Для її побудови розглянуті причини утворення зародків мікротріщин і водневих блістерів, механізми впливу сірководню на наводнювання сталі, а також структурних параметрів на її водневе розтріскування. Модель передбачає визначення поверхневої концентрації водню внаслідок дії сірководневого середовища і оцінку його розподілу у перерізі елемента конструкції (труби) (12), а відтак – і тиску водню у блістері та кінетику розвитку останнього (рис. 6 і 7) за формулами (13), (14). Отримані результати використано для аналізу кінетики руйнування маловуглецевих і низьколегованих сталей під час їхньої корозії у середовищі вологого сірководню (рис. 8 та 9):

$$C(x,t) = \frac{2D\pi}{h^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \exp\left[-\frac{Dn^2\pi^2t}{h^2}\right] \cos(n\pi x h^{-1}) \times \int_0^t \exp\left[\frac{Dn^2\pi^2t}{h^2}\right] C_{\Gamma}(t) dt; \quad (12)$$

$$P(t) = \frac{RTM(t)}{\mu V(t)}; \quad (13)$$

$$\frac{da_e}{dt} = v(K_{Ie}, P) \approx 2D(\pi\alpha\delta)^{-1} (C_S(P) - C_0)^2 \exp(-2\alpha m) \times [BC_S(P) \exp(2\alpha m) - 1 + \delta/\delta_c]^2 / [C_S(P)(1 - \delta/\delta_c - BC_0)]^2. \quad (14)$$

Зазначимо, що  $a_e(t=0) = a_0 = \sqrt{S_0/\pi}$ .

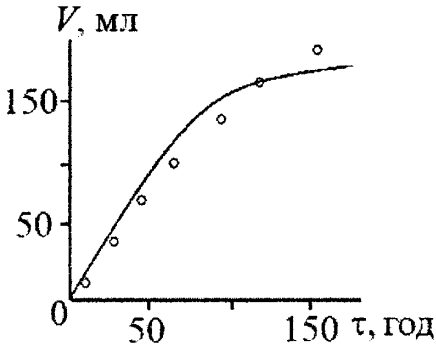


Рис. 6. Часова залежність проникнення водню крізь стінку труби

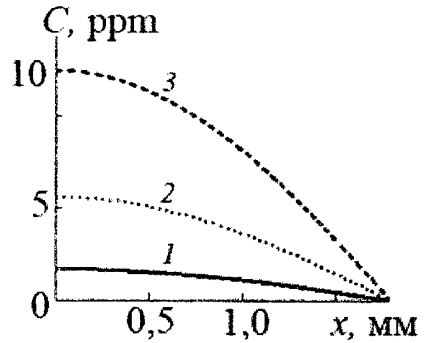


Рис. 7. Розподіл концентрації водню за товщиною труби зі сталі 20 згідно з формулою (12) у різні моменти часу: 1 -  $t = 1$  год; 2 - 10 год; 3 - 100 год

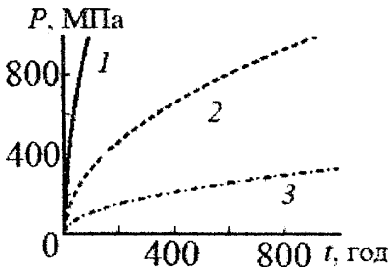


Рис. 8. Часова зміна тиску водню у блистері залежно від його початкового розміру: 1 -  $a_0 = 0,005$  мм; 2 - 0,05 мм; 3 - 0,5 мм

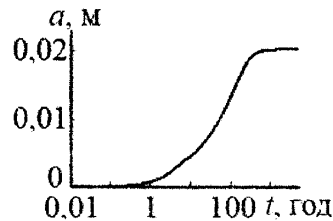


Рис. 9. Розрахункова крива росту кругового блистера з початковим радіусом  $a_0 = 0,005$  мм під дією внутрішнього тиску  $P$  згідно з даними рис. 8

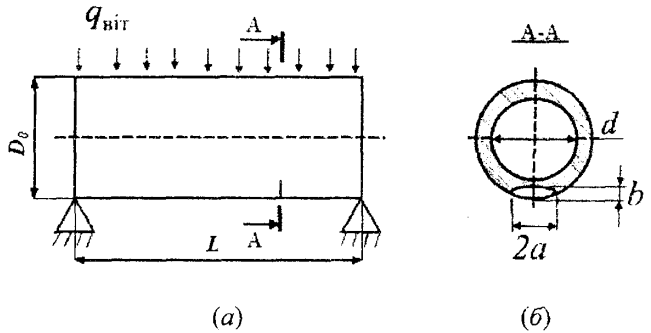
**Четвертий розділ** присвячений розробці методик розрахунку залишкового ресурсу труб магістральних нафтогазопроводів з дефектами з урахуванням особливостей дії експлуатаційного навантаження. Одна з них полягає у визначенні залишкового ресурсу балкового переходу газопроводу, який має поверхневий тріщиноподібний дефект і зазнає вітрового навантаження  $q$  (рис. 10). Дефект (наприклад, поверхневу виїмку) моделюємо сплюснутим напівеліпсоїдом з півосьми  $a_0, b_0, c_0$  і найменшим радіусом закруглення  $r$ . Необхідно визначити такий період часу вітрового навантаження, за який біля виїмки зародиться втомна тріщина і проросте через стінку труби до утворення витoku газу. Вважаємо, що пориви вітру змінюються приблизно циклічно із періодом  $T$ . Тоді задачу зводимо до визначення кількості циклів пориву вітру

$N$ , а поклавши  $N = N_*$ , знайдемо  $N_*$  – кількість циклів вітрового навантаження, за які біля такого дефекту відбудеться витік газу. Цю кількість циклів розділимо на два і розглянемо випадки зародження в зварному шві втомної тріщини та її поширення до досягнення внутрішньої стінки труби (15). У результаті отримали залежність (16), яка враховує ці два складники:

$$N_* = N_3 + N_D, \quad (15)$$

$$N_* = \frac{K_{fC}^4 (1 + (r/r_0)^2)^2 [2 \cdot 10^4 D_0^2 (1 - \xi^4)]^4}{[3L^2 q_H^{(A)} \sqrt{\pi b} f(\lambda, \varepsilon)]^4} + A_0 \int_{\varepsilon_0}^1 [1 - A_f^2 f^2(\varepsilon_i)] [A_f^4 f^4(\varepsilon_i) - 1]^{-1} d\varepsilon. \quad (16)$$

Рис. 10. Схема вітрового навантаження труби газопроводу на однопрогонному балковому переході (а), розміщення поверхневого дефекту (б)



Друга методика полягає у визначенні періоду росту корозійно-механічної тріщини із зовнішньої поверхні труби газопроводу через її стінку аж до його розгерметизації. Тут розглядаємо трубу газопроводу зовнішнім діаметром  $D_0 = 2r_0$ , товщиною стінки  $t$ , в якій є дефект, змодельований напівеліптичною тріщиною. Вважасмо, що труба виготовлена із високоміцної сталі і навантажена внутрішнім тиском  $p$ , а її поверхня в результаті розриву захисного покриву контактує з мокрим ґрунтом (рис. 11). Задача полягає в тому, щоб знайти час  $t_*$ , коли буде порушена герметичність труби.

За моделлю про критичне розкриття вершини тріщини застосовуючи метод еквівалентних площ та еквівалентних станів, а також граничну інтерполяцію задачу зводимо до розв'язку диференціального рівняння, розв'язок якого дає залежність (17), за якою визначаємо цей період росту тріщини крізь товщину стінки труби. Водночас розглядаємо аналогічну задачу, коли

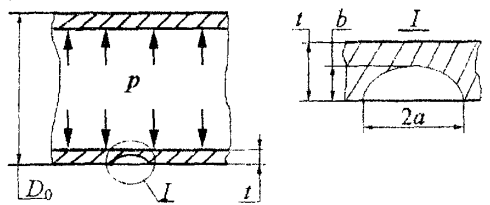


Рис. 11. Схема навантаження труби внутрішнім тиском і з наявною поверхневою напівеліптичною тріщиною

труба газопроводу з початковою напівліптичною тріщиною виготовлена із низькоміцної високопластичної сталі X52 (товщина стінки 12 мм) і зазнає дії внутрішнього тиску  $p$  та агресивної ґрунтової корозії. Період росту тріщини тепер визначаємо за залежністю (18), а її ресурс від початкового розміру тріщини  $b_0$  для різних сталей показано на рис. 12. Як бачимо, в експлуатованих сталях X52 залишковий ресурс найменший, що і підтверджують результати натурних обстежень:

$$t_* = t_1 \int_{\xi_0}^1 \left[ G_2 - G_1 A_\eta f_\xi^2(\xi) + (G_1 A_\eta f_\xi^2(\xi) - G_2 G_3) (\delta_C - \delta_{SCC})^4 (\delta_C - A_\eta f_\xi^2(\xi))^{-4} \right]^{-1} d\xi \quad (17)$$

$$t_* = V_k^{-1} (t_1 - b_0). \quad (18)$$

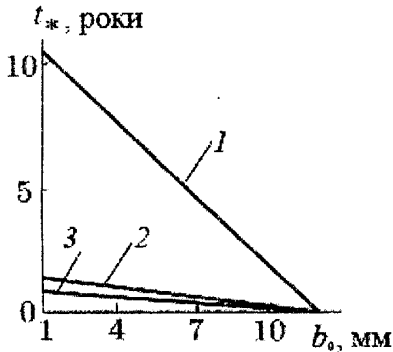


Рис. 12. Залежність залишкового ресурсу труби газопроводу із різних станів сталі X52 від початкового розміру  $b_0$  корозивної тріщини: 1 – сталь X52 нова; 2 – напруження 30 років, товщина стінки 12 мм; 3 – товщина стінки 10 мм

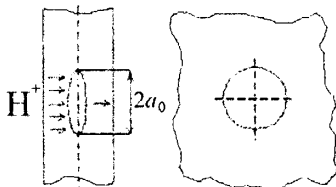


Рис. 13. Схематичне зображення внутрішньої кругової тріщини в серединній поверхні стінки труби

або як деякий вихідний розподіл водню  $C_0 = C(x)$  у металі. Крайові умови на

Окрема методика стосується визначення кінетики сірководневого розтріскування в стінках труб газопроводів. Воно є наслідком наводнювання і зниження пластичних властивостей металу під час електрохімічної корозії за наявності сірководню. Присутність в газі вологи і сірководню зумовлює на поверхні сталі корозійні процеси, у результаті яких утворюються продукти корозії і водень.

Спочатку визначаємо кінетику росту блістера. З цією метою розглядаємо тонкостінний елемент стінки труби газопроводу від родовища до станції очищення, яка має внутрішню мікротріщину (блістер) у серединній поверхні стінки (рис. 13), одна поверхня якої контактує з сірководневим середовищем. Необхідно встановити кінетичні рівняння для опису росту такої тріщини з часом  $t$ .

Для розв'язку вважатимемо: матеріал є ізотропним і пружно-пластичним; тріщина має форму круга та розміщена в серединній площині паралельно до неї; причиною росту тріщини є внутрішній тиск у ній; тріщина росте в площині початкової тріщини; не враховуємо взаємний вплив дефектів.

Рівняння дифузії водню подано в стандартному вигляді (19), а початкові умови задачі задані залежно від ситуації: або нульові – для деструкції внаслідок активного наводнювання,



поверхні дефекту задані згідно з реальним масообміном між металом і тріщиною. У результаті отримали вираз (20) для встановлення швидкості росту такої тріщини (блістера). Він справедливий не тільки для вихідної кругової конфігурації тріщини, а й для інших випуклих конфігурацій, але тоді  $a_0$  потрібно брати як радіус круга, площа якого  $S_0$  дорівнює площі вихідної тріщини опуклого контуру:

$$-D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha [C(0,t) - C_S], \quad (19)$$

$$\frac{da_e}{dt} \approx 2D(\pi\lambda\eta K_{Ic})^{-1} (C_S(P) - C_0)^2 \exp(-2\lambda m) \times \\ \times [BC_S(P)\exp(2\lambda m) - 1 + \eta]^2 / [C_S(P)(1 - \eta - BC_0)]^2 \quad (20)$$

за початкової умови  $a_e(t=0) = a_0 = \sqrt{S_0/\pi}$ .

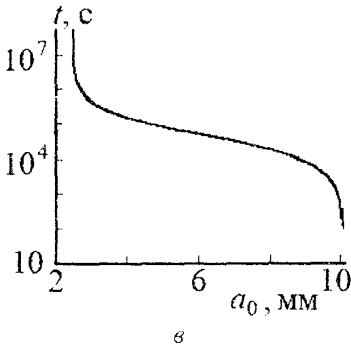
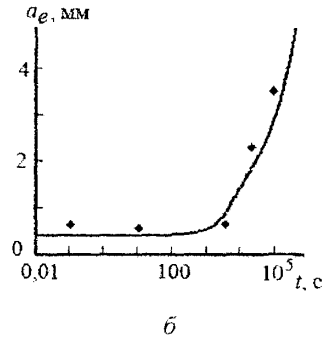
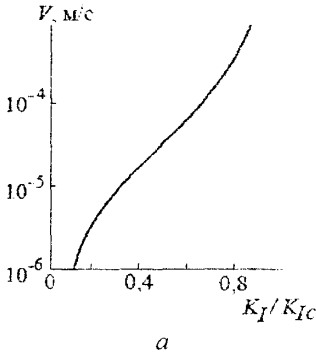


Рис. 14. Швидкість росту внутрішньої кругової тріщини (а) початкового радіуса  $a_0 = 4$  мм у сірководневому середовищі, розрахована згідно з (20) та розрахункова крива росту кругового блістера (б) з початковим радіусом  $a_0 = 4$  мм під дією внутрішнього тиску  $p$  (суцільна лінія – за формулою (20), точки – експериментальні результати), а також залежність довговічності елемента трубопроводу (в) з внутрішньою водневою тріщиною від її початкового радіуса  $a_0$

На рис. 14 подано результати розрахунків. Отримані співвідношення використано для аналізу кінетики росту внутрішньої тріщини в трубі зі сталі

API 5L-X52 (діаметр труби 914 мм, товщина стінки 20,7 мм) під час взаємодії її стінки з корозивним середовищем (розчин NACE: 5% NaCl + 0,5 CH<sub>3</sub>COOH + насичення H<sub>2</sub>S, T = 35<sup>0</sup>C).

Окремо потрібно зазначити, що в цьому розділі описано також методику розрахунку залишкового ресурсу труби газопроводу, побудовану з урахуванням випадковості навантаження, яке діє в реальних умовах її експлуатації. Для цього використано графіки неперервного запису робочих параметрів на виході із проміжної перекачувальної станції і встановлено послідовні максимальні та мінімальні значення тиску в трубі. Отриману так інформацію опрацювали за методом повних циклів згідно з вимогами діючого стандарту, виділяючи окремі цикли із загальної історії навантаження та визначаючи перепади тиску, які їм відповідають. Подальший статистичний аналіз виконали за відомими методами. Зокрема, для кожного з інтервалів перепаду тиску визначена відносна (у відсотках) кількість циклів навантажень у загальному спектрі. Виходячи з цього, встановили також, що розподіл випадкової величини  $\Delta p$  близький до нормального закону і його можна описати функцією густини розподілу ймовірностей. Результати зміни тиску в газопроводі вказують, що тривалість окремих циклів змінюється у дуже широких межах. Проте в літературі цьому не надано належної уваги, оскільки в подальших розрахунках часовий фактор не враховано. Нема також детального аналізу випадкової зміни асиметрії циклу коливань тиску під час навантаження, що впливає на швидкість росту тріщин. Натомість, використовують спрощену схему, згідно з якою для всіх циклів максимальну величину  $p_{max}$  приймають за робочий тиск  $p_{max} = p_0$ , а мінімальне значення  $p_{min}$  визначають залежністю  $p_{min} = p_0 - \Delta p$ . Таке спрощення завищує реальну асиметрію і є консервативне. Базуючись на традиційних основах лінійної механіки втомного руйнування, визначали швидкість росту тріщини залежно від розмаху ефективного КІН і з урахуванням реальної асиметрії циклу. У підсумку одержали залежність (21) для визначення кількості циклів навантаження  $N$  до руйнування – залишковий ресурс трубопроводу:

$$N = \frac{1}{C_0} \int_a^b \frac{db}{a(\Delta\sigma_*)^n (\sqrt{\pi b} Y(b, c_k))^n}, \quad (21)$$

$$Y = 1,13 - 0,09(b/a) + (-0,54 + 0,89/(0,2 + b/a))(b/t)^2 + \\ + (0,5 - 1/(0,65 + b/a) + 14(1 - b/a)^{24})(b/a)^4 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 1,464(b/a)^{1,65}}} \sqrt{\frac{b}{a}}. \quad (22)$$

Тут  $Y$  – поправкова функція, яку визначаємо за залежністю (22). Результати розрахунку періоду залишкової довговічності труби газопроводу до її руйнування (утворення наскрізної тріщини) за схемою, показаною на рис. 3,

наведені на рис. 15. Як бачимо, залишкова довговічність труби газопроводу суттєво залежить від початкового розміру дефекту.

Залежність (23) описує сформульовану модель для визначення навантаження стінки труби нафтопроводу і її залишкового ресурсу, тобто часу розвитку дефектів у вигляді напівеліптичної тріщини в стінці труби, розміщеної вздовж її твірної, аж до розгерметизації:

$$Q = +\alpha(\Delta T)E - 0,3 \frac{pd_b}{D_0 - d} \quad (23)$$

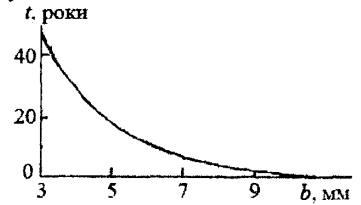
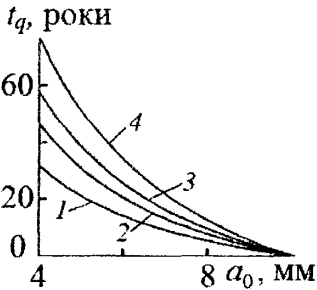
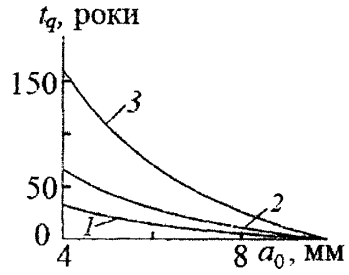


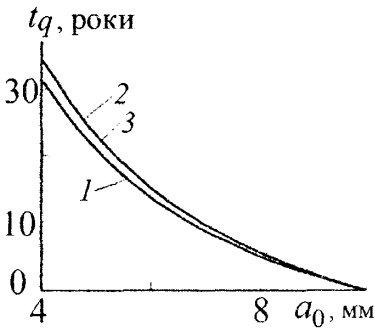
Рис. 15. Залежність залишкового ресурсу труби газопроводу від розмірів дефекту



a



б



в

Рис. 16. Залежність залишкової довговічності труби  $t_q$  від початкового роз дефекту  $a_0$ : а – за зміни частоти  $n$  відкриття-закриття засувки: 1 –  $n=30$ ; 2 – 40; 3 – 50; 4 – 73; б – за зміни амплітуди  $b_1$  тиску  $p$  від турбулентності потоку: 1 –  $b_1=0,05$ ; 2 – 0,1; 3 – 0,15; в – за зміни напружень  $Q$  в трубі при затиску її ґрунтом: 1 –  $Q=-150$  МПа; 2 –  $Q=-100$ ; 3 –  $Q=-50$

Оскільки товщина стінки нафтопроводу набагато менша від внутрішнього радіуса труби  $r_b$ , то для спрощення розв'язку задачі із незначною похибкою в кінцевому результаті вважатимемо, що така тріщина розвивається в нескінченній пластині, підданій дії статичного  $Q$  і змінного  $p$  навантажень. Перше викликане теплотвінами защемленої ґрунтом стінки труби. Його визначають з натурних обстежень і воно може досягати величини 200 МПа. Змінне у часі навантаження  $p(t)$  зумовлене гідравлічними коливаннями тиску, а також коливаннями, які виникають внаслідок зупинок pomp, закриття засувки тощо, можна описати мажорантою синусоїдального типу (24). У результаті

приходимо до рівняння (25), що описує період докритичного росту втомної тріщини, де константи матеріалу  $\alpha_0, K_{fc}, \sigma_t$  знаходять експериментально. Залежності залишкової довговічності труби нафтопроводу від згаданих вище чинників за описаними у цьому розділі методиками розрахунку побудовано на рис. 16.

$$p(t) = a_1 + a_2 + b_1 \sin \omega_1 t + b_2 \sin \omega_2 t, \quad (24)$$

$$\frac{da}{dN_2} = \frac{\alpha_0}{4\sigma_t E} \frac{K_{I2 \max}^4 (1-R_2)^4 + N_1 K_{I1 \max}^4 (1-R_1)^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - K_{I1 \max}^2}, \quad (25)$$

$$N_2 = 0, a(0) = \sqrt{a_0 b_0}; \quad N_2 = N_{2*}, a(N_{2*}) = 2h_1.$$

З них випливає, що зі зменшенням кількості операцій закриття-відкриття засувок довговічність труби збільшиться; через турбулентність потоку нафти в трубі зменшується її довговічність, а це зобов'язує експлуатаційників дотримуватися якнайкращої синхронізації роботи помп; зі зменшенням затиску труби ґрунтом збільшується її довговічність.

У п'ятому розділі розвинуто теоретико-експериментальний метод для оцінки залишкових напружень у зоні зварних з'єднань трубопроводів. Загалом локальність залишкових пластичних деформацій у зоні зварного шва зумовлює тривісний напружений стан в оболонкових конструкціях і для його визначення потрібно розв'язувати тривимірну задачу. В дисертації з використанням пакета комп'ютерних програм Woldpredictions досліджено тривісний розподіл залишкових напружень і пластичних деформацій у зонах кільцевих зварних з'єднань МТ різних товщин і діаметрів. Вивчено розподіл напружень у зонах кільцевих зварних стиків трубопроводів і для товщин, що регламентовані нормативними документами; обґрунтовано правомірність використання для визначення залишкових напружень теорії оболонок. При цьому для розрахунків використано дві моделі теорії оболонок: уточнену, що враховує жорсткість на зсув в перпендикулярному до серединної поверхні напрямку, і класичну.

Для аналізу рівня і розподілу залишкових технологічних деформацій і напружень у зоні зварного з'єднання віднесли трубу до циліндричної системи координат  $z, \beta, r$  (рис. 17), де  $z$  – відстань довільної точки вздовж осі труби від початкового перерізу, який сумістимо з площиною зварного шва,  $\beta$  – кут між початковою і довільною площинами, що проходять через вісь обертання,  $r$  – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної

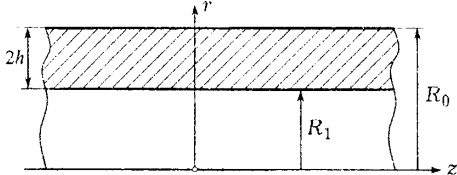


Рис. 17. Осі координат  $r, z$  та розміри труби

поверхні труби,  $R_0$  і  $R_1$  – радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби, а  $2h$  – її товщина.

Компоненти тензора повної деформації  $e_{ij}$  зобразимо у вигляді суми

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0 \quad (i, j = z, \beta, r), \quad (26)$$

де  $e_{ij}^0$  – компоненти тензора залишкових термопластичних деформацій;  $e_{ij}^e$  – компоненти тензора пружної деформації, викликані залишковими напруженнями так, що

$$e_{ij}^e = \frac{1}{E} \left[ (1 + \mu) \sigma_{ij} + \mu \delta_{ij} \sigma_{kk} \right]. \quad (27)$$

Тут  $\delta_{ij}$  – символи Кронекера;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Для осесиметричного напруженого стану, коли відмінними від нуля є осьові  $e_{zz}^0$ , колові (окружні)  $e_{\beta\beta}^0$ , радіальні  $e_{rr}^0$  і зсувні  $e_{rz}^0$  залишкові термопластичні деформації та осьові  $\sigma_{zz}$ , колові (окружні)  $\sigma_{\beta\beta}$ , радіальні  $\sigma_{rr}$  і зсувні в поперечному напрямку  $\sigma_{rz}$  залишкові напруження, решта компонент дорівнюють нулю:

$$e_{z\beta}^0 = e_{r\beta}^0 = 0, \quad \sigma_{z\beta} = \sigma_{r\beta} = 0. \quad (28)$$

Методом скінченних елементів (МСЕ) числово проаналізовано розподіл залишкових деформацій  $e_{ij}^0$  і напружень  $\sigma_{ij}$  в зоні багат шарового кільцевого зварного шва для з'єднання труб діаметром  $D = 2R_0 = 1420$  мм і товщиною  $2h = 18,7$  мм, виготовлених зі сталі 10Г2БТ ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $\sigma_B = 588$  МПа;  $\sigma_T = 461$  МПа).

Для розрахункової моделі теорії оболонок позначимо радіус серединної поверхні стінки труби через  $R$ . Положення довільної точки на серединній поверхні оболонки визначатимемо координатами  $z$  і  $\beta$ . Надалі віднесемо оболонку до триортогональної системи координат  $\alpha, \beta, \gamma$ , де  $\alpha = z/R$  – безрозмірна координата,  $\gamma$  – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні (рис 18).

Для осесиметричної задачі у межах уточненої теорії оболонок ключове рівняння для визначення нормального до серединної поверхні прогину  $W(\alpha)$  можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d^4 W}{d\alpha^4} - 2g^2 \frac{d^2 W}{d\alpha^2} + 4\lambda^4 W = 4\lambda^4 R e_{\beta\beta}^0 - R^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (e_{\alpha\alpha}^0 + \mu e_{\beta\beta}^0) - \\ - 2g^2 R \frac{d^2 E_{\beta\beta}^0}{d\alpha^2} + R \frac{d^3 E_{\alpha\gamma}^0}{d\alpha^2} - \frac{\mu R^3}{D_1} N_1^0. \end{aligned} \quad (29)$$

Тут

$$E_{ii}^0(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{ii}^0(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad e_{ii}^0(\alpha) = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h \gamma e_{ii}^0(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad i = \alpha, \beta, \quad i = \alpha, \beta,$$

$$e_{\alpha\gamma}^0(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{\alpha\gamma}^0(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad (30)$$

$e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma)$ ,  $e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma)$ ,  $e_{\alpha\gamma}^0(\alpha, \gamma)$  – осьові, колові і зсувні несумісні залишкові деформації,

$$D_1 = \frac{2Eh^3}{3(1-\mu^2)}; \lambda^4 = \frac{3R^2(1-\mu^2)}{4h^2}; 2g^2 = \frac{E}{k'G'},$$

$G'$  – модуль зсуву на площадках, перпендикулярних до серединної поверхні,  
 $K'$  – коефіцієнт зсуву,  $N_1^0$  – прикладене до оболонки осьове зусилля.

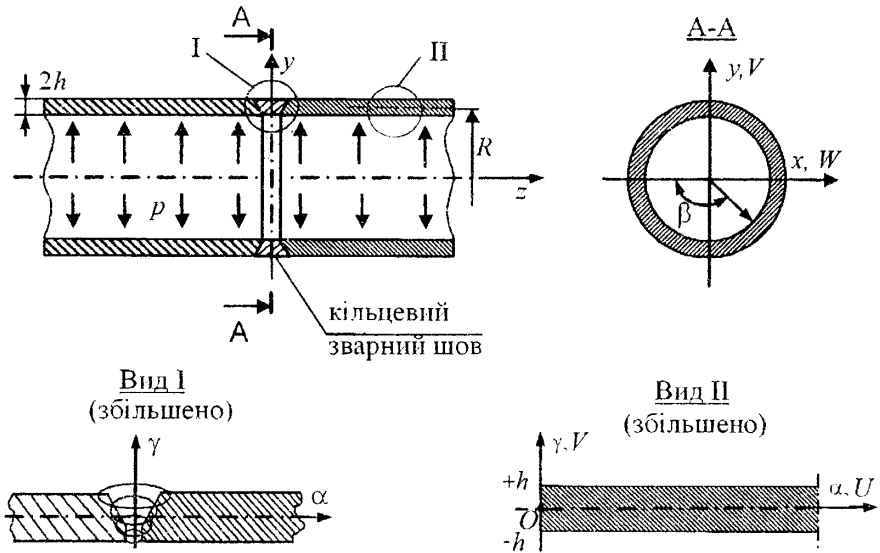


Рис. 18. Схема стикового зварного з'єднання трубопроводів

На основі виконаного МСЕ аналізу розподілу залишкових напружень і залишкових термопластичних деформацій у зоні багатошарових кільцевих зварних швів магістральних трубопроводів і відомих результатів досліджень розподіл несумісних залишкових деформацій апроксимуємо виразами

$$\begin{aligned} e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) &= -e_1^* f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha), \\ e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) &= -e_2^* f_2(\gamma) \varphi_{23}(\alpha), \\ e_{\alpha\gamma}^0(\alpha, \gamma) &= -e_0^* f_0(\gamma) \varphi_0(\alpha) S_0^0(\alpha), \end{aligned} \quad (31)$$

де

$$\varphi_{23}(\alpha) = \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) - \rho \varphi_3(\alpha) S_3^0(\alpha);$$

$$\varphi_i(\alpha) = 1 + s_i \frac{\alpha^2}{\alpha_i^2} - (3 + 2s_i) \frac{\alpha^4}{\alpha_i^4} + (2 + s_i) \frac{\alpha^6}{\alpha_i^6}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\varphi_0(\alpha) = \frac{\alpha}{\alpha_0} - 3 \frac{\alpha^3}{\alpha_0^3} + 3 \frac{\alpha^5}{\alpha_0^5} - \frac{\alpha^7}{\alpha_0^7};$$

$$f_i(\gamma) = 1 + q_i \frac{\gamma}{h} - n_i \frac{\gamma^2}{h^2}, \quad n_0 = 1 - q_0, \quad q_0 > 1; \quad i = 1, 2, 3; \quad (32)$$

$S_i^0(\alpha)$  – функції Гевісайда;  $S_i^0(\alpha) = 1$ ,  $|\alpha| \leq \alpha_i$ ;  $S_i^0(\alpha) = 0$ ,  $|\alpha| > \alpha_i$ ;  $\alpha_i = \frac{b_i}{R}$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ ;  $b_i$  – координати меж зон залишкових деформацій;  $E_i^*$ ,  $\alpha_i$ ,  $\rho$ ,  $s_i$ ,  $q_i$ ,  $n_i$  – числові параметри функції  $f_i(\gamma)$ , що характеризують нерівномірність розподілу залишкових деформацій по товщині труби, а  $\varphi_i(\alpha)$  – зміну цих деформацій вздовж осі труби.

Отримано вирази для визначення колових  $\sigma_{\beta\beta}$ , осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  і зсувних  $\sigma_{\alpha\gamma}$  залишкових напружень у довільній точці труби в зоні зварного з'єднання:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) &= k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma); \quad \sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma); \\ \sigma_{\alpha\gamma} &= k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\gamma}(\alpha, \gamma). \end{aligned} \quad (33)$$

Вирази для обчислення безрозмірних напружень  $\hat{\sigma}_{ij}$  одержано в замкнутій формі.

Для визначення довільних числових параметрів  $k$ ,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $\alpha_i$ ,  $s_i$ ,  $q_i$ ,  $n_i$ ,  $\rho$  для конкретного кільцевого зварного з'єднання труб необхідно використати експериментальні результати, які можна отримати за допомогою неруйнівних методів контролю, і розв'язати обернену задачу теорії оболонок з власними технологічними напруженнями. Потрібно зауважити, що для ізотропних матеріалів  $E/G' = 2(1 + \mu)$ , а коефіцієнт зсуву  $K' = 5/6$ . Проте, щоб отримати на основі основних співвідношень теорії оболонок, що враховує скінченну зсувну жорсткість  $G'$ , відповідні співвідношення класичної теорії оболонок, потрібно, зокрема, прийняти жорсткість на зсув  $G' = \infty$ .

Під час оцінки впливу зсувної жорсткості на площадках, перпендикулярних до серединної поверхні стінки труби, на розподіл залишкових напружень ураховано, що для металевих однорідних оболонок при  $\mu = 0,3$ ,  $g^2 = 1,56$ , якщо  $k_0 = 0$ ,  $k_1 = 0,8$ ; обчислено безрозмірні колові  $\hat{\sigma}_{\beta\beta}$  і осьові  $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}$  залишкові напруження на зовнішній ( $\gamma = h$ ), внутрішній ( $\gamma = -h$ ) і серединній ( $\gamma = 0$ ) поверхнях труби (рис. 19).

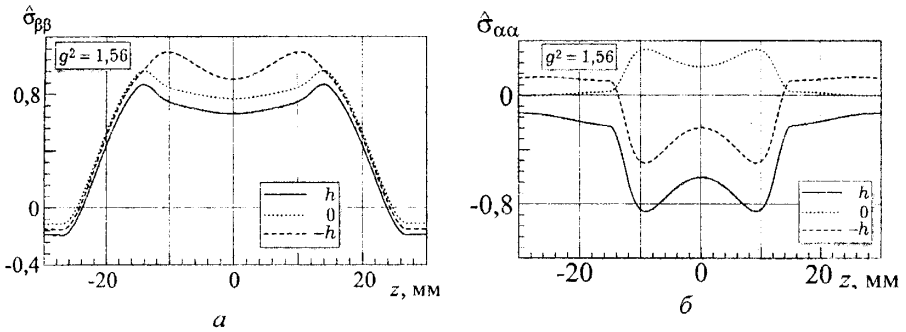


Рис. 19. Розподіл безрозмірних колових  $\hat{\sigma}_{\beta\beta}$  (а) і осевих  $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}$  (б) залишкових напружень у зоні зварного шва на зовнішній, внутрішній і серединній поверхнях труби

За вибраних числових значень параметрів  $\alpha_i$ ,  $s_i$ ,  $q_i$ ,  $n_i$ ,  $\rho$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  у випадку, коли  $g^2 = 0$ , безрозмірні залишкові напруження обчислено за формулами класичної теорії оболонок. Порівняння результатів обчислень залишкових напружень  $\hat{\sigma}_{\beta\beta}$ ,  $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}$  при  $g^2 = 1,56$  і при  $g^2 = 0$  показало, що максимальні відхилення між ними не перевищують 2%. Це обґрунтовує достовірність застосування отриманих на базі класичної теорії формул для розрахунку залишкових технологічних напружень у зоні кільцевого зварного з'єднання труб МТ, виготовлених з однієї марки сталі і з однаковою товщиною стінок.

Для знаходження невідомих параметрів  $E_i^*$ ,  $k$ ,  $\alpha_i$ ,  $s_i$ ,  $q_i$ ,  $\rho$  побудовано функціонал. Якщо експериментальні дані одержані за результатами вимірювань на зовнішній поверхні труби за допомогою електромагнітного ( $\sigma_+^E$ ), ультразвукового ( $\sigma_0^E$ ) методів та методу спекл-інтерферометрії ( $\sigma_{\alpha\alpha}^E, \sigma_{\beta\beta}^E$ ), то функціонал має вигляд

$$\begin{aligned}
 g(k_1, k, \alpha_i, s_i, q_i, n_i) = & \sum_{n=1}^{n_1} p_n \left[ k_1 \sigma_T I_+^{(i)T}(\alpha_n) - \sigma_+^E(\alpha_n) \right]^2 + \\
 & + \sum_{m=1}^{l_1} q_m \left[ k_1 \sigma_T I_0^{(i)T}(\alpha_m) - \sigma_0^E(\alpha_m) \right]^2 + \\
 & + \sum_{v=1}^{v_1} \rho_v \left\{ \left[ k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\alpha\alpha}^E(\alpha_v) \right]^2 + \left[ k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\beta\beta}^E(\alpha_v) \right]^2 \right\}, \quad (34)
 \end{aligned}$$

де  $n_1$ ,  $l_1$ ,  $v_1$  – кількість перерізів труби, в яких виконують вимірювання;  $p_n$ ,  $q_m$ ,  $\rho_v$  – вагові множники. Числово проаналізовано з'єднання труб багато-



шаровим кільцевим зварним швом. Обчислювали залишкові напруження для виготовлених зі сталі X-70 труб діаметром 1420 мм і товщиною стінок 15,7 мм ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $\sigma_B = 588,7$  МПа;  $\sigma_T = 441,3$  МПа).

Для числових значень параметрів  $k_1 = 0,7$  ( $k_1 = Ee_1^*/\sigma_T$ ),  $k = 0,1$ ;  $s_1 = 1$ ;  $s_2 = 2$ ;  $s_3 = 3$ ;  $\rho = 0,8$ ;  $n_1 = 0,25$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $q_1 = 0,125$ ;  $q_2 = 0,25$ , які характеризують рівні і градієнти вздовж труби і за її товщиною залишкових термопластичних деформацій  $e_{\beta\beta}^0$  і  $e_{\alpha\alpha}^0$ , виконано параметричний аналіз впливу ширини зони їх локалізації, що описуються різними числовими значеннями параметрів  $b_i$ , на розподіл колових  $\sigma_{\beta\beta}$  і осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  залишкових напружень у зоні зварного шва.

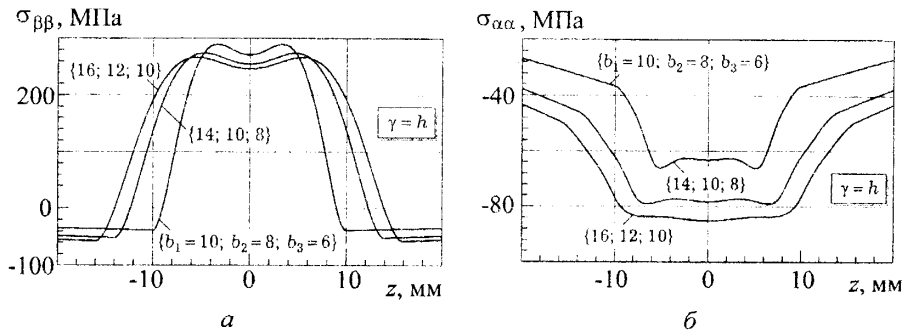


Рис. 20. Розподіли колових  $\sigma_{\beta\beta}$  (а) і осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  (б) залишкових напружень на зовнішній поверхні труби

На рис. 20 подано результати числового аналізу впливу ширини зони термопластичних деформацій на рівень і розподіл колових  $\sigma_{\beta\beta}$  і осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  залишкових напружень у зоні зварного шва на зовнішній ( $\gamma = h$ ) поверхні труби.

У шостому розділі запропоновано методики теоретико-експериментального визначення залишкових напружень у кільцевих зварних з'єднаннях ділянок трубопроводів, обґрунтована їх стійкість до похибок вхідних даних, які залежать від похибок експериментальних вимірювань. Методики визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях побудовано на математичній моделі розрахунку деформівних тіл з власними напруженнями і експериментальній інформації про характеристики напруженого стану, яку отримано неруйнівними методами контролю. Для уточнення тарувальних коефіцієнтів, що використовують під час визначення напруженого стану трубопроводів, розроблено і виготовлено дослідно-вимірювальний комплекс, до складу якого входять горизонтальний резервуар із секцій труб зовнішнім діаметром 1020 мм, зварених між собою багатощаровими кільцевими швами і

привареними до них на торцях півсферичних днищ, комплект вимірювальних засобів та пристрої створення необхідного тиску у резервуарі.

Резервуар заповнювали водою і створювали внутрішній тиск  $p$  заданого рівня. Це здійснювали за допомогою об'ємного помпувального агрегату МП - 150. Тиск у резервуарі контролювали зразковим манометром з класом точності вимірювань 0,4. Зменшували тиск в резервуарі зворотним переливанням води у накопичувальну ємність. Максимальні внутрішні тиски тут досягали 15 МПа. Циліндричні секції для резервуара комплектували з труб зовнішнім діаметром 1020 мм тривалого терміну експлуатації і з різних марок поширених трубних сталей ( див. табл. 1).

Таблиця 1  
Геометричні характеристики і марка сталі секцій

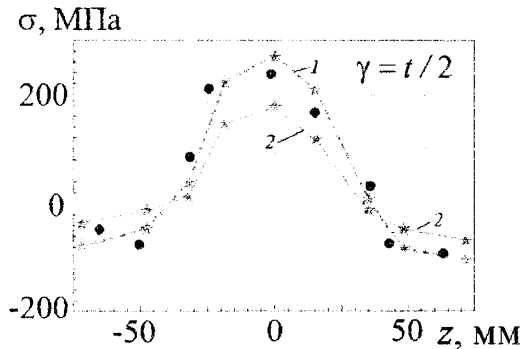
№ %	Довжина секції $l$ , мм	Товщина стінки $t$ , мм	Форма	Марка сталі
1	250	22	Напівсферичне днище	09Г2С
2	450	14	Циліндрична секція	17Г1СУ
3	800	10	Циліндрична секція	13Г1С
4	450	10	Циліндрична секція	17Г1С
5	400	10	Циліндрична секція	17Г1С
6	400	9,5	Циліндрична секція	13Г1СУ
7	850	14	Циліндрична секція	17Г1С
8	250	22	Напівсферичне днище	09Г2С

Напружений стан секцій, в тому числі і в зоні швів різних ділянок резервуара, визначали з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії, тензометрування, методів магнето- і акустопружності та коерцитиметрії. Експериментальне визначення напружень здійснювали за внутрішніх тисків у резервуарі 3; 4; 5 і 5,5 МПа. В усіх дослідженнях кількість повторних вимірювань становила не менше шести. За результатами експериментальних вимірювань колових і осьових напружень виконували їх статистичну обробку. У табл. 2 наведено результати обчислення колових  $\sigma_{\beta\beta}$  і осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  напружень від внутрішнього тиску в стінці секцій резервуара за даними тензометрування, а на рис. 21 – експериментальні результати визначення кілових напружень  $\sigma_{\beta\beta}^E$  на зовнішній поверхні, які отримані за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу, і усереднена різниця головних напружень  $\sigma_{\pm}^A$ , отримані електромагнетним методом, для зварного шва резервуара, де з'єднано дві секції з товщинами стінок  $t_1 = t_2 = 10$  мм, у функції відстані від осі шва: крива 1 – до опресування резервуара, крива 2 – після опресування. Матеріал секцій – сталь 17Г1С. Під час опресування тиск у резервуарі досягав 6 МПа.

Колові  $\sigma_{\beta\beta}$  і осьові  $\sigma_{\alpha\alpha}$  напруження від внутрішнього тиску в стінках секцій резервуара

№ секції параметри	2	3	4	5	6	7
Товщина стінки $t = 2h$ , мм	14	10	10	10	9,5	14
Радіус середньої поверхні $R$ , мм	503	505	505	505	505,25	503
$\sigma_{\beta\beta}$ , МПа $p = 3,0$ МПа	107,6	151,6	151,2	151,9	160,8	108,4
$\sigma_{\alpha\alpha}$ , МПа $p = 3,0$ МПа	53,7	75,4	75,8	76,1	80,4	54,1
$\sigma_{\beta\beta}$ , МПа $p = 4,0$ МПа	143,9	201,8	201,6	202,2	211,7	144,7
$\sigma_{\alpha\alpha}$ , МПа $p = 4,0$ МПа	70,9	100,9	101,9	100,5	105,4	71,9
$\sigma_{\beta\beta}$ , МПа $p = 5,0$ МПа	178,4	253,4	254,0	256,8	263,9	180,3
$\sigma_{\alpha\alpha}$ , МПа $p = 5,0$ МПа	89,1	125,7	126,9	124,3	131,7	91,1
$\sigma_{\beta\beta}$ , МПа $p = 5,5$ МПа	198,0	276,1	278,3	275,0	291,4	199,5
$\sigma_{\alpha\alpha}$ , МПа $p = 5,5$ МПа	98,3	137,2	139,3	136,0	145,1	99,2

Рис. 21. Експериментальні залежності колових залишкових напружень  $\sigma_{\beta\beta}^E$  (зірочки) і усередненої різниці головних напружень  $\sigma_+^E$  (точки) від відстані до осі шва.



Узагальнюючи результати, отримані в цьому й інших розділах роботи, запропонували низку конструкційних і технологічних рішень для підвищення надійності роботи трубопроводів тривалої експлуатації, новизна яких захищена патентами на винаходи та корисні моделі.

**Сьомий розділ** присвячено дослідженню впливу залишкових напружень на статичну міцність і довговічність ділянок трубопроводів з дефектами в зонах дії залишкових напружень, зокрема у зварних швах. Для оцінки статичної міцності використано перевірений численними експериментами двопараметричний критерій (силовий критерій) крихко-в'язкого руйнування, на основі якого побудовано діаграму оцінки руйнування та області категорій дефектів (рис. 22). Білим кольором на рисунку виділена допустима область, яку на основі критерію статичної міцності отримали шляхом зменшення граничної області в  $k$  разів. Залежно від значень КЗМ дефекти віднесено до трьох умовних категорій: незначний, небезпечний (помірний, значний) і критичний.

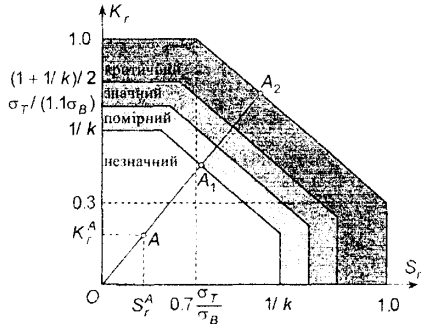


Рис. 22. Діаграма оцінки руйнування (ДОР)

КЗМ  $n$  для розрахункової точки  $A$  визначаємо графічно через відношення відрізків:

$$n = \frac{OA_2}{OA}, \quad (36)$$

де  $A_2$  – точка перетину променя  $OA$  з граничною кривою ДОР. КЗМ  $n$  можна також визначити аналітично:

$$n = \frac{S_r^{A_2}}{S_r^A} \quad \text{або} \quad n = \frac{K_r^{A_2}}{K_r^A}. \quad (37)$$

Коли тріщина знаходиться в зоні дії залишкових напружень, КІН подамо у вигляді суми

$$K_1 = K_1^H + K_1^{res}, \quad (38)$$

де  $K_1^H$  визначається зовнішнім навантаженням, а  $K_1^{res}$  – залишковими напруженнями. Тоді, відповідно,

$$K_r = K_r^H + K_r^{res}. \quad (39)$$

При цьому слід відзначити, що залишкові зварювальні напруження майже повністю встигають релаксувати до появи пластичної нестійкості і не впливають на величину  $\sigma_{ref}$ , тому під час розрахунку параметра  $S_r$  залишкові напруження рекомендують не враховувати.

Для напруженого стану, під дією якого знаходиться ділянка труби, розраховують КІН  $K_1$ , що характеризує механізм крихкого руйнування, та напруження,  $\sigma_{ref}$ , яке описує пластичну нестійкість, за якими обчислюють координати точки  $A$ , що визначає стан міцності трубопроводу з тріщиною на двокритеріальній діаграмі:

$$K_r^A = \frac{K_1}{K_{1C}}, \quad S_r^A = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_B}. \quad (35)$$

З урахування залишкових напружень отримали формули для визначення КЗМ:

$$n = \frac{1}{(1 + \zeta^r) K_r^H}, \quad 0 \leq S_r < \frac{0,7\sigma_T}{\sigma_B};$$

$$n = \frac{1 - 0,21\sigma_T/\sigma_B}{(1 - 0,7\sigma_T/\sigma_B)(1 + \zeta^r) K_r^H + 0,7S_r}, \quad \frac{0,7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1; \quad (40)$$

$$n = \frac{1}{S_r}, \quad 0 \leq K_r < 0,3,$$

де  $\zeta^r = K_r^{res} / K_r^H$ .

Оцінено вплив залишкових напружень на міцність ділянки газопроводу зі з'єднаннями з осьовою поверхневою тріщиною в зоні зварного шва.

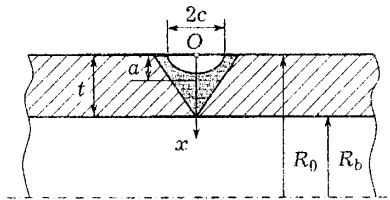
Значення КІН і  $\sigma_{ref}^*$  визначено для усереднених по поверхні тріщини залишкових напружень  $\sigma^{*r}$ :

$$K_1^H = \frac{pR_b}{t} G_0 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad K_1^{res} = \sigma^{*r} G_0 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}},$$

$$\sigma_{ref}^* = \frac{g\sigma_b + [(g\sigma_b)^2 + 9(M_s\sigma_m)^2]^{0,5}}{3}, \quad (41)$$

де  $R_b$  – внутрішній радіус труби;  $t = 2h$  – товщина стінки труби;  $G_0$  – коефіцієнти впливу;  $a$  – глибина тріщини;  $2c$  – ширина тріщини;  $\sigma_m$  і  $\sigma_b$  – нормальні до берегів тріщини мембранні та згинальні напруження;  $g$  і  $M_s$  – допоміжні коефіцієнти (рис. 23). Розподіл колових залишкових напружень зображено на рис 24.

Рис. 23. Розрахункова схема ділянки трубопроводу із зовнішньою осьовою напівеліптичною тріщиною у зварному шві



Залежність КЗМ  $n$  і  $n_p$  від відносної глибини тріщини  $a/t$  зображено на рис. 25. Числовий аналіз задачі виконано для ділянки труби магістрального газопроводу, виготовленої зі сталі марки X60 ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;  $\sigma_B = 588$  МПа,  $\sigma_T = 440$  МПа) зовнішнім діаметром  $D_0 = 1020$  мм і товщиною стінки  $t = 21$  мм, яка знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p = 4,5$  МПа. Залишкові напруження у зварному з'єднанні розраховані для розподілу термопластичних деформацій за таких значень числових параметрів, які входять у вирази:  $k_1 = 0,7$  ( $e_1^* = k_1 \sigma_T / E$ );  $k = 0,1$ ;  $s_1 = 1$ ;  $s_2 = 2$ ;  $\rho = 0,8$ ;  $n_1 = 0,5$ ;

$n_2 = 0,6$ ;  $q_1 = 0,25$ ;  $q_2 = 0,3$ ;  $b_1 = 12$  мм;  $b_2 = 9$  мм;  $b_3 = 6$  мм. Криві 2 і 3 відповідають значенням (2 -  $\sigma_{\beta\beta}^{xz} = 100$  МПа; 3 -  $\sigma_{\beta\beta}^x = 261$  МПа) незрелаксованих напружень, які згідно з літературними джерелами знаходяться в межах 50...150 МПа та існують у зварних з'єднаннях навіть після повного відпуску.

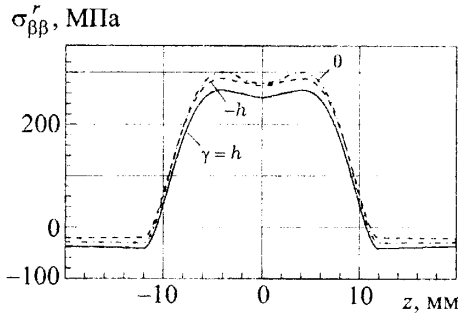


Рис. 24. Залежність колових залишкових напружень у зоні кільцевого зварного шва від відстані  $z$  вздовж осі труби

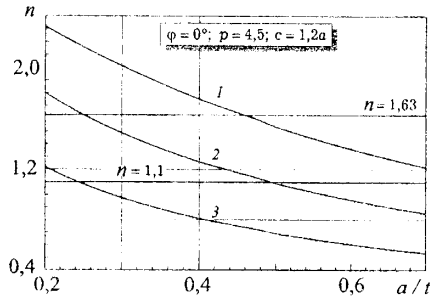


Рис. 25. Залежність коефіцієнтів запасу міцності  $n$  (криві 2, 3) і  $n_p$  (крива 1) від відносної глибини тріщини  $a/t$

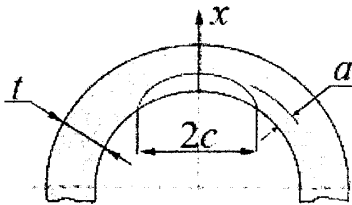


Рис. 26. Схема перерізу труби з внутрішньою кільцевою поверхневою тріщиною

Як видно з графіків, з ростом глибини тріщини КЗМ  $n$  зварного з'єднання з дефектом значно зменшується. При цьому суттєвий вплив мають залишкові напруження і коли  $\sigma_{\beta\beta}^{*r} = 100$  МПа критичне значення КЗМ  $n = 1,1$  досягається за глибини дефекту  $a/t = 0,49$ .

Досліджено вплив залишкових напружень на міцність ділянки трубопроводу з кільцевою поверхневою тріщиною у зварному шві (рис 26).

Залежність осьових залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  тут подано у вигляді (42)

$$\sigma_{\alpha\alpha}^r(0, x) = \sigma_0^r + \sigma_1^r \frac{x}{t} + \sigma_2^r \left(\frac{x}{t}\right)^2, \quad \sigma_0^r = -\hat{\sigma}_{\alpha 0}^r(0) - \frac{2}{3} \hat{\sigma}_{\alpha 1}^r(0);$$

$$\sigma_1^r = 2[\hat{\sigma}_{\alpha 0}^r(0) + 2\hat{\sigma}_{\alpha 1}^r(0)]; \quad \sigma_2^r = -4\hat{\sigma}_{\alpha 1}^r(0), \quad (42)$$

де  $\sigma_i^r$  ( $i = 0, 1, 2$ ) - відповідні компоненти для визначення напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  у перерізі  $\alpha = 0$ . При цьому КІН  $K_1$  обчислено за формулою (43)

$$K_I = \left[ G_0(\sigma^0 + \sigma_0^r) + G_1\sigma_1^r\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2^r\left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (43)$$

Залежність осьових залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  від відстані  $z$  до осі шва на зовнішній, внутрішній і серединній поверхнях труби зображено на рис. 27, КЗМ  $n$  і  $n_H$  від відносної довжини тріщини  $c/a$  – на рис. 28.

$\sigma_{\alpha\alpha}^r$ , МПа

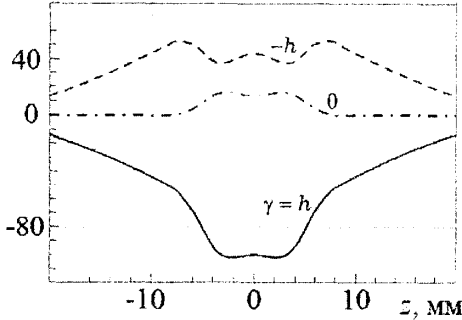


Рис. 27. Залежність осьових залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  від відстані  $z$  до осі шва на зовнішній (суцільна лінія), внутрішній (штрихова) і серединній (штрихпунктирна лінія) поверхнях труби

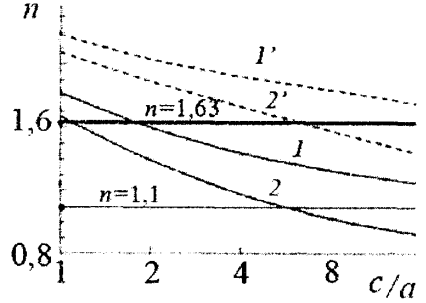


Рис. 28. Залежність КЗМ  $n$  і  $n_H$  від відносної довжини тріщини  $c/a$

Рис. 28 графічно ілюструє залежність КЗМ  $n$  відповідно для глибин тріщин  $a=2$  мм і  $3$  мм з урахуванням дії на їх береги залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r(0)$ , а штрихові лінії  $1'$  та  $2'$  відтворюють аналогічну залежність КЗМ  $n_H$ , коли дефект таких же розмірів знаходиться на відстані від зварного шва, на якій залишкові напруження можна знехтувати і прийняти, що  $\sigma_{\alpha\alpha}^r = 0$ . Як видно з графіків, залишкові напруження можуть суттєво вплинути КЗМ  $n$ . Прямая лінія  $n=1,63$  описує значення допустимого КЗМ. Якщо значення  $n$  знаходиться вище цієї прямої, то дефект вважають допустимим, а ділянку трубопроводу роботоздатною. Коли  $n < 1,1$ , то дефект відносять до категорії критичних, а ділянку трубопроводу вважають нероботоздатною.

У цьому розділі на основі концепції ефективного розмаху КІН оцінено також вплив залишкових напружень на втомне руйнування зварних з'єднань трубопроводів. Швидкість росту втомних тріщин в експлуатаційних умовах залежить як від напружень  $\sigma^H$ , зумовлених дією зовнішніх (робочих) навантажень, так і залишкових (технологічних) напружень  $\sigma^{res}$ , які в свою чергу спричинюють КІН  $K^H$  та  $K^{res}$ . Розмах КІН повністю визначається максимальним і мінімальним значеннями зовнішніх зусиль

$$\Delta K = K_{\max}^H - K_{\min}^H, \quad (44)$$

а складова від залишкових напружень впливає лише на коефіцієнт асиметрії циклу навантаження (відношення мінімального до максимального значень у циклі):

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{K_{\min}^H + K^{res}}{K_{\max}^H + K^{res}}. \quad (45)$$

Застосовано перехід від номінальних до ефективних розмахів КІН за допомогою множника, що характеризує механізм закриття тріщини:

$$U(R) = \frac{\Delta K_{ef}}{\Delta K}. \quad (46)$$

Тоді кінетичні діаграми втомного руйнування матеріалу в “ефективних” координатах  $v \sim \Delta K_{ef}$  практично не залежать від асиметрії навантаження.

Швидкість росту тріщини втоми під дією циклічного навантаження визначасмо, застосовуючи рівняння Періса з урахуванням ефективного розмаху КІН:

$$V = B_{f1} (\Delta K_{ef})^{m_1'}, \quad (47)$$

де  $B_{f1}$ ,  $m_1'$  – інваріантні характеристики матеріалу, коли тріщина знаходиться у зварному шві, тобто  $2c < l_{ш}$ . Тоді з урахуванням умов деформування, за яких у найглибшій точці контуру тріщини ( $\varphi = \pi/2$ ) є плоска деформація, а біля поверхні труби ( $\varphi = 0$ ) реалізується перехідний стан між плоскою деформацією та плоским напруженим станом ( $\alpha = 1,8$ ), рівняння для визначення швидкості росту тріщини вглиб і в поздовжньому напрямку набувають вигляду

$$\frac{da}{dN} = B_{f1} \left[ \Delta K_1^H \Big|_{(\varphi=\pi/2)} (0,608 + 0,734R - 0,340R^2) \right]^{m_1'}; \quad (48)$$

$$\frac{dc}{dN} = B_{f1} \left[ \Delta K_1^H \Big|_{(\varphi=0)} (0,743 + 0,637R - 0,388R^2) \right]^{m_1'}. \quad (49)$$

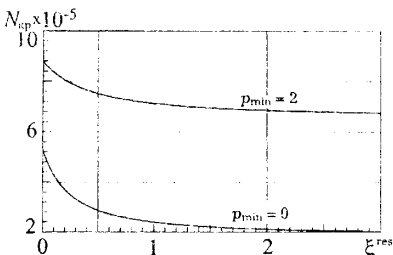


Рис. 29. Залежність критичного числа циклів навантаження  $N_{кр}$  від параметра  $\xi^{res}$

Гут  $\Delta K_1^H = K_{1\max}^H - K_{1\min}^H$ ,  $N$  – цикли навантаження. Початкові умови задані розмірами вихідної тріщини  $a|_{N=0} = a_0$ ,  $c|_{N=0} = c_0$ .

На рис. 29 зображено залежності критичного числа навантаження внутрішнім тиском для різних рівнів залишкових напружень, що характеризуються значеннями параметра  $\xi^{res}$ , для двох випадків: коли  $p_{\min} = 0$  (віднульове навантаження) і



$p_{\min} = 2$ .

З цих залежностей можна оцінити вплив довільних (у межах зміни параметра  $0 \leq \xi^{res} \leq 3$ ) усереднених по поверхні тріщини колових залишкових напружень  $\sigma_{\beta\beta}^{*r}$  на довговічність ділянки труби з поверхневою тріщиною у зварному шві.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

За результатами досліджень, які виконані у дисертаційній роботі, сформульовано основи методології оцінки залишкового ресурсу трубопроводів, що працюють під дією механічних навантажень, робочих середовищ та за наявності у них тріщиноподібних дефектів і залишкових напружень у зоні зварних з'єднань. Методологія спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми – удосконалення існуючих і розроблення нових методів і засобів діагностування напруженого стану, визначення міцності та довговічності труб і зварних з'єднань магістральних нафтогазопроводів з дефектами і з урахуванням особливостей умов їх експлуатації і ґрунтується на таких основних наукових результатах та висновках:

1. Сформульовано критерій циклічної міцності тонкостінних елементів конструкцій для визначення таких безпечних параметрів циклічного навантаження, за яких забезпечується їх заданий ресурс. Він побудований на основі енергетичного підходу визначення гранично-рівноважного стану тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами за двовісного навантаження і враховує внутрішній тиск і розтяг-стиск труби, затиснутої ґрунтом, від теплових змін. Зокрема, показано, що за досягнення осьовими розтягальними напруженнями значення  $0,5\sigma_T$ , критичні колові напруження зменшуються на 20 %.

2. Розроблена математична модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини в тонкостінних елементах конструкцій. При цьому розглянуто два типи матеріалів трубопроводів: високоміцні, де галуження корозійно-механічної тріщини майже відсутнє, і високопластичні, яким воно притаманне. Коректність моделі перевірена результатами відомих експериментальних досліджень і на її основі досліджено вплив корозивно-агресивних і водневовмісних середовищ на міцність і довговічність газопроводів.

3. Запропоновано метод оцінки залишкового ресурсу труби газопроводу в умовах дії вологого сірководню. На основі цього побудовано залежності залишкового ресурсу труби зі сталі X52 від початкового розміру тріщини. Показано, що за активної дії сірководню і заданого навантаження розмір початкової тріщини інтенсивно зростає. Окрема методика враховує випадковість дії навантаження в реальних умовах експлуатації. На цій основі розраховано період залишкової довговічності труби газопроводу до її розгерметизації. Розроблено розрахункову модель навантаження стінки

магістральних нафтопроводів, яке в загальному випадку прийняте двовісним та двочастотним, і введено поняття енергетичної швидкості поширення втомної тріщини та метод еквівалентних площ для визначення періоду докритичного росту втомних тріщин за такого навантаження. На цій підставі створено метод розрахунку залишкового ресурсу труби нафтопроводу з внутрішньою поверхневою тріщиною з урахуванням реальних умов експлуатації.

4. З використанням розробленої розрахункової моделі для визначення періоду зародження втомних тріщин біля сплюснутих концентраторів напружень, а також енергетичного підходу для визначення періоду їх докритичного росту запропоновано спосіб визначення залишкового ресурсу балкового переходу газопроводу з технологічним дефектом за вітрового навантаження. Проаналізовано і побудовано залежності залишкового ресурсу труби від геометричних параметрів дефекту, який змодельовано сплюснутим напівеліпсоїдом.

5. На базі двопараметричного критерію крихко-в'язкого руйнування і рекомендованої на цій основі нормативними документами діаграми оцінки руйнування вперше отримано замкнуті формули для обчислення коефіцієнтів запасу міцності ділянок трубопроводів з тріщинами у зварних з'єднаннях з урахуванням змінних вздовж труби і за її товщиною залишкових напружень. Для конкретних ділянок трубопроводу з зовнішньою і внутрішньою осьовими поверхневими тріщинами у зварному з'єднанні визначено залишкові напруження і їхні усереднені по поверхнях тріщин значення, обчислено коефіцієнт інтенсивності напружень та напруження  $\sigma_{ref}$ , які характеризують механізм в'язкого руйнування (пластичну нестійкість), і на цій основі визначено коефіцієнти запасу міцності. Оцінено вплив залишкових напружень на статичну міцність прямолінійної підземної або наземної в насипі ділянки трубопроводу з осьовими та кільцевими поверхневими тріщинами у зварному шві. Проаналізовано зміну коефіцієнтів запасу міцності для різних глибин і довжин тріщин і згідно з нормативними документами встановлено категорію їхньої небезпеки.

6. Згідно з концепцією ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень і з урахуванням закриття тріщини розроблено методу оцінки впливу змінних за товщиною і довжиною труби залишкових напружень на довговічність ділянки трубопроводу з зовнішньою поверхневою тріщиною у зварному шві. На цій основі для конкретного зварного з'єднання досліджено залежності впливу геометрії тріщини на кількість циклів і різні рівні залишкових напружень. Побудовано діаграми для визначення критичної кількості циклів навантаження внутрішнім тиском для довільних рівнів усереднених по поверхні тріщини колових залишкових напружень. Апробація створених методик на філії МН "Дружба", в акціонерному товаристві "Газтранзит" і фірмі "Розен Юроп Б.В." підтвердили їх достовірність, очікуваний економічний ефект від впроваджень результатів досліджень становить 1 млн. 393 тис. грн.

**Основний зміст роботи відображено у працях**

1. Середницький Я. А. Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті / Я. А. Середницький, Ю. В. Банахевич, А. В. Драгілев. – Львів; Київ: ТзОВ “Сплайн”, 2004. – Ч. 2. – 276 с.
2. Середницький Я. А. Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті / Я. А. Середницький, Ю. В. Банахевич, А. В. Драгілев. – Львів; Київ: ТзОВ “Сплайн”, 2005. – Ч. 3. – 286 с.
3. Середницький Я. А. Противокоррозионная изоляция магистральных газонефтепроводов: справ. / Я. А. Середницький, Ю. В. Банахевич, А. В. Драгілев. – Львов; Киев: ООО “Сплайн”, 2008. – 495 с.
4. Діагностика напружень у трубах шлейфів і трубопровідних обв’язок з корозійними дефектами навколо зварного шва / А. Драгілев, Ю. Банахевич, В. Осадчук, А. Кичма // Наук. вісник Івано-Франк. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2004. – № 2(8). – С. 102–107.
5. Підсилення магистральних трубопроводів бандажами на розширеному бетоні / Б. С. Білобран, С. Ф. Савула, Ю. В. Банахевич, Я. Б. Якимечко // Там само. – 2005. – № 3(12). – С. 97–101.
6. Осадчук В. А. Визначення напруженого стану магистральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів / В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич, О. О. Іванчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. – 2006. – 42, № 2. – С. 99–105.
7. Банахевич Ю. В. Прогнозування росту втомних тріщин в магистральних трубопроводах із врахуванням експлуатаційних умов навантаження / Ю. В. Банахевич, О. І. Дарчук // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 46. – С. 25–28.
8. Захист від корозії зварних стиків магистральних трубопроводів із заводською трипаровою поліетиленовою ізоляцією / К. Фог, Б. Збишевські, Ю. Банахевич, А. Драгілев // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск – 2006. – 42, № 5. – С. 339–345.
9. Банахевич Ю. В. Вплив розташування відносно зварного шва поверхневої тріщини в стінці труби на залишкову довговічність зварного з’єднання / Ю. В. Банахевич, О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // Наук. вісник Івано-Франк. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2007. – № 2 (16). – С. 108–112.
10. Банахевич Ю. В. Визначення залишкового ресурсу нафтопроводу з тріщиною поблизу зварного шва / Ю. В. Банахевич, О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // Машинознавство. – 2007. – № 8. – С. 8–12.
11. Банахевич Ю. В. Оцінювання коефіцієнтів інтенсивності напружень біля тріщин навколо порожнин / Ю. В. Банахевич // Там само. – 2007. – № 12. – С. 9–11.
12. Банахевич Ю. В. Визначення деформаційних параметрів біля півкільцевої мікротріщини навколо мікроямки в півпросторі / Ю. В. Банахевич // Там само. – 2008. – № 11. – С. 38–40.

13. Експериментальний модальний аналіз повітряних переходів магістральних газопроводів / Ю. В. Банахевич, А. А. Мандра, С. Ф. Савула, І. З. Лютак // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 5. – С. 35–37.
14. Осадчук В. А. Вплив ширини зони пластичних деформацій на розподіл тривісних залишкових напружень у плиті з багат шаровим прямолінійним зварним швом / В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич, Л.І. Цимбалюк // Машинознавство. – 2008. – № 2. – С. 3–7.
15. Банахевич Ю. В. Визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання трубопроводу з поверхневою тріщиною / Ю. В. Банахевич, О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // Там само. – 2009. – № 3. – С. 9–12.
16. Андрейків О. Є. Циклічна міцність тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами / О. Є. Андрейків, Ю. В. Банахевич, М. Б. Кіт // Доп. НАН України. – 2009. – № 7. – С. 56–62.
17. Banakhevych Y. Prediction of residual pipeline resource taking into account the operation loading conditions / Y. Banakhevych, J. Andreykiv, M. Kit // Проблеми прочності (Strength of materials the international journal). – 2009. – № 1 (397). – С. 44 – 52.
18. Банахевич Ю. В. Циклічна міцність труб з поверхневими тріщинами / Ю. В. Банахевич, О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2009. – № 1 (30). – С. 23–28.
19. Банахевич Ю. В. Визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань труб методом спекл-інтерферометрії / Ю. В. Банахевич // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 23. – С. 29–34.
20. Банахевич Ю. В. Розрахунок кінетики поширення водневих блістерів у нафтогазовому устаткуванні / Ю. В. Банахевич, О. В. Гембара, О. Є. Андрейків // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 5. – С. 17–25.
21. Банахевич Ю. В. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в околі системи поверхневих тріщин в трубопроводі / Ю. В. Банахевич // Наук. вісник Івано-Франк. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2009. – № 4 (22). – С. 114–119.
22. Банахевич Ю. В. Визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень / Ю. В. Банахевич, А. Сакара // Машинознавство. – 2009. – № 5. – С. 31–33.
23. Банахевич Ю. В. Визначення залишкового ресурсу труби балкового переходу газопроводу при вітровому навантаженні / Ю. В. Банахевич // Там само. – 2010. – № 1-2. – С. 151 – 152.
24. Осадчук В. А. Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб на основі уточненої теорії оболонок / В. А. Осадчук, В. В. Пороховський, Ю. В. Банахевич // Там само. – 2010. – № 3-4. – С. 13 – 19.
25. Сакара А. О. Розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних тріщин в металевих пластинах / А. О. Сакара, Ю. В. Банахевич // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 3. – С. 23–29.

26. Осадчук В. А. Оцінка допустимості дефектів типу кільцевих тріщин в зоні зварних монтажних швів магістральних трубопроводів / В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2010. – **53**, № 2. – С. 37–45.
27. Банахевич Ю. Кінетика сірководнесного розтріскування металу у нафтобазовому устаткуванні / Ю. Банахевич, О. Гембара, О. Андрейків // *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск.* – 2010. – **2**, № 8. – С. 610–614.
28. Сакара А. Математичне моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження та дії водневих і корозійних середовищ / А. Сакара, Ю. Банахевич, І. Лохман // *Там само.* – 2010. – **1**, № 8. – С. 120–124.
29. Діагностування напружено-деформованого стану і оцінка довговічності зварних з'єднань ділянок газопроводів прилеглих до компресорних станцій. Положення. – К.: ДК „Укртрансгаз”, 2009. – 62 с.
30. Патент №7910 України. Спосіб визначення напруженого стану біля зварних з'єднань трубопроводів / А. В. Драгілев, В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич, А. О. Кичма. – Оpubл. 15.07.2005, Бюл. №7.
31. Патент № 10362 України. Процес ремонту ділянок трубопроводу / М.В. Беккер, С.Ф. Савула, Ю.В. Банахевич, О.В. Ганін, О.В. Ганіна, А.О. Кичма, Б.І. Педько. – Оpubл. 15.11.2005, Бюл. №11.
32. Патент № 21540 України. Спосіб ремонту ділянок трубопроводів розташованих на колонах балкових переходів / С.Ф. Савула, Ю. В. Банахевич, Й. Л. Зубик, А. О. Кичма, Я.М. Новіцький. – Оpubл. 15.03.2007, Бюл. № 7.
33. Патент № 42402 України. Пристрій для очистки трубопроводів / В.М. Ажажа, В.А. Пашистий, О.С. Яремкевич, О.М. Бовда, В.П. Новіков, В.С. Яремкевич, Ю.В. Банахевич. – Оpubл. 10.07.2009, Бюл. №13
34. Патент № 47745 України. Спосіб очистки трубопроводів / В.А. Пашистий, С.К. Яремкевич, О.С. Яремкевич, Ю.В. Банахевич. – Оpubл. 25.02.2010, Бюл. №4
35. Патент № 73429 України. Спосіб проведення моніторингу нафтогазопроводу / Ю.В. Банахевич, А.М. Бубняк, І.М. Бубняк, О.В. Івоздевич, А.В. Драгілев, А.О. Кичма. – Оpubл. 15.07.2005, Бюл. №7.
36. Патент № 78828 України. Роз'ємна муфта для ремонту підводних трубопроводів/ А.І. Лаус, В.К. Дячун, Б.С. Петровський, М.М. Дрогомирецький, С.Ф. Савула, Ю. В. Банахевич, А.Г. Голубев. – Оpubл. 25.04.2007, Бюл. №5.
37. Патент № 82884 України. Ізолююча муфта для газо- і нафто трубопроводів / А.І. Лаус, В.М. Коломєєв, Ю.П. Гужов, С.Ф. Савула, Ю.В. Банахевич, В.К. Дячун. – Оpubл. 26.05.2008, Бюл. №10.
38. Патент № 84565 України. Рознімна муфта для ремонту труб підводних переходів газо- і нафто трубопроводів/ Б.С. Петровський, А.І. Лаус, А.О. Герасимович, В.К. Дячун, М.М. Дрогомирецький, С.Ф. Савула, Ю.В. Банахевич. – Оpubл. 10.12.2008, Бюл. №23.

39. Патент № 84855 України. Спосіб проведення підготовчих, ремонтно-відновлювальних і заключних робіт при ремонті ділянок газопроводів, розташованих на опорах балкових переходів/ А.І. Лаус, В.М. Коломєєв, С.Ф. Савула, Ю.В. Банахевич, В.К. Дячун. – Опубл. 10.11.2008, Бюл. №21.
40. Определение остаточных напряжений в трубопроводах около монтажных сварных швов / А.В. Драгилев, Ю.В. Банахевич, В.А. Осадчук, А.А. Кычма // Материали XIV Междунар. деловой встречи ["Диагностика-2004"], (Арабская республика Египет), 2004 – Т. 2. – Ч. 1. – С. 83–86.
41. Діагностування напруженого стану магістральних газопроводів в околі стикових зварних з'єднань розрахунково-експериментальним методом / В. А. Осадчук, А. В. Драгилев, Ю. В. Банахевич, В.В. Пороховський // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: матеріали 3-ої Міжнар. конф. – Львів, 2004. – С. 439–444.
42. Controlling and measuring equipment with dedicated software for diagnostics of pipeline sections near welding joints / A. Dragilyev, Y. Banachevych, V. Osadchuk, A. Kychma // Материали VII міжнародної науково-технічної конференції "Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów", Płock, 2-3 czerwca 2005. – Płock, 2005. – S. 101–104.
43. Расчетно-экспериментальный метод и оборудование для проведения диагностики напряженного состояния сварных соединений трубопроводов / А. В. Драгилев, Ю. В. Банахевич, В. А. Осадчук, А. А. Кычма // Материали XV Междунар. деловой встречи ["Диагностика-2005"]. – Сочи, 2005. – Т. 2, Ч. 1. – С. 122–126.
44. Monitoring methods of technical state of oil and gas pipelines / S. Savula, Y. Banakhevych, A. Dragilyev, A. Kychma // Drilling oil gas. – Krakow, 2006. – № 23/1. – С. 371–376.
45. Банахевич Ю. В. Розрахункова модель оцінки росту втомних тріщин в магістральних трубопроводах в зоні зварних з'єднань / Ю. В. Банахевич // Наукові вісті (Інститут менеджменту та економіки "Галицька академія"). – Івано-Франківськ, 2006. – № 2(10). – С. 121–122.
46. Diagnostics of technological residual stresses in different thickness circumferential welded joints of pipelines / O. Ivanchuk, Y. Banachevych, V. Osadchuk, A. Kychma // 37. Mezinarodni konference "Defektoskopie 2007", listopad 7-9, 2007, Prague, Czech Republic. – P. 97 – 104.
47. Банахевич Ю. В. Визначення довговічності зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною / Ю. В. Банахевич, М. Б. Кіт // 8-ий Міжнар. симп. укр. інженерів-механіків у Львові, 23-25 травня 2007 р. – Львів, 2007. – С. 40.
48. Визначення можливості і умов пропуску діагностичних поршнів на ділянці вантового переходу / І.В. Лохман, Ю.В. Банахевич, М.М. Дрогомирецький та ін. // Трубопровідний транспорт. Спец. вип. "Актуальні проблеми технічного діагностування трубопроводів і технологічного обладнання на них". – 2008. – С. 38–43.

49. Банахевич Ю.В. Дослідно-вимірjувальний комплекс для експериментального визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні кільцевих зварних з'єднань труб магістральних газопроводів / Ю. В. Банахевич // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання: матеріали 5-ої Міжнар. наук.-техн. конф. і виставки (Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008 р.). – С. 130–133.
50. Осадчук В. А. Визначення залишкових напружень і оцінка їх впливу на ріст втомних тріщин в зоні кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів / В. А. Осадчук, Ю. В. Банахевич, В. В. Пороховський // Міцність та надійність магістральних трубопроводів: тези доп. Міжнар. наук.-практ. Конфер. (5-7 червня 2008, Київ, Україна). – Київ, 2008. – С. 91–93.
51. Банахевич Ю. В. Залишковий ресурс труб нафтопроводів з тріщинами і оптимізація параметрів їх експлуатації / Ю.В. Банахевич, О.Є. Андрейків, М.Б. Кіт // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 853–858.
52. Banakhevyeh Y. V. Method for analysis of the influence of residual technological stresses on the safety margin of welded joints of pipelines / Y. V. Banakhevyeh, O. O. Ivanchuk, V. A. Osadchuk // International conference “Pipeline Technology 2009”, (October, 11-14, 2009, Ostend, Belgium). – 2009. – P. 50–54.
53. Бут В. С. Забезпечення технологічної та конструкційної міцності зварних з'єднань підсилюючих елементів з МГ / В.С. Бут, Ю.В. Банахевич, І.М. Олійник // Підвищення надійності та ефективності роботи лінійної частини магістральних газопроводів газотранспортної системи: зб. доп. (Яремче, 2010) / ДК “Укртрансгаз”. – 2010. – С. 34–40.

### АНОТАЦІЯ

**Банахевич Ю.В. Прогнозування залишкової міцності та довговічності ділянок нафтогазопроводів з дефектами за експлуатаційних умов. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2011.

Дисертацію присвячено створенню теоретичних моделей, а відтак на їх основі – критеріїв та методик розрахунку залишкової міцності і довговічності нафтогазопроводів із наявними у них дефектами під дією циклічного і статичного навантажень та робочого середовища. Побудовано критерії циклічної міцності елементів трубопроводу з тріщинами, за якими можна визначати такі параметри циклічного навантаження, за яких забезпечується заданий ресурс експлуатації; розроблено розрахункову модель для визначення періоду зародження втомної тріщини біля сплюсненого концентратора напружень. Встановлено вплив корозивно-активних і водневовмісних середовищ на міцність і

довговічність газопроводів шляхом прогнозування росту корозійно-механічної тріщини в трубопроводах, виготовлених з високопластичних і високоміцних матеріалів, та на основі створених математичних моделей запропоновано методику розрахунку залишкового ресурсу труби газопроводу з дефектом в умовах дії вологого сірководню.

Вперше отримано замкнуті формули для обчислення коефіцієнтів запасу міцності ділянок трубопроводів з тріщинами у зварних з'єднаннях з урахуванням змінних вздовж труби і за її товщиною залишкових напружень. Оцінено вплив цих напружень на статичну міцність ділянки трубопроводу з поверхневими тріщинами у зварному шві і, згідно з нормативними документами, встановлено категорійність їхньої небезпеки.

**Ключові слова:** магістральний трубопровід, тріщина, критерії руйнування, двочастотне навантаження, втомне поширення тріщини, корозійно-водневе розтріскування, зварні з'єднання, залишкові напруження, ресурс.

## АННОТАЦІЯ

**Банахевич Ю.В. Прогнозирование остаточной прочности и долговечности участков нефтегазопроводов с дефектами в эксплуатационных условиях. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2011.

Предметом диссертационных исследований является остаточная прочность и долговечность труб магистральных трубопроводов и их сварных соединений с трещинообразными дефектами, которые в эксплуатационных условиях подвергаются воздействию двухчастотных и двухосных переменных силовых нагрузок, сварочных остаточных напряжений, корозионно-агрессивных и водородосодержащих сред. Для их реализации применены методы и критерии механики разрушения, первый закон термодинамики для оценки энергетического баланса распространения усталостных трещин при этих нагрузках, методы физико-химической механики разрушения с учетом совместного действия эксплуатационных нагрузок и рабочих сред, теория оболочек, прямой метод интегрирования уравнений для трехосного распределения остаточных напряжений, интегральные преобразования, расчетно-экспериментальная оценка остаточного напряжения, неразрушающие методы определения характеристик напряженного состояния, двухкритериальный расчет предельного состояния трубопроводов.

Исходя из созданных теоретических моделей, а на их основе – критериев и методик расчета остаточной прочности и долговечности нефтегазопроводов с дефектами под действием циклического и статического нагружений и рабочей среды, построены критерии циклической прочности элементов трубопровода с



трещинами, позволяющие определить такие параметры циклической нагрузки, при которых обеспечивается заданный ресурс эксплуатации; разработана расчетная модель для определения периода зарождения усталостной трещины возле сплющенного концентратора напряжений. Установлено влияние коррозионно-активных и водородосодержащих сред на прочность и долговечность газопроводов путем прогнозирования роста коррозионно-механической трещины в трубопроводах, изготовленных из высокопластичных и высокопрочных материалов, на основании созданных математических моделей предложена методика определения остаточного ресурса трубы газопровода с дефектом в условиях действия влажного сероводорода. Получены выражения для количественной оценки циклической долговечности на стадии развития усталостной трещины с учетом наложения высокочастотной составляющей с низкой амплитудой на низкочастотную.

Впервые получены замкнутые формулы для вычисления коэффициентов запаса прочности участков трубопроводов с трещинами в сварных соединениях с учетом переменных вдоль трубы и по ее толщине остаточных напряжений. Оценено влияние этих напряжений на статическую прочность участка трубопровода с поверхностными трещинами в сварном шве и, согласно нормативным документам, установлены категории их опасности. Согласно концепции эффективного размаха коэффициентов интенсивности напряжений с учетом закрытия трещины разработана методика оценки влияния остаточных напряжений на долговечность участка трубопровода с поверхностной трещиной в сварном шве.

Оценено влияние параметров, характеризующих ширину зон локализации и градиентов по длине и толщине труб термопластичных деформаций, на уровень и распределение остаточных напряжений в зонах кольцевых сварных швов трубопроводов. Проанализировано изменение коэффициента запаса прочности для разных глубин и длин трещин. Построены диаграммы для определения критического числа циклов нагружения внутренним давлением для произвольных уровней усредненных по поверхности трещины кольцевых остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** магистральный трубопровод, трещина, критерии разрушения, двухчастотное нагружение, усталостное распространение трещины, коррозионно-водородное расстрескивание, сварные соединения, остаточные напряжения, ресурс.

#### ANNOTATION

**Banakhevych Yu.V. Prediction of the remaining strength and lifetime of the defect-containing fragments of oil and gas transmission pipelines under service conditions. – Manuscript.**

The dissertation for the scientific degree of doctor of engineering sciences, specialty 05.15.13 – pipeline transportation, oil and gas storage. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2011.

The dissertation is dedicated to development of theoretical models and relevant criteria and methods for evaluation of the remaining strength and lifetime of the defect-containing fragments of oil and gas transmission pipelines under cyclic and static stress and working environment. The criteria for cyclic strength of the pipeline with cracks have been developed. This allows determining the parameters of cyclic loading, which provide certain lifetime for the considered pipeline. The numerical model has been developed for determining the initiation time of a fatigue crack near the flattened stress concentrator. Using prediction for stress corrosion crack growth in the pipelines made for highly plastic and high strength materials the influence of aggressive corrosive and hydrogen-containing environment on strength and lifetime of gas pipelines has been determined. Employing the presented mathematic models a method for residual lifetime calculations is proposed for a defect-containing gas pipeline that works under the influence of wet hydrogen sulfide environment.

For the first time closed expressions for calculating the assurance factors for pipelines with cracks in welded joints subject to residual stresses that vary along the length and across the section of a pipeline. The influence of these stresses is evaluated concerning static fracture toughness of a pipeline containing surface cracks in a welded joint and the corresponding category of danger according to the regulatory documentation is established.

**Key words:** pipeline, crack, fracture criterion, bifrequential loading, propagation of a fatigue crack, stress corrosion cracking, hydrogen-induced cracking, welded joints, residual stress, lifetime.