

622.692.4
Б23

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Банахевич Юрій Володимирович

УДК 622.692.4

**ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ
НАФТОГАЗОПРОВІДІВ В ОКОЛІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ
ТА КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ РОЗРАХУНКОВО-
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МЕТОДОМ**

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

П/ІНВ

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Івано-Франківськ – 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Осадчук Василь Антонович, Національний
університет "Львівська політехніка", завідувач
кафедри "Зварювальне виробництво, діагностика та
відновлення металоконструкцій"

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор

Капцов Іван Іванович,

Український науково-дослідний інститут природних газів,
Завідувач відділу транспорту газу, м. Харків

Кандидат технічних наук, доцент

Бакаєв Віталій Васильович,

Голова представництва фірми РОЗЕН Юроп Б.В. в Україні, м. Київ

Провідна установа: ІВП "Всеукраїнський науковий і проектний інститут
транспорту газу" (ВНПТТРАНСГАЗ), м. Київ

Захист відбудеться 29 січня 2004 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті
нафтогазової справи, вул. Карпатська, 15.

З д... Івано-
Фра... пресою:
7601

Авто

спеці
канди

ута

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більшість магістральних трубопроводів (МТ) експлуатують уже тривалий час і немало з них відпрацювали амортизаційний термін. У зв'язку з цим актуально всебічно обстежити МТ та окреслити можливості подальшого їх використання. Щоб надійно оцінити працездатність трубопроводів, необхідний комплексний підхід, однією з важливих складових якого є визначення напруженого стану труби, зокрема, в місцях із дефектами та в зварних з'єднаннях, з якими пов'язано 70–80% усіх відмов МТ. Особливо це стосується зварних кільцевих швів, які після зварювання, як правило, додатково не обробляються, щоб зменшити залишкові напруження. Наявність дефектів у біляшовній зоні труби в процесі експлуатації може привести до передчасного руйнування трубопроводу. Однією з причин виникнення їх у металі труб і зварних з'єднаннях є корозія. Поверхневі дефекти, викликані корозією або іншими причинами, є типовими uszkodженнями трубопроводів. Вони як концентратори напружень можуть істотно впливати на надійність та довговічність МТ. Аналіз на основі критеріїв механіки руйнування показує, що в високов'язких пластичних трубних сталях можуть стабільно існувати достатньо великі докритичні тріщини, що не розвиваються.

Однак практика експлуатації трубопроводів свідчить, що в складних умовах, навіть, коли нормативні експлуатаційні напруження не перевищені, дефекти в стінці труби розвиваються і, досягнувши критичних розмірів, можуть викликати аварійні ситуації. Як показали дослідження, розвиток дефектів залежить від додаткових напружень, що спричинені різними зовнішніми та внутрішніми чинниками, зокрема, залишковими технологічними деформаціями. Це зумовило вибір теми дисертації, визначило предмет, мету, завдання та структуру дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконували 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 на 2001–2005 р.р.”, та проекту 5.4.8.Б “Розробка методів теоретично-експериментального визначення напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу за міцністю зварних металевих конструкцій при неоднорідному нагріві та силовому навантаженні”, номер державної реєстрації 0103U006117.

Мета і задачі дослідження. *Мета праці* – визначити зварювальні залишкові напруження у МТ розрахунково-експериментальним методом із урахуванням нерівномірності їхнього розподілу під давачами приладів, за допомогою яких вимірюють усереднені характеристики напружень фізичними методами, та структурних перетворень у зоні термічного впливу і на цій основі оцінити напружений стан в околі зварних кільцевих швів біля корозійних дефектів металу труб типу виразок-каверн.



Відповідно до мети були поставлені такі задачі:

- розвинути розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень в околі стикового кільцевого зварного з'єднання труб, ураховуючи нерівномірність їх розподілу під давачами вимірювальних приладів та вплив структурно-фазових перетворень в зоні термічного впливу на магнітну проникність металу;

- дослідити напружений стан зварних стиків труб, ураховуючи їх часткову релаксацію в процесі експлуатації нафтогазопроводів;

- створити математичну модель для визначення концентрації напружень в околі поверхневих дефектів у МТ в зоні зварного шва та її реалізацію методом скінченних елементів;

- розробити переносний пристрій для вимірювання розмірів дефектів МТ і дослідити напружений стан біля них;

- побудувати інженерні формули для коефіцієнтів концентрації напружень в околі дефектів труби, що змодельовані півеліпсоїдом обертання. На цій основі визначити розподіл напружень біля дефектів і отримані результати порівняти з експериментальними;

- оцінити коефіцієнти запасу міцності магістрального газопроводу з дефектами типу виразок-каверн в зоні стикового зварного з'єднання.

Об'єкт дослідження. Зварні стики та корозійні дефекти магістральних нафтогазопроводів.

Предмет дослідження. Залишкові технологічні напруження в околі зварних стикових з'єднань кільцевим швом та їх перерозподіл біля дефектів типу виразок-каверн в трубах МТ.

Методи досліджень. У дисертації застосовували: метод розв'язування обернених задач механіки деформівних тіл із власними напруженнями з використанням експериментальної інформації, здобутої за допомогою неруйнівних методів; метод скінченних елементів з використанням напіваналітичної схеми, яка базується на розвиненні переміщень у трубі в ряд Фур'є за кутовою координатою та їх білінійній апроксимації на чотирикутних елементах в осьовому перерізі; загальновідомі методи планування та експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень напруженого стану в околі зварних з'єднань і корозійних дефектів у МТ отримано нові наукові результати, які виносяться на захист:

- розвинуто розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень біля стикових зварних швів без попереднього оброблення торців труб, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформівних твердих тіл із власними напруженнями з використанням експериментальної інформації, здобутої

фізичними методами, і врахуванням неоднорідності їх розподілу під навантаженнями вимірювальних приладів та структурно-фазових змін у зоні термічного впливу;

- опрацьовано методику визначення впливу структурно-фазових перетворень в околі шва на початкові покази приладу SMMT-3, за допомогою якого реалізується електромагнітний метод;

- отримано узагальнені формули для визначення теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень трубопроводів біля поверхневих дефектів, змодельованих півеліпсоїдом обертання;

- проаналізовано розподіл напружень в околі зварних швів та дефектів типу виразок-каверн у магістральних нафтогазопроводах, для визначення яких розроблено програмне забезпечення;

- оцінено вплив залишкових технологічних напружень на коефіцієнт запасу міцності трубопроводу з дефектами типу виразок-каверн в околі кільцевого зварного шва.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичних та експериментальних досліджень вироблено підхід до діагностування напруженого стану в околі зварних з'єднань та дефектів поверхні елементів магістральних трубопроводів, зокрема розроблено:

- методику та програмне забезпечення для обчислення напруженого стану в околі зварних стикових з'єднань із кільцевим швом у трубах МГ, зварених без попереднього оброблення торців;

- методику та пакет програм для обчислення напруженого стану в околі дефектів стінки труби у вигляді півеліпсоїда обертання в елементах магістральних трубопроводів;

- переносний пристрій для контролю дефектів поверхні, зокрема, на великогабаритних трубопроводах, який можна використати під час експлуатації нафтогазотранспортних систем.

Результати досліджень практично застосовано для оцінки технічного стану під час ремонтів магістрального газопроводу (МГ) "Союз" на ділянці УМГ "Прикарпаттрансгаз" (сподіваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 189,6 тис. грн.) та під час проведення технічного нагляду над будівництвом нафтопроводу "Одеса-Броди" (передбачуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 170 тис. грн.).

Особистий внесок здобувача. Автор дисертації виконав таку працю:

1. Проаналізувавши результати технічного стану МГ з довготривалим терміном експлуатації, запропонував технологію їх діагностики і паспортизації в УМГ "Львівтрансгаз" [6,11,12,14].

2. Запропонував і впровадив технологію підготовки і проведення внутрішньотрубної діагностики МГ на газопроводах УМГ "Львівтрансгаз" [8,13].

3. Експериментально визначив напружено-деформований стан МГ за допомогою електромагнітного методу [7,10].

4. Визначив залишкові напруження біля кільцевих зварних з'єднань труб, врахувавши нерівномірність їхнього розподілу під давачами приладів та структурні зміни у зоні термічного впливу [4,5].

5. Запропонував і опрацював методику обчислення напружень в околі дефектів у формі півеліпсоїда обертання методом скінченних елементів [1-3].

6. Розробив пристрій для контролю дефектів поверхні МТ [9].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на : 3-й Науково-технічній конференції і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового обладнання". (Івано-Франківськ, 2002); VI-й (Москва, 1996); IX-й (Сочі, 1999); XI-й (Туніс, 2001); XII-й (Туреччина, 2002) і XIII-й (Мальта, 2003) Міжнародних ділових зустрічах «Діагностика»; IV-му (1999); V-му (2001) і VI-му (2003) Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові; VI-й Міжнародній науково-практичній конференції "Нафта і газ України - 2000" (Івано-Франківськ, 2000); 5-й Міжнародній конференції "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій" (Луцьк, 2002); Міжнародній конференції-виставці "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів" "КОРОЗІЯ" (Львів, 2002).

У повному обсязі результати досліджень доповідались на розширеному засіданні кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій Національного університету "Львівська політехніка" та розширеному науковому семінарі факультету нафтогазопроводів ІФНТУНГ.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, в тому числі 6 у фахових наукових виданнях та одержано 2 патенти (авторські свідоцтва на винахід).

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'ятьох розділів, підсумкових висновків, списку використаної літератури, який налічує 166 найменувань і 4 додатків. Основний зміст роботи викладений на 147 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета та задачі дослідження й описана структура роботи.

У першому розділі проаналізовано причини виникнення залишкових напружень у зварних швах МТ та методи їх визначення.

Розв'язанню широкого кола теоретичних і практичних задач проектування, будівництва, експлуатації і діагностування технічного стану трубопроводів присвячені праці відомих спеціалістів А.Б. Айбіндера, Л.А. Бабіна, В.П. Березіна, П.П. Бородавкіна, Й.В. Перуна, Л.С. Шлапака. Технічне діагностування

технологічних напружень в зварних з'єднаннях конструкцій і споруд висвітлено, зокрема, в працях В.А. Вінокурова, К.М. Гатовського, Б.С. Касаткіна, В.І. Кирьяна, 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. Аналіз літератури у цій галузі та практичний досвід експлуатації МТ уможливив виділити комплекс задач, що склали основу дисертації.

Особливе значення для надійності лінійної частини трубопровідних систем має оцінка їхнього стану на стадії експлуатації. Тут важливу роль відіграє технічне діагностування, як ефективний засіб прогнозування та запобігання аварійних ситуацій, а також екологічного захисту й забезпечення промислової безпеки. Сучасні способи щодо забезпечення надійної експлуатації МТ ґрунтуються, як правило, на своєчасному виявленні дефектів, які виникли та розвиваються з тих чи інших причин, та прогнозуванні залишкового ресурсу з урахуванням таких дефектів.

Значної уваги заслуговує розгляд екстремальних ситуацій, які виникають в трубопроводах, прокладених у гірських районах з різко змінними рельєфом місцевості і гідрогеологічних властивостей ґрунтів, а також на водних і заболочених ділянках. Комплексне вирішення вказаних задач в основі своїй повинно ґрунтуватися на методології діагностики напружено-деформованого стану МТ, яка дозволила б оцінити і прогнозувати працездатність потенційно небезпечних ділянок газотранспортної системи. Важливо визначити залишкові напруження, що виникають під час зварювання магістральних трубопроводів. У трубопроводах виникає, як правило, двовісний напружений стан з характерною зоною температурного впливу. Залишкові напруження у зоні зварного з'єднання двох труб є знакозмінні й нерівномірно розподілені по товщині труби, що посилює їхній вплив на корозійну тривкість металу.

Існують різні експериментальні неруйнівні методи визначення напружень. Проте вони не завжди придатні для діагностування зварних з'єднань через недостатню повну інформацію про розподіл напружень в об'ємі елемента конструкції. Щоб застосувати розрахункові методи треба знати режими зварювання і способи зменшення напружень після зварювання у з'єднанні. Це утруднює, а здебільшого й не дає змоги використати ці методи для діагностики напружень у трубопроводах тривалої експлуатації. У зв'язку з цим удосконалення наявних та створення нових методів, зокрема, експериментально-розрахункових, для визначення напруженого стану в околі зварних стиків труб та дефектів матеріалу – важливе та актуальне завдання технічної діагностики.

Виходячи із сучасного стану проблеми, сформульовано мету і задачі дисертації, результати розв'язання яких викладено у наступних розділах.

Другий розділ присвячено розвитку розрахунково-експериментального методу визначення залишкових напружень в околі зварних швів так, щоб можна було врахувати неоднорідність напруженого стану під давачами вимірювальних

приладів та структурні перетворення в зоні термічного впливу. Суть цього методу полягає ось у чому. Спочатку записують основні співвідношення і диференціальні рівняння теорії оболонок із залишковими деформаціями, які одержують, використовуючи зображення компонентів тензора повної деформації e_{ij} у вигляді суми компоненти тензора пружної деформації e_{ij}^e та компоненти тензорного поля пластичних власних деформацій e_{ij}^0 . Це поле описують тензорною функцією, що належить до деякого компакту та залежить від декількох довільних параметрів. Потім функцію e_{ij}^0 підставляють у ключові диференціальні рівняння, будують розв'язки цих рівнянь і записують вирази для визначення напружень у довільній точці оболонки. У ці вирази входять невідомі параметри, що характеризують функцію e_{ij}^0 . Для їх знаходження використовують експериментальну інформацію про поле залишкових напружень або їх усереднені характеристики, які можна здобути неруйнівними методами, і будують функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальні відхилення теоретично обчислених I_K^T від експериментальних I_K^E характеристик полів напружень. Тоді задачу про знаходження поля e_{ij}^0 розв'язують як обернену задачу теорії оболонок із залишковими деформаціями, яка є умовно коректною. Знайшовши невідомі параметри, обчислюють компоненти тензора напружень, зокрема ті, які не можна отримати експериментально.

Обчислені цим методом залишкові напруження задовольняють рівняння рівноваги, сумісності деформацій і крайові умови, а їх точність визначає обсяг і похибки експериментальних даних.

Для кругової циліндричної оболонки завтовшки $2h$ під дією осесиметричних залишкових технологічних деформацій ключове рівняння для визначення нормального до серединної поверхні переміщення (прогину) труби W (рис.1) має вигляд

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4a^4 \right) W = 4a^4 R \varepsilon_{\beta\beta}^0 - R^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (\chi_{\alpha\alpha}^0 + \mu \chi_{\beta\beta}^0). \quad (1)$$

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

$a^4 = 3R^2(1 - \mu^2)/(4h^2)$, μ - коефіцієнт Пуассона, R - радіус серединної поверхні труби, $\alpha = z/R$ - безрозмірна координата вздовж осі труби (початок координат

вибрано в площині осі шва), γ - координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні.

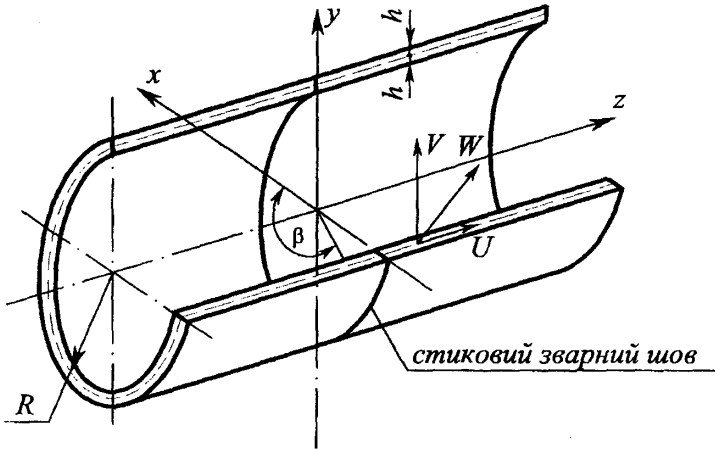


Рис.1. Модель трубопроводу зі стиковим зварним з'єднанням у вигляді замкненої колової циліндричної оболонки: U , V та W - компоненти вектора переміщень точки серединної поверхні вздовж осі, дотичної до кола та нормалі до неї

Використовуючи апарат теорії узагальнених функцій, побудовано інтегральне подання розв'язку рівняння (1) і колових $\sigma_{\beta\beta}$ та поздовжніх $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень у трубі через локальні тензорні поля пластичних деформацій. Записано функціонал для визначення невідомих параметрів, які входять у функції, що апроксимують поля технологічних деформацій.

У третьому розділі визначено та проаналізовано розподіл залишкових напружень у трубопроводі, зі сталі 17Г1С, в околі кільцевого зварного шва, виконаного без попереднього оброблення торців труб. Поле локалізованих біля шва власних пластичних колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ деформацій апроксимовано функціями

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha) = \begin{cases} -\varepsilon_0^* \varphi(\alpha), & |\alpha| \leq \alpha_0, \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_0; \end{cases} \quad e_{\alpha\alpha}^0(\alpha) = k e_{\beta\beta}^0(\alpha). \quad (3)$$

Тут ε_0^* - максимальні пластичні деформації; $\varphi(\alpha)$ - функція, що описує епюру пластичних деформацій від зварювання

$$\varphi(\alpha) = 1 - s \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} - (1-s) \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4}, \quad 0 \leq s \leq 2; \quad (4)$$

k і s – сталі параметри, $\alpha_0 = z_0 / R$ (z_0 - півширина зони пластичних деформацій). При $s = 2$ функція φ та її похідна на границі $\alpha = \pm\alpha_0$ дорівнюють нулеві.

Підставивши вирази (3), (4) у співвідношення (2), а потім у рівняння (1) та, використавши апарат узагальнених функцій для визначення прогину $W(\alpha)$, отримано вираз

$$W(\alpha) = -\frac{R\varepsilon_0^* a}{2} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\zeta) e^{-\alpha|\zeta-\alpha|} [\cos\alpha(\zeta-\alpha) + \sin\alpha|\zeta-\alpha|] d\zeta. \quad (5)$$

Далі, використавши рівності (4), (5) та відповідні співвідношення для напружень, отримано в замкнутій формі формули для обчислення колових $\sigma_{\beta\beta}$ та осевих $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень у довільній точці труби. Записано вирази для обчислення усередненої по площі зони контакту давача з трубою різниці головних напружень, яку можна знайти експериментально за допомогою електромагнітного методу, і усередненої по об'єму труби різниці цих напружень, яку визначають ультразвуковим методом.

Використовуючи запропонований розрахунково-експериментальний метод, визначено залишкові напруження в околі кільцевого зварного шва газопроводу "Івацевичі-Долина III нитка" ($\varnothing 1220 \times 12$ мм) на ділянці Волинського ЛВУМГ. Експериментальні дані отримано електромагнітним методом, використовуючи прилад SMMT-3, за допомогою якого в конструкціях із феромагнітних матеріалів за двовісного напруженого стану визначали напрямки головних нормальних напружень та усереднену по площі контакту давача їх різницю. Під час вимірювань фіксували відлікові покази приладу в ненапруженому зразку із матеріалу конструкції у напрямку головних напружень.

У зоні термічного впливу (ЗТВ), де пройшли структурні перетворення, зумовлені зварюванням, магнітна проникність металу буде іншою, ніж в основному металі. Це впливає на відлікові покази приладу і враховувалось під час опрацювання результатів вимірювань. Для цього з запасу труб або з труби під час ремонту вирізали зразки зі зварним швом і еталонний тарувальний зразок із основного металу. Потім в зразках зі зварним швом знімали напруження і вимірювали початкові покази приладу в основному металі і в зоні структурних змін, обчислювали їх різницю і враховували її, визначаючи усереднені характеристики напружень у цій зоні. Результати обробки експериментальних даних апроксимовано поліноміальною функцією.

Для відшукання параметрів поля пластичних деформацій ε_0^* і α_0 побудовано функціонал

$$g(\varepsilon_0^*, \alpha_0) = \sum_{n=1}^N P_n [\sigma_+^T(\alpha_n, \varepsilon_0^*, \alpha_0) - \sigma_+^E(\alpha_n)]^2, \quad (6)$$

де σ_+^T та σ_+^E – усереднена по площі контакту давача з зовнішньою поверхнею труби ($\gamma = +h$) різниця головних напружень, виражена теоретично і знайдена експериментально, α_n – координати центру давача, P_n – вагові коефіцієнти.

Використавши запис (6) та результати експериментальних даних, шляхом мінімізації функціоналу знайдено амплітуду і зону пластичних деформацій ($\varepsilon_0^* = 1,28 \cdot 10^{-3}$, $z_0 = R\alpha_0 = 21,80$ мм) та обчислено коллові й осьові напруження на поверхнях труби біля стикового зварного шва (рис. 2).

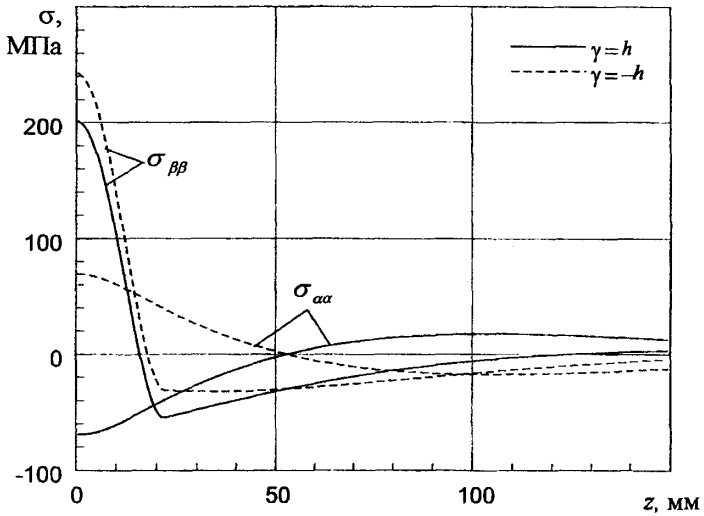


Рис.2. Зміна коллових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень з віддаленням від осі стикового зварного шва трубопроводу

Для оцінки зміни максимальних залишкових напружень, зумовленої впливом структурних перетворень в ЗТВ на відлікові покази приладу SMMT-3 числово проаналізовано розподіл напружень для різних значень $\sigma_+^E(z_1)$ в зоні зміни структури.

Значення $\sigma_1^+(z_1)$ ступінчасто зменшували по 10% до 50% (табл. 1). На цій основі встановлено: якщо поправка відлікових показів вимірювань у зоні структурних перетворень не перевищує 30%, то це може спричинити відносну зміну максимальних напружень біля 4%.

Таблиця 1. Залежність максимальних напружень від значення $\sigma_+^E(z_1)$ в зоні структурних перетворень

$\Delta\sigma_+^E(z_1), \%$ / $\sigma_{ii}^{\max}, \text{МПа}$	$\sigma_{\beta\beta}^-$	$\sigma_{\beta\beta}^+$	$\sigma_{\alpha\alpha}^+$
0	247,02	204,93	-70,14
10	249,06	207,06	-69,99
20	252,12	210,14	-69,95
30	254,35	212,46	-69,82
40	257,61	215,74	-69,79
50	260,88	219,03	-69,74

Таким чином, розроблений алгоритм розрахунку залишкових технологічних напружень в околі зварного шва з використанням експериментальної інформації дає змогу враховувати нерівномірність розподілу напружень під давачами приладів і коректувати відлікові покази приладу в зоні структурних перетворень.

Четвертий розділ присвячено дослідженню концентрації напружень у трубопроводі з корозійним дефектом типу виразки-каверни в околі зварного шва, змодельованим півеліпсоїдом обертання (рис. 3).

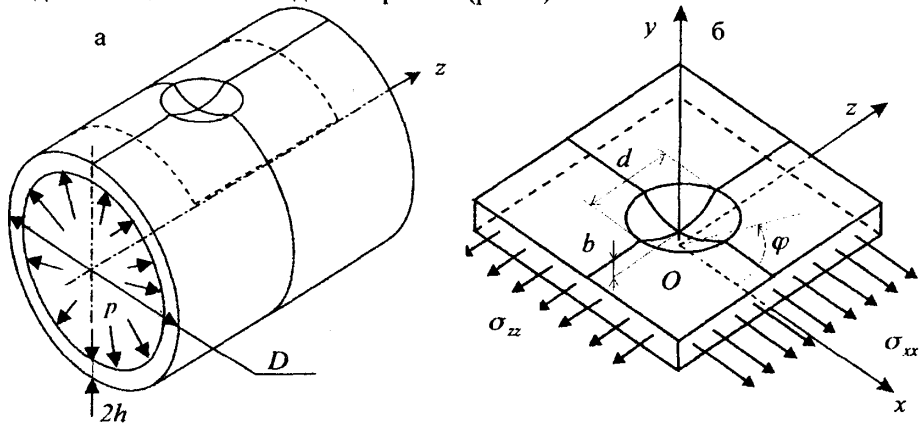


Рис.3. Труба з поверхневим дефектом (а) і розрахункова модель (б): D і $2h$ - зовнішній діаметр і товщина труби; p - тиск у трубі, $d = 2c$ - діаметр дефекта; b - глибина дефекта

Припускаючи малу товщину труби проти її діаметра (як у магістральних трубопроводах), вихідна задача зведена до визначення напружень у шарі, який розтягують у поперечному напрямку розподіленими зусиллями інтенсивності σ_{xx} , а

у поздовжньому – σ_{zz} (рис. 36). На відстані кількох діаметрів дефекта ці напруження дорівнюють сумі основних напружень σ_1 і σ_2 та залишкових напружень – $\sigma_{\alpha\alpha}$, $\sigma_{\beta\beta}$, тобто $\sigma_{xx} = \sigma_1 + \sigma_{\beta\beta}$, $\sigma_{zz} = \sigma_2 + \sigma_{\alpha\alpha}$.

Задача теорії пружності про розтяг шару з круговим у плані дефектом сформульована в циліндричній системі координат (r, φ, z) і зведена до еквівалентної проблеми мінімізації функціонала Лагранжа на множині кінематично допустимих переміщень. Для її числового розв'язування застосовували напіваналітичну схему методу скінченних елементів (МСЕ). Шукані компоненти напружено-деформованого стану подано у формі розвинення в ряд Фур'є за кутовою координатою φ . Для апроксимації переміщень в осьовому перерізі застосовано ізопараметричні білінійні чотирикутні елементи. Це забезпечує неперервність переміщень уздовж меж елементів, що гарантує збіжність МСЕ. Розрахункова схема МСЕ включає програмний комплекс, що містить основну та 27 допоміжних програм. Програми дозволяють проводити аналіз концентрації напружень в області дефекту довільної в осьовому перерізі форми. Для півеліпсоїда обертання та циліндричної порожнини з еліпсоїдальним дном автоматично генерується сітка МСЕ зі згущенням в зонах найбільшої кривини поверхні дефекту. Комплекс програм здійснює розрахунок переміщень у вузлах сітки, напружень на елементах та у точках зовнішньої поверхні, напружень по рухомому перерізу у вихідній прямокутній системі координат.

Тестували програмний комплекс порівнянням числових результатів з аналітичними розв'язками просторової задачі теорії пружності про напруження в пластині з наскрізним циліндричним отвором під одновісним розтягом та циліндричним згином. Це підтвердило збіжність числового розв'язку до аналітичного при згущенні сітки МСЕ та дало змогу вибрати згущення, необхідне для досягнення адекватної точності визначення максимальних напружень.

За допомогою розробленого математичного забезпечення проведено аналіз концентрації напружень біля дефектів типу виразок-каверн за даними, отриманими при обстеженні МГ "Івацевичі-Долина III нитка" ($D = 1220$ мм, $2h = 12$ мм, $p = 4,5$ МПа, матеріал труби – сталь 17Г1С).

Розглянуто три різні розташування дефектів у характерних зонах залишкових напружень: 1 – у зоні найбільших розтягальних залишкових напружень (центр дефекту на осі шва $z = 0$); 2 – у зоні найбільших стискальних залишкових напружень (20 мм $\leq z \leq 70$ мм); 3 – у зоні майже рівномірного розподілу залишкових стискальних колових напружень (70 мм $\leq z \leq 120$ мм). Проаналізовано розподіл напружень на зовнішній поверхні труби включно з поверхнею дефекту для різних його радіусів і глибин.

На рис. 4 для дефекту, розміщеного в зоні 1, зображено розподіл колових напружень на його поверхні та зовнішній поверхні труби вздовж осі трубопроводу і вздовж осі шва.

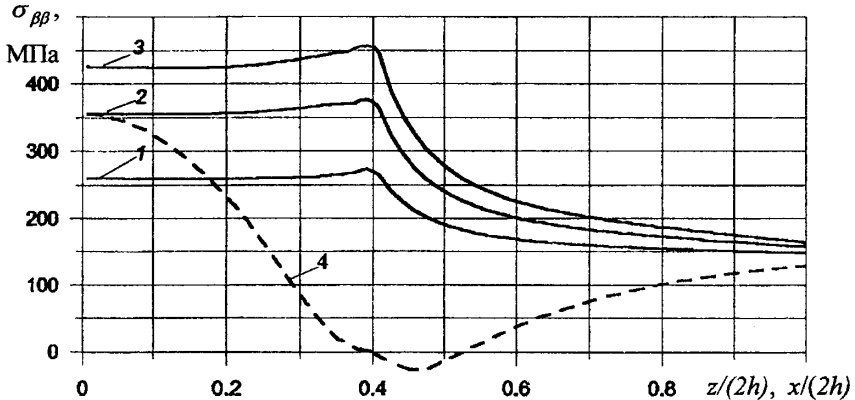


Рис.4. Розподіл колових напружень на зовнішній поверхні труби включно з дефектом: криві 1-3 вздовж осі трубопроводу для глибин дефекту відповідно $b/(2h) = 0,2; 0,4; 0,6$; крива 4 – вздовж осі шва при $b/(2h) = 0,4$

Із наведених графіків видно, що максимальними є колові напруження на поверхні дефекта в осьовому перерізі труби. Ці напруження на поверхні дефекта в осьовому перерізі труби зростають, а в напрямку осі шва зменшуються.

У п'ятому розділі оцінено напружений стан МТ з дефектами, які виявила зовнішня або внутрішньотрубна діагностика. Для зовнішнього обстеження корозійних пошкоджень трубопроводів розроблено пристрій для контролю дефектів. Застосування в запропонованому пристрої оптичних віддалемірів, встановлених на рухомих каретках, зв'язаних з блоком керування, підвищило точність обстеження корозійних пошкоджень, частково автоматизувало та спростило процедуру вимірювання. Для оперативного визначення місця корозійних дефектів у МТ використовували розроблену багатоканальну електромагнітну пошуково-вимірювальну систему.

Щоб підтвердити метод визначення напружень у трубопроводі з дефектом, розроблено і виготовлено експериментальне устаткування з двох труб зі сталі 17Г1С (1020x10 мм), зварених стиковим швом. На трубі змодельовано корозійні дефекти, розміри яких задавались згідно статистичної обробки результатів внутрішньотрубної діагностики МГ „Івацевичі – Долина III нитка” на ділянці від КС „Ковель” до КС „Сокаль”. Це дало можливість у лабораторних умовах якісно

моделювати напружений стан в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень нафтогазопроводів.

Випробування показали добре узгодження експериментальних даних і розрахункових величин в околі дефекта. На рис.5 зіставлено результати, отримані на основі математичної моделі і експериментів. Тут розподіл по товщині в коловому напрямку напружень у вигляді ізоліній отримано із застосуванням розроблених програм. Розташування тензодавачів на поверхні труби показано грубими рисками, над якими вказані значення експериментально визначених напружень в МПа.

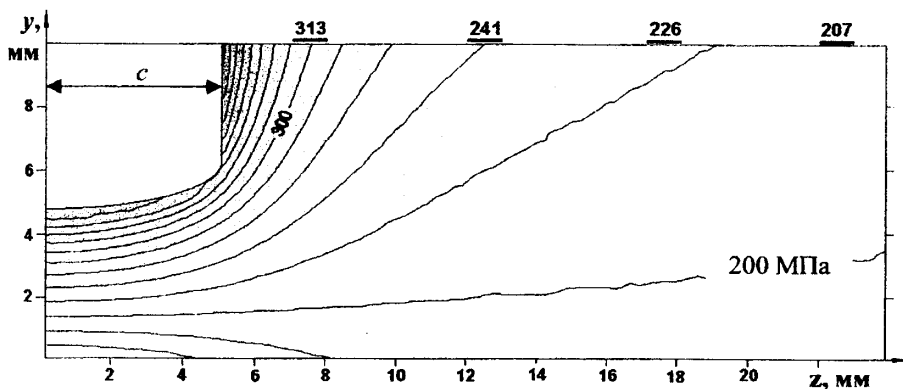


Рис. 5. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекту при $c = 5$ мм, y та z – координати по товщині та осі труби

У рамках моделі для труби під внутрішнім тиском отримано формулу для визначення, зумовлених концентратором, максимальних напружень в коловому напрямку

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma_1} \sigma_1 + \alpha_{\sigma_2} \sigma_2, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2, \quad (7)$$

$$\alpha_{\sigma_1} = 1 + 2 \left(\frac{b}{2h} \right)^{\left(\frac{c}{c+0,5h} \right)}, \quad \alpha_{\sigma_2} = 0,6 \frac{b}{h} \left(1 - \frac{b}{2h} \right). \quad (8)$$

Використавши нормативну методика оцінки технічного стану металу труби діючого газопроводу з тривалим терміном експлуатації та залишкового ресурсу його безпечної роботи, оцінено коефіцієнт запасу міцності газопроводу з дефектами типу виразок-каверн з урахуванням їх розташування в різних зонах біля зварного шва.

ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливу науково-практичну задачу з підвищення надійності експлуатації нафтогазопроводів в околі стикових зварних з'єднань та корозійних пошкоджень.

1. Розроблено математичну модель для визначення залишкових технологічних напружень біля стикових зварних з'єднань магістральних нафтогазопроводів. Для зварених встик труб без розробки торців у замкнутій формі отримано вирази для визначення колових $\sigma_{\theta\theta}$ і поздовжніх σ_{zz} напружень в трубопроводі, що викликані пластичними деформаціями e_{ii}^0 . В ці вирази входять невідомі числові параметри, для відшукування яких побудовано функціонал g , що виражає суму квадратів різниці відхилень усереднених характеристик напружень, визначених експериментально σ^E і теоретично σ^T . При цьому визначені експериментально значення σ^E враховують нерівномірність розподілу напружень під давачами, вплив структурних перетворень в ЗТВ на відлікові показники приладу, а також можливу часткову їх релаксацію, зумовлену різною обробкою після виконання зварних швів і в процесі експлуатації МТ.

2. На основі експериментальних досліджень, проведених на трубах зі сталі 17Г1С МГ “Івацевичі-Долина III нитка” на ділянці Волинського ЛВУМГ та за допомогою розробленої математичної моделі, визначено залишкові технологічні напруження в околі зварного кільцевого шва. Показано, що:

- колові залишкові напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях газопроводу в зоні завширшки двох товщин від осі шва є розтягальні і досягають найбільшого значення на внутрішній поверхні труби на осі шва; з віддаленням від осі шва в межах десяти товщин стінки труби вони переходять у стискальні і менші за розтягальні;

- осьові залишкові напруження є менші, ніж колові; вони, стискальні на зовнішній поверхні та розтягальні на внутрішній в межах шести товщин стінки труби, а з віддаленням від осі шва змінюють знаки;

- зміна усередненої різниці головних напружень σ_+^E від структурних перетворень в межах 30% зумовлює відносну зміну максимальних напружень не більше ніж на 4%.

3. Запропоновано спосіб визначення концентрації напружень в околі поверхневих дефектів типу виразки-каверни, під силовим навантаженням, і дією залишкових технологічних напружень біля кільцевого зварного шва. Проаналізовано зміну напружень у трубопроводі за різних розташувань дефекту відносно осі зварного шва. Установлено, що коли дефект розміщений:

- на зварному шві в зоні розтягальних колових та стискальних осьових залишкових напружень, найбільшими є колові напруження в поздовжньому перерізі

трубопроводу по діаметру дефекта; максимальне значення вони досягають у центрі або на краю дефекту і, залежно від його глибини, можуть перевищувати в 1,3-2,1 рази номінальні колові залишкові напруження на зовнішній поверхні трубопроводу;

– поза зварним швом стискальні колові і осьові залишкові напруження спричинюють сумарні напруження менші, ніж від навантаження МТ тиском.

4. Для оцінки максимальних напружень, зумовлених дефектом, отримана узагальнена формула, в яку входять коефіцієнти концентрації напружень і номінальні значення напружень.

5. На розробленій дослідній установці експериментально перевірено запропоновану математичну модель, яка виявилася задовільною (відносна похибка менша 10%) для інженерних розрахунків концентрації напружень у трубах з дефектами. Розроблено пристрій для контролю параметрів зовнішніх корозійних дефектів нафтогазопроводів.

6. Урахування дії залишкових технологічних напружень змінює коефіцієнт запасу міцності трубопроводу. Так, для ділянки (220 км) МГ "Івацевичі-Долина III нитка" (1220x12 мм) з дефектом $c/(2h)=0,4$ та $b/(2h)=0,4$ коефіцієнт запасу міцності в зоні розтягальних залишкових напружень, порівняно з зоною без технологічних напружень, зменшується не більше, ніж на 40%, а в зоні стискальних може збільшуватись в межах 10-18%, якщо за розрахункове напруження прийнято умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$ і 4-10%, коли за розрахункове напруження прийнято границю міцності σ_n .

Основний зміст дисертації опубліковано в таких працях

1. Банахевич Ю.В. Визначення концентрації напружень в околі корозійних дефектів труб при дії внутрішнього тиску // "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів". – Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2002. – № 456. – С. 3 – 8.

2. Осадчук В.А., Банахевич Ю.В. Концентрація напружень у трубопроводі з поверхневою заглибиною у формі півеліпсоїда обертання // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 37 – 42.

3. Банахевич Ю.В., Кичма А.О., Дзюбик А.Р. Напруження в околі дефектів матеріалу оболонкових конструкцій // Зб. наук. праць. – Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Вип. 5. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 311 – 315.

4. Банахевич Ю.В., Юськів В.М., Дзюбик А.Р. Дослідження напруженого стану в зварних з'єднаннях труб із врахуванням структурних змін // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2003. – №1 (5). – С. 118 – 121.

5. Банахевич Ю.В., Осадчук В.А., Дзюбик А.Р. Визначення залишкових напружень в околі кільцевого зварного з'єднання труб з урахуванням структурних змін в зоні термічного впливу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. –

2003. – № 1. (6). – С. 77 – 81.

6. Деркач М.П., Банахевич Ю.В., Іткін О.Ф. Досвід виконання робіт з капітального ремонту магістральних газопроводів без зупинення транспорту газу // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №4. – С.51 – 53.

7. Банахевич Ю.В., Кичма А.О., Дзюбик А.Р. Визначення напружено-деформованого стану однопрогінних безкомпенсаторних балкових переходів трубопроводів // Зб. наук. праць. – Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Вип. 4. – Львів: Каменяр, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – Львів 2002. – С. 7 – 11.

8. Деклараційний патент № 55043А. Україна, МПК⁷ G01R19/00, G01R33/02, G01V3/10. Багатоканальна електромагнітна пошуково-вимірювальна система / Ю.В. Банахевич, П.П. Драбич, О.П. Драбич, А.О. Кичма та ін. – № 2002065033; Заявл. 18.06.02; Опубл. 17.03.03. Бюл. № 3. – 5 с.

9. Деклараційний патент № 56727А. Україна, МПК⁷ G01B11/30. Пристрій для контролю дефектів поверхні / А.Р. Дзюбик, А.О. Кичма, Ю.В. Банахевич. – № 2002086950; Заявл. 23.08.02; Опубл. 15.05.03. – Бюл. № 5. – 4 с.

10. Перун Й.В., Шлапак Л.С., Розгонюк В.В., Банахевич Ю.В. Досвід дослідження напружено-деформованого стану газопроводів акустичними та магнітними методами // Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики та неруйнівного контролю нафтогазового, хімічного та енергетичного обладнання. Сучасний підхід до підготовки фахівців з НК і ТД. Матеріали науково-технічної конференції. Івано-Франківськ. – 1996. – С. 33 – 37.

11. Банахевич Ю.В. Проблеми діагностування газопроводів при їх експлуатації в складних умовах // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. – Львів: ВКП фірми "ВМС", 1998. – С. 42 – 45.

12. Коваль Р.І., Банахевич Ю.В., Зубик Й.Л., Кичма А.О. Проблеми паспортизації та комплексного обстеження технічного стану лінійної частини магістральних газопроводів // Матеріали 6-ї науково-практ. конф. "Нафта і газ України – 2000". Івано-Франківськ, 2000. – Т.3 – С. 87 – 89.

13. Кичма А.О., Коваль Р.І., Банахевич Ю.В., Винник О.Й. Оцінка корозійного стану газопроводу за результатами внутрішньотрубної діагностики // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. випуск №3. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2002. – Т. 2. – С. 802 – 806.

14. Banachewych Yu., Koval R., Kychma A. Nondestructive stress monitoring of gas pipelines. // Badania nieniszczące. Zeszyty problemowe, 2002 №7. – Materiaiy 31 Krajowej Konferencji Badan Nieniszczących. – Szczyrk (Polska), 22–24.10.2002. – Warszawa. – 2002. – S. 253 – 257.

АНОТАЦІЯ

Банахевич Ю.В. **Діагностування напруженого стану магістральних нафтогазопроводів в околі стикових зварних з'єднань та корозійних пошкоджень розрахунково-експериментальним методом.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003.

Дисертацію присвячено розвитку розрахунково-експериментального методу визначення залишкових технологічних напружень у магістральних трубопроводах з метою врахування нерівномірності їх розподілу під давачами приладів для вимірювання усереднених характеристик напружень фізичними методами та структурно-фазових змін в зоні термічного впливу і оцінці напруженого стану в околі зварних з'єднань кільцевим швом за наявності корозійних дефектів. Розроблено математичну модель і програмне забезпечення для діагностування напруженого стану в зварених кільцевим швом без попередньої обробки країв труб. Вона ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонок з власними деформаціями і використанні експериментальної інформації, здобутої фізичними методами. З використанням методу скінченних елементів в рамках просторової задачі теорії пружності для труби з дефектом у вигляді пів-еліпсоїда обертання розроблено методiku розрахунку концентрації напружень біля дефектів типу виразок-каверн і оцінено вплив залишкових напружень на величину коефіцієнта запасу міцності трубопроводу з корозійними пошкодженнями.

Ключові слова: *магістральний трубопровід, кільцевий зварний шов, розрахунково-експериментальний метод, залишкові технологічні напруження, корозійні дефекти.*

АННОТАЦИЯ

Банахевич Ю.В. **Диагностирование напряженного состояния магистральных нефтегазопроводов в области стыковых сварных соединений и коррозионных повреждений расчетно-экспериментальным методом.** - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2003.

Диссертация посвящена развитию расчетно-экспериментального метода определения остаточных технологических напряжений в магистральных трубопроводах с целью учета неравномерности их распределения под датчиками приборов для измерения усредненных характеристик напряжений физическими методами, а также структурно-фазовых изменений в зоне термического влияния и оценке напряженного состояния в области сварных соединений кольцевым швом при наличии коррозионных дефектов.

Разработана математическая модель и программное обеспечение для диагностирования напряженного состояния в сваренных кольцевым швом без предварительной разработки торцов труб, которая базируется на решении обратных задач теории оболочек с собственными деформациями и использовании экспериментальной информации, полученной физическими методами. Получены интегральные представления компонент, тензора кольцевых и продольных напряжений в трубопроводе через локальные поля пластических деформаций, в которые входят неизвестные параметры. Для определения этих параметров построен функционал, который выражает сумму квадратов отклонений среднеинтегральных характеристик разности кольцевых и осевых напряжений, которые могут быть определены экспериментальным путем с использованием электромагнитного или ультразвукового методов от аналогичных характеристик, полученных расчетным методом.

Сформулирована обратная задача определения неизвестных параметров поля пластических деформаций путем минимизации функционала. Приведены формулы, позволяющие после определения параметров поля пластических деформаций рассчитать напряжения в произвольной точке магистрального трубопровода. При определении отклонений экспериментальных характеристик напряжений, полученных физическими методами от расчетных, учитывается неоднородность их распределения под датчиками, а также возможная частичная релаксация, обусловленная различными видами обработки после выполнения сварных швов. С использованием данного метода определяются остаточные напряжения, которые удовлетворяют уравнения равновесия, совместности деформаций и граничные условия, а точность их определения обуславливается объемом и точностью экспериментальных данных. Для труб, изготовленных из стали 17Г1С, обоснован выбор множеств тензорных функций, которые описывают поле пластических деформаций около кольцевого сварного шва, выполненного без предварительного разделения торцов трубы. Разработано программное обеспечение для определения кольцевых и осевых напряжений около кольцевых швов трубы с использованием экспериментальной информации, полученной электромагнитным методом.

С использованием метода конечных элементов в рамках пространственной задачи теории упругости для трубы с дефектом в виде полуэллипсоида вращения разработана методика для определения концентрации напряжений возле дефектов магистральных нефтегазопроводов типа язв-каверн, которые находятся под действием силовых нагрузок и остаточных технологических напряжений около кольцевых сварных швов. Предложен численный метод решения циклично-симметричных пространственных задач теории упругости на основании полуаналитической схемы метода конечных элементов и осуществлено его программную реализацию для расчета напряженного состояния в области

коррозионных дефектов трубопроводов. Выполнен анализ концентрации напряжений в трубопроводе в случаях, когда центр дефекта находится на оси сварного шва, а также в зоне около шва.

Разработан и изготовлен испытательный стенд, который обеспечивает условия для определения напряженного состояния трубопроводов, их сварных стыков и зон вблизи коррозионных дефектов с помощью экспериментальных методов. Достоверность предложенных в работе математических моделей обоснована строгостью постановки обратной задачи теории оболочек с собственными напряжениями, использованием обоснованных методов ее решения и удовлетворительным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Для оценки максимальных напряжений, обусловленных наличием дефектов, записана обобщающая формула в виде линейной функции от кольцевого и осевого напряжений в трубопроводе. Для определения коэффициентов концентрации напряжений получены инженерные формулы, относительная погрешность которых находится в пределах 8–10%.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, кольцевой сварной шов, расчетно-экспериментальный метод, остаточные технологические напряжения, коррозионные дефекты.

SUMMARY

Banakhevych Yu. V. – Calculation-experimental method for diagnostics of stress of gas and oil pipelines joints in welded pipes and corrosion damages – Manuscript

This is to gain the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences according to the specialty 05.15.13 – Oil and Gas Pipelines, Reservoirs and Storages – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2003.

The dissertation develops a calculation-experimental method of residual technological stress determination in pipelines. This method takes into account uneven of stress distribution under device gauges and measures structural-phase changes in thermal influence zones; it also estimates stress state in the vicinity of circumferential weld with corrosion defects. It also presents the mathematical model and developed software for stress conditions diagnostics of weld-rings without preliminary treatment of pipe edges. This model is based on calculations of inverse problems of the shell theory with own deformations and uses experiment information, received from physical methods. By using finite element method in the terms of three-dimensional elasticity theory for a pipe with a half-ellipsoid defect, a method is developed that calculates stress concentration factors in the defected area such as corrosion pit-cavity. The influence of residual stress on the safety margin of the pipeline with corrosion damages is also evaluated.

Keywords: pipeline, corrosion defects, calculation-experimental method, residual stress, circumferential welds.