

622.692.4  
Д 72

**Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу**

**ДРАГІЄВ Андрій Володимирович**



УДК 622.692.4

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ОЦІНКА  
ЇХ ВПЛИВУ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТРУБОПРОВІДІВ В  
ЗОНІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2006

П/ІНВ



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Більшість магістральних трубопроводів (МТ) експлуатують вже тривалий час, постійно зростає їх відсоток із відпрацьованим нормативним терміном. У зв'язку з цим з кожним роком загострюється проблема діагностування МТ з рекомендаціями щодо можливостей подальшого їх використання. Різноманітні обстеження МТ показали, що термін їх безпечної експлуатації у значній мірі залежить від корозійної стійкості металу та надійності зварних з'єднань. Особливо це стосується багатошарових монтажних швів, які після зварювання часто не піддаються додатковій технологічній обробці з метою зменшення залишкових напружень. Вони можуть істотно впливати на міцність і довговічність трубопроводів тривалої експлуатації з дефектами, особливо при циклічному навантаженні. У зв'язку з цим актуальним є дослідження, присвячене розвитку методу визначення технологічних залишкових напружень в монтажних кільцевих зварних з'єднаннях і оцінки їх впливу на довговічність МТ з дефектами типу тріщин при циклічному навантаженні. Це і зумовило вибір теми дисертації, визначило предмет, мету, завдання та структуру досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження виконувалось 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 рр." та Державної науково-технічної програми "Ресурс", затверджені постановою Кабінету міністрів України від 8 жовтня 2004 р. № 1331, а також науково-дослідних робіт "Розрахунково-експериментальне діагностування стану магістральних газопроводів біля монтажних кільцевих зварних швів", номер державної реєстрації 0105U007297 та "Діагностування напруженого стану зварних з'єднань і оцінка їх залишкового ресурсу на ділянках компенсаторів магістральних трубопроводів", номер державної реєстрації 0105U007311.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета роботи* – визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб розрахунково-експериментальним методом з урахуванням двовимірного розподілу пластичних деформацій біля шва та структурних перетворень в зоні термічного впливу і оцінка їх впливу на довговічність МТ з дефектами при циклічному навантаженні.

Відповідно до мети сформульовано такі задачі:

- розробити математичну модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб з урахуванням неоднорідного розподілу і неоднакових зон колових та осьових пластичних деформацій вздовж осі труби і за її товщиною;

- дослідити вплив ширини зон пластичних деформацій та їх градієнтів за товщиною і довжиною труб на довговічність МТ з дефектами при циклічному навантаженні, величину і характер розподілу залишкових напружень у т



- на основі інформації, отриманої електромагнітним методом, визначити залишкові напруження в зоні монтажного кільцевого зварного шва магістрального трубопроводу;

- побудувати розрахункову модель для визначення впливу залишкових напружень на поширення втомних тріщин в стінках трубопроводів до їх критичних розмірів;

- оцінити вплив зварювальних напружень на довговічність магістрального газопроводу з осьовим тріщиноподібним дефектом у зварному з'єднанні при циклічному навантаженні.

*Об'єкт дослідження.* Зварні кільцеві з'єднання магістральних трубопроводів з гострокінцевими дефектами.

*Предмет дослідження.* Залишкові технологічні напруження в зоні стикових зварних з'єднань багатошаровим кільцевим швом та їх вплив на довговічність трубопроводів тривалої експлуатації.

*Методи досліджень.* Дослідження ґрунтуються на застосуванні: методу розв'язування обернених задач теорії оболонок із власними напруженнями з використанням експериментальної інформації, здобутої за допомогою фізичних методів; теорії узагальнених функцій для побудови розв'язків ключових рівнянь; математичної моделі закриття втомної тріщини і ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень; загальновідомих методів експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень залишкових напружень у зварних з'єднаннях труб стиковим багатошаровим кільцевим швом і оцінки їх впливу на довговічність магістральних трубопроводів з дефектами отримано нові наукові результати, які виносяться на захист:

- побудовано математичну модель для визначення залишкових технологічних напружень біля багатошарових кільцевих зварних швів труб і розвинуто метод оцінки напруженого стану зварних з'єднань, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонок з використанням експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами;

- отримано розв'язки ключових рівнянь для заданої множини полів залишкових несумісних деформацій, проведено числовий аналіз прямої задачі і досліджено вплив різних ширин зон залишкових деформацій та їх градієнтів вздовж твірної і за товщиною труби на напружений стан у зварному з'єднанні;

- опрацьовано методіку перерахунку показів приладу "MESTR – 411", за допомогою якого реалізовано електромагнітний метод, в напруження з урахуванням неоднорідності їх розподілу під перетворювачем трансформаторного типу та структурно-фазових змін у зоні термічного впливу (ЗТВ) і визначено напружений стан в зоні зварного з'єднання магістрального газопроводу тривалої експлуатації;

– в рамках математичної моделі закриття тріщини і конценції ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень отримано розрахункову модель для врахування впливу залишкових напружень на втомне руйнування при циклічному навантаженні;

– оцінено вплив залишкових технологічних напружень на ріст втомних тріщин в зоні зварного з'єднання трубопроводу з осьовим поверхневим тріщиноподібним дефектом під дією експлуатаційного циклічного навантаження.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами виконаних досліджень запропоновано спосіб діагностування напруженого стану в зварних кільцевих з'єднаннях і оцінки його впливу на довговічність магістральних трубопроводів з тріщиноподібними дефектами, зокрема розроблено:

– удосконалену методику перерахунку показів базового приладу “MESTR-411” в залишкові напруження в зоні багатошарових кільцевих зварних швів;

– пакет програм для обчислення залишкових технологічних напружень в зварному шві та біляшовній зоні;

– методику оцінки впливу залишкових напружень в зонах зварних кільцевих з'єднань магістральних трубопроводів з поверхневими тріщинами під дією циклічного навантаження на їх довговічність.

Результати досліджень практично застосовано для оцінки незреласованих залишкових напружень в зоні монтажних кільцевих швів магістрального газопроводу “Більче-Волиця-Долина” на надземному переході через р. Стрий та МГ “Івацевичі-Долина II нитка” (км 241,66) на ділянках УМГ “Львівтрансгаз” (передбачуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 280,794 тис.грн.).

**Особистий внесок здобувача.** Автором дисертації виконані наступні наукові дослідження і розробки:

1. Проведено дослідження й аналіз результатів діагностики і моніторингу трубопроводів довготривалої експлуатації [9, 10, 11].

2. Розроблено математичну модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб з урахуванням нерівномірного розподілу і неоднакових зон коллових і осьових пластичних деформацій вздовж осі труби та за її товщиною [1, 3, 13].

3. Досліджено вплив ширини зон залишкових деформацій і їх градієнтів за товщиною та довжиною труби біля зварного шва на величину і характер розподілу технологічних напружень у трубопроводах [2, 4, 5, 12, 14].

4. Запропонована розрахункова модель для визначення впливу залишкових напружень на швидкість росту втомних тріщин в зоні зварних з'єднань трубопроводів та оцінено вплив зварювальних напружень на довговічність магістрального газопроводу з осьовим тріщиноподібним дефектом у зварному з'єднанні при циклічному навантаженні [ 6 ].

5. Розроблено і запатентовано спосіб визначення напруженого стану біля зварних з'єднань трубопроводів і спосіб проведення моніторингу нафтогазопроводу [7, 8].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на :

4-й науково-технічній конференції і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового обладнання" (Івано-Франківськ, 2005), XI-й (Туніс, 2001); XII-й (Туреччина, 2002); XIII-й (Мальта, 2003); XIV-й (Єгипет, 2004) і XV-й (Сочі, 2005) Міжнародних ділових зустрічах «Діагностика»; VII-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2005); VIII-й Міжнародній науково-практичній конференції "Нафта і газ України - 2004" (Судак, 2004); 3-й Міжнародній конференції "Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій" (Львів, 2004); науково-практичному семінарі "Підвищення надійності зварних з'єднань при монтажі і ремонті технологічного обладнання в енергетиці" (Київ, 2004), III-ому міжнародному конгресі з технічної діагностики "Діагностика-2004" (Познань 2004), VIII-й Міжнародній технічній конференції "Визначення ризиків в експлуатації трубопроводів" (Плоцьк, 2005).

У повному обсязі результати досліджень доповідались на: розширеному засіданні кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій НУ "Львівська політехніка"; науковому семінарі відділу міцності зварних конструкцій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України; 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 України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'ятьох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 194 найменувань, і 2 додатків. Основний зміст роботи викладений на 133 сторінках і містить 54 рисунки та 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі проаналізовано рівень працездатності зварних з'єднань магістральних трубопроводів і методи їх розрахунку на міцність і довговічність.

Дослідженнями напружено-деформованого стану і розрахунками трубопроводів на міцність при статичних і повторно-змінних навантаженнях займалися багато відомих у цій галузі учених та спеціалістів: Айбіндер А.Б., Андрейків О.Є., Бабін Л.А., Березін В.О., Білобран Б.С., Бородавкін П.П., Карпаш О.М., Крижанівський Є.І., Красовський А.Я., Лобанов Л.М., Махутов Н.А.,

Ориняк І.В., Панасюк В.В., Перун Й.В., Петрина Ю.Д., Трощенко В.Т., Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Herikawa K., Lubkiewicz J., Rubicki E. та інші. Значний внесок у розробку теоретичних та експериментальних досліджень умов роботи трубопроводів в тому числі і їх зварних з'єднань у різний час зробили: Вінокуров В.А., Грудз В.Я., Капцов І.І., Кир'ян В.І., Ковалко М.П., Куркін С.А., Лобанов Л.М., Махненко В.І., Недосека А.Я., Ніколаєв Г.А., Осадчук В.А., Патон Є.О., Патон Б.Є., Підстригач Я.С., Розгонюк В.В., Середюк М.Д., Талипов Г.В., Труфяков В.І., Фомічов С.К. та інші вчені.

Щоб оцінити працездатність трубопроводів і їх граничний стан потрібний комплексний підхід, важливою складовою якого є напруження у трубах, особливо в зонах зварних з'єднань. Тут зварювальні напруження є знаковмінні, нерівномірно розподілені за товщиною труби, що може істотно вплинути на рівень і характер розподілу сумарних робочих напружень. Існують різні розрахункові та неруйнівні експериментальні методи визначення залишкових напружень. Щоб застосувати перші, потрібно володіти інформацією про режими зварювання і способи зменшення рівня технологічних напружень у зварному з'єднанні, що утрудняє, а то й не дає змоги використати ці методи для діагностування напружень у трубопроводах тривалої експлуатації. Неруйнівні методи не завжди придатні для діагностування зварних з'єднань через не повну інформацію про розподіл напружень в тілі труби. У рішенні комісії ОАО "Газпром" відзначено, наприклад, що на даний час жоден засіб неруйнівного визначення напружень (було застосовано 10 різних приладів) в реальних умовах експлуатації газопроводів безпосередньо не забезпечує вірогідних даних про їх напружено-деформований стан.

Виходячи із сучасного стану проблеми, сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи, результати вирішення яких викладено у наступних розділах.

**Другий розділ** присвячено аналізу та розвитку розрахунково-експериментального методу визначення залишкових напружень в зоні багат шарових кільцевих швів так, щоб можна врахувати двовимірний розподіл несумісних залишкових деформацій, що зумовлені зварюванням, а також неоднорідність напруженого стану під давачами вимірювальних приладів та вплив структурних перетворень на їх відлікові покази. Запропонований спосіб ґрунтується на експериментальній інформації, отриманій неруйнівними методами, і розв'язанні обернених задач теорії оболонок з власними напруженнями. Для побудови ключових рівнянь, що описують напружено-деформований стан зварного з'єднання, труба моделюється круговою циліндричною оболонкою завтовшки  $2h$  під дією локалізованих осесиметричних залишкових зварювальних деформацій.

Оболонку віднесено до триортогональної системи координат  $\alpha, \beta, \gamma$ , де  $\alpha = z/R$  - безрозмірна координата вздовж осі труби;  $z$  - відстань вздовж твірної від початку координат, вибраного в площині осі шва;  $R$  - радіус серединної поверхні

труби;  $\beta$  - кутова координата,  $\gamma$  - координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні труби,  $U, V, W$  – переміщення вздовж координатних осей (рис.1).

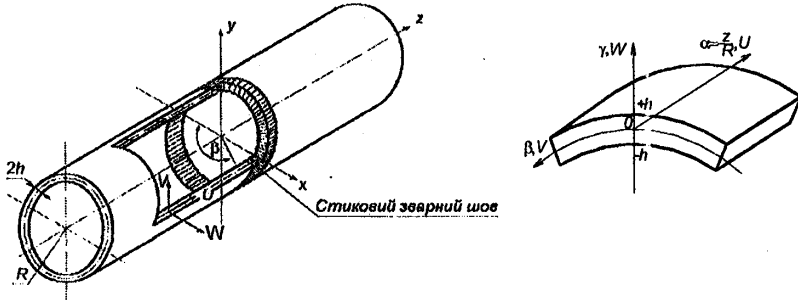


Рис.1. Схема стикового зварного з'єднання трубопроводу у вигляді замкнутої колової циліндричної оболонки

На основі узагальнення розрахункових і експериментальних літературних даних, за умов симетрії відносно перерізу  $\alpha=0$ , поле локалізованих біля багат шарового шва колових  $e_{\beta\beta}^0$  і осьових  $e_{\alpha\alpha}^0$  несумісних залишкових зварювальних деформацій апроксимовано виразами

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -\mathcal{E}_1^* f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha), \quad (1)$$

$$e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) = -\mathcal{E}_2^* f_2(\gamma) \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha), \quad (2)$$

де  $S_1^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq \alpha_1, \quad S_1^0(\alpha) = 0, |\alpha| > \alpha_1;$

$$S_2^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq \alpha_2, \quad S_2^0(\alpha) = 0, |\alpha| > \alpha_2;$$

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

$$f_i(\gamma) = 1 - m_i \left( 1 - \frac{\gamma}{h} \right)^2, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$



$\alpha_1 = z_1/R$ ,  $\alpha_2 = z_2/R$  ( $z_1, z_2$  - координати зон колових і осьових залишкових деформацій);  $\varepsilon_i^*$ ,  $s_i$ ,  $m_i$  - числові параметри. Функції  $\varphi_i$  описують розподіл залишкових деформацій вздовж осі труби (рис. 2), а  $f_i(\gamma)$  - за її товщиною (рис. 3).

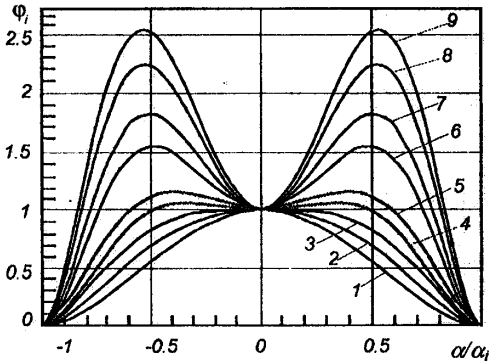


Рис. 2. Графіки функції  $\varphi_i$  для різних значень параметра  $s$  ( $s = -2; -1; 0; 1; 2; 5; 7; 10; 12$ , відповідно криві 1-9)

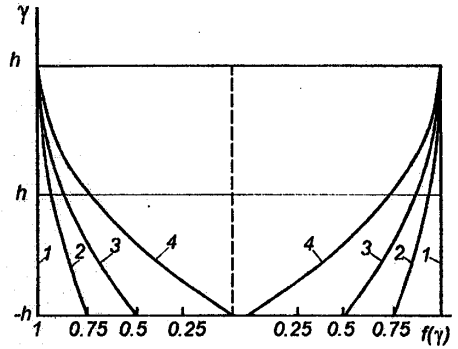


Рис. 3. Зміна функції  $f(\gamma)$  за товщиною труби для різних значень параметра  $m$  ( $m = 0; 1/16; 1/8; 1/4$ , відповідно криві 1-4)

Ключове рівняння для визначення функції прогину серединної поверхні труби  $W(\alpha)$ , коли зони колових  $e_{\beta\beta}^0$  і осьових  $e_{\alpha\alpha}^0$  залишкових деформацій неоднакові, має вигляд

$$\left( \frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda^4 \right) W = -2R\mathfrak{E}_1^* \left[ 2\lambda^4 \left( 1 - \frac{4}{3}m_1 \right) - \mu m_1 \frac{R}{h} \frac{d^2}{d\alpha^2} \right] \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + 2\mathfrak{E}_2^* m_2 \frac{R^2}{h} \frac{d^2}{d\alpha^2} \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha), \quad (5)$$

де  $\lambda^4 = 3R^2(1-\mu^2)/(4h^2)$ ;  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

На основі розв'язку рівняння (5) і відомих в літературі формул отримано вирази для прогину  $W$ , осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  та колових  $\sigma_{\beta\beta}$  залишкових напружень у довільній точці зварного з'єднання труби

$$W(\alpha) = -\epsilon_1^* R \lambda \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{11}(\alpha) + \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} [\mu m_1 F_{21}(\alpha) + k m_2 F_{22}(\alpha)] \right\}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = \frac{E \epsilon_1^* \lambda \gamma}{1-\mu^2} h \left[ -\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \left( 1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{21}(\alpha) + \mu m_1 F_{11}(\alpha) + k m_2 F_{12}(\alpha) \right] + \frac{1}{1-\mu^2} \left( \frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) [\mu m_1 \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + k m_2 \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha)]; \quad (7)$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = \frac{E}{R} W(\alpha) + \mu \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) - E \epsilon_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma), \quad (8)$$

де

$$F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\zeta) \exp[-\lambda|\zeta - \alpha|] [\cos \lambda(\zeta - \alpha) + (-1)^{j-1} \sin \lambda|\zeta - \alpha|] d\zeta, \quad (9)$$

$$i, j = 1, 2; \quad k = \epsilon_2^* / \epsilon_1^*.$$

В ці вирази входять невідомі числові параметри  $\epsilon_1^*$ ,  $k$ ,  $\alpha_i$ ,  $m_i$ ,  $s_i$ , що характеризують деформації  $\epsilon_{jj}^0$  ( $j = \alpha, \beta$ ). Для їх визначення у роботі використано експериментальну інформацію про залишкові напруження в трубопроводі, отриману електромагнітним методом.

У третьому розділі на основі отриманого розв'язку прямої задачі виконано числовий аналіз і оцінено вплив ширини зони несумісних залишкових деформацій та їх градієнтів вздовж твірної і за товщиною труби на напружений стан у зварному з'єднанні. Встановлено, що зростання перепаду колових деформацій  $\epsilon_{\beta\beta}^0$  за товщиною труби зумовлює незначне збільшення колових напружень на її зовнішній поверхні та призводить до істотного зменшення розтягальних колових і осьових напружень на внутрішній та стискальних на зовнішній поверхнях труби. Збільшення градієнта осьових деформацій  $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$  в напрямку товщини труби неістотно впливає на зміну величини і розподілу вздовж твірної розтягальних колових напружень на поверхнях труби, осьових максимальних напружень на зовнішніх поверхнях і зумовлює зменшення осьових розтягальних напружень на внутрішній поверхні труби.

Зі збільшенням колових деформацій  $\epsilon_{\beta\beta}^0$  та їх градієнтів вздовж твірної труби максимальні розтягальні колові напруження і осьові на її внутрішній поверхні зростають майже пропорційно до приростів максимальних деформацій. Таким же чином збільшуються стискальні залишкові напруження на зовнішній поверхні.

Зростання осьових деформацій  $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$  та їх градієнтів вздовж твірної труби майже не впливає на колові залишкові напруження на зовнішній поверхні труби та незначно впливає на колові розтягальні на внутрішній та осьові напруження на зовнішній поверхнях труби, і зумовлює зменшення розтягальних осьових напружень на внутрішній поверхні труби. Для однакової ширини зон колових  $\epsilon_{\beta\beta}^0$  і осьових  $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$  залишкових деформацій зі збільшенням їх значень розтягальні колові залишкові напруження на поверхнях труби та стискальні на її зовнішній поверхні спадають, а осьові на внутрішній поверхні зростають. Зменшення ширини зони осьових деформацій  $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ , при фіксованій ширині зони колових деформацій  $\epsilon_{\beta\beta}^0$ , неістотно впливає на величину і розподіл колових залишкових напружень на поверхнях труби і може зумовити значне зростання осьових напружень на внутрішній поверхні труби біля зварного шва.

Четвертий розділ присвячено діагностуванню напруженого стану в зоні кільцевого багатозарового зварного шва МГ «Більче-Волиця-Долина» при переході через р. Стрий ( $\varnothing 1420 \times 22,5$  мм; матеріал труби – сталь Х70). Для отримання експериментальних даних використано електромагнітний метод і вимірювальний прилад «MESTR-411» з чотириполюсним накладним електромагнітним перетворювачем трансформаторного типу. За вимірами цим методом визначають усереднену у приповерхневому шарі різницю головних напружень в зоні контакту давача з трубою. Для опрацювання експериментальних даних використано затверджену комітетом з стандартизації ТК-78 методику вимірювань механічних напружень електромагнітним методом. При цьому додатково враховувався вплив неоднорідності напружень по площі контакту давача з трубою та вплив структурних змін на магнітну проникність металу в зоні термічного впливу.

Якщо зону контакту між електромагнітним перетворювачем і трубою наближено апроксимувати кругом радіусом  $R_0$ , то на основі формул (6) - (8), для обчислення усередненої по цій зоні різниці головних напружень отримано вираз

$$\sigma_+^T(\alpha_n; \epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = E \epsilon_1^* J_+^T(\alpha_n; k, \alpha_i, m_i, s_i), \quad (10)$$

де

$$J_+^T = \frac{2}{\pi r_0^2} \int_{\alpha - \alpha_n}^{\alpha_n - r_0} [\hat{\sigma}_{\beta\beta}^+(\alpha, h) - \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^+(\alpha, h)] \sqrt{r_0^2 - (\alpha - \alpha_n)^2} d\alpha,$$

$\hat{\sigma}_{jj}^+(\alpha, h) = \sigma_{jj}(\alpha, h) / (E \epsilon_1^*)$ ,  $j = \alpha, \beta$ ;  $r_0 = R_0 / R$ ;  $\alpha_n$  - координати центрів круга вздовж труби під час вимірювань.

Для визначення параметрів  $\epsilon_1^*$ ,  $k$ ,  $\alpha_i$ ,  $m_i$ ,  $s_i$  побудовано функціонал

$$g(\epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) = \sum_{n=1}^{n_1} p_n [\sigma_+^T(\epsilon_1^*, k, \alpha_i, m_i, s_i; \alpha_n) - \sigma_+^L(\alpha_n)]^2, \quad (11)$$

де  $\alpha = \alpha_n$  перерізи труби, в яких розташовувався центр давача приладу;  $p_n$  – вагові множники;  $n_1$  – кількість колових перерізів, у яких виконувались вимірювання.

Після підстановки отриманих експериментальних даних  $\sigma_+^*(\alpha_n)$  у вираз (11) мінімізацією функціоналу знайдено невідомі параметри ( $\beta_1^* = 4 \cdot 10^{-4}$ ;  $k = 1,5$ ;  $\alpha_1 = 0,032$ ;  $\alpha_2 = 0,017$ ;  $m_1 = 0,08$ ;  $m_2 = 0,15$ ;  $s_1 = 4$ ;  $s_2 = 5$ ) та обчислено колові й осьові напруження на поверхнях труби в зоні зварного шва (рис. 4). Результати опрацювання експериментальних даних зображені на рис. 4 зірочками, величина  $\sigma_+^*$  графічно зображена на цьому ж рисунку кривою 1.

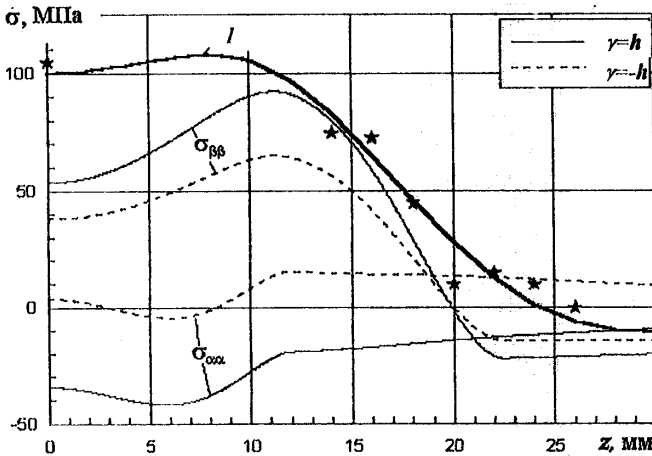


Рис. 4. Залежність залишкових напружень на поверхні труби від відстані до осі зварного шва газопроводу

В п'ятому розділі в рамках математичної моделі закриття тріщини і концепції ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень отримано розрахункову модель для врахування впливу залишкових напружень на втомне руйнування при циклічному навантаженні. Розглянуто трубу з зовнішнім поздовжнім поверхневим дефектом, який моделюється півеліптичною тріщиною з півосями  $a$  і  $b$  (рис.5). Труба знаходиться під дією пульсуючого внутрішнього тиску  $p$  та залишкових зварювальних напружень.

Положення довільної точки на контурі тріщини задано через кут  $0 \leq \theta \leq \pi$  у параметричному вигляді (рис. 5)

$$x = a \cos \theta, \quad y = b \sin \theta. \quad (12)$$

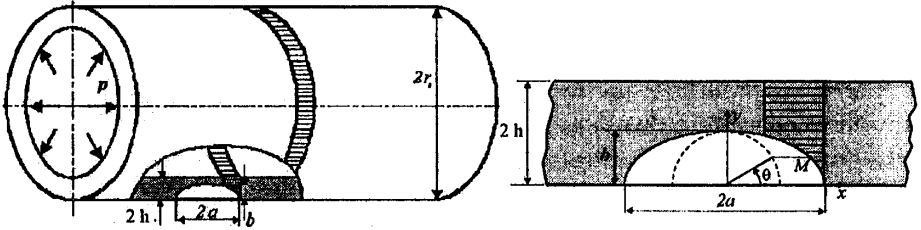


Рис. 5. Труба з тріщиною на зовнішній поверхні

Для визначення колових напружень в трубі, зумовлених внутрішнім тиском  $p$ , використано відому формулу Ляме

$$\sigma_{\beta\beta}^{(p)} = p \frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \left[ 1 + \left( \frac{r_1}{r} \right)^2 \right], \quad (13)$$

де  $r_1, r_2$  – зовнішній та внутрішній радіуси труби,  $r_2 \leq r \leq r_1$ .

Апроксимувавши розподіл колових експлуатаційних  $\sigma_{\beta\beta}^{(p)}$  та залишкових  $\sigma_{\beta\beta}^{(res)}$  напружень за товщиною стінки труби лінійними залежностями, і використавши відомий розв'язок Ньюмена-Раю, отримано вирази для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) в довільній точці контуру тріщини

$$K^{(p)} = \left( \sigma_1^{(p)} + H(b/a, b/2h, \theta) \sigma_2^{(p)} \right) \sqrt{\pi b} F(b/a, b/2h, \theta); \quad (14)$$

$$K^{(res)} = \left( \sigma_1^{(res)} + H(b/a, b/2h, \theta) \sigma_2^{(res)} \right) \sqrt{\pi b} F(b/a, b/2h, \theta).$$

Тут

$$\sigma_{1,2}^{(p)} = \frac{1}{2} \left( \sigma_{\beta\beta}^{+(p)} \pm \sigma_{\beta\beta}^{-(p)} \right), \quad \sigma_{1,2}^{(res)} = \frac{1}{2} \left( \sigma_{\beta\beta}^{+(res)} \pm \sigma_{\beta\beta}^{-(res)} \right), \quad (15)$$

індексами “+” і “-” позначено колові напруження на зовнішній і внутрішній поверхнях труби;  $H$  і  $F$  відомі з літературних джерел безрозмірні функції.

Закон росту тріщин записано в “ефективних” координатах

$$v = C_0 (\Delta K_{ef})^{n_0}. \quad (16)$$

Тут  $\Delta K_{ef}$  – ефективне значення розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, перехід до якого від номінального значення КІН  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  здійснюється на основі співвідношення

$$\Delta K_{ef} = U(R) \Delta K, \quad (17)$$

де  $C_0$ ,  $n_0$  – інваріантні характеристики матеріалу, які визначаються з кінетичної діаграми втомного руйнування трубної сталі зі зварним швом,  $R = K_{min} / K_{max}$  – коефіцієнт асиметрії. Величина  $U(R)$  обчислюється за відомими в літературі формулами.

Складова КІН від залишкових напружень вважається квазістатичною, тобто вона не змінюється протягом циклу навантаження і не впливає на розмах КІН в циклі, але впливає на значення коефіцієнта асиметрії

$$R = \frac{K^{(res)}}{K^{(p)} + K^{(res)}}. \quad (18)$$

Використавши вираз для швидкості росту тріщин у вигляді (16) і записавши його для крайніх точок контуру півеліптичної тріщини, отримано систему нелінійних диференціальних рівнянь зміни півосей тріщини під час її росту:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = C_0 \left( \left( \sigma_1^{(p)} + II \left( \frac{b}{a}, \frac{b}{2h}, 0 \right) \sigma_2^{(p)} \right) \sqrt{\pi b} F \left( \frac{b}{a}, \frac{b}{2h}, 0 \right) (0.608 + 0.734R - 0.340R^2) \right)^{n_0} \\ \frac{db}{dN} = C_0 \left( \left( \sigma_1^{(p)} + II \left( \frac{b}{a}, \frac{b}{2h}, \frac{\pi}{2} \right) \sigma_2^{(p)} \right) \sqrt{\pi b} F \left( \frac{b}{a}, \frac{b}{2h}, \frac{\pi}{2} \right) (0.743 + 0.637R - 0.388R^2) \right)^{n_0} \end{cases} \quad (19)$$

Нелінійні диференціальні рівняння (19) разом з початковими умовами  $a|_{N=0} = a_0$ ,  $b|_{N=0} = b_0$  становлять розрахункову модель оцінки впливу залишкових напружень на ріст втомних тріщин у стінках трубопроводів до їх критичних розмірів.

Визначено характеристики циклічної тріщиностійкості  $C_0$ ,  $n_0$  зварного з'єднання на основі кінетичної діаграми втомного руйнування компактного зразка зі зварним швом з крайовою тріщиною. Використавши розв'язок системи рівнянь (19), який отримано чисельно із застосуванням пакету математичного забезпечення «Mathcad 2000», досліджено вплив зварювальних напружень на довговічність магістрального газопроводу з зовнішнім тріщиноподібним дефектом.

Для трубопроводу  $\varnothing 1420 \times 22,5$  мм з півеліптичною тріщиною біля зварного шва під дією пульсуючого внутрішнього тиску і залишкових напружень виконано числовий аналіз задачі. Результати розрахунків росту втомних півеліптичних тріщин з початковими півосями  $b_0 / (2h) = 0,2$ ;  $b_0 / a_0 = 0,25$  та  $b_0 / a_0 = 0,5$  графічно зображено на рис. 6.

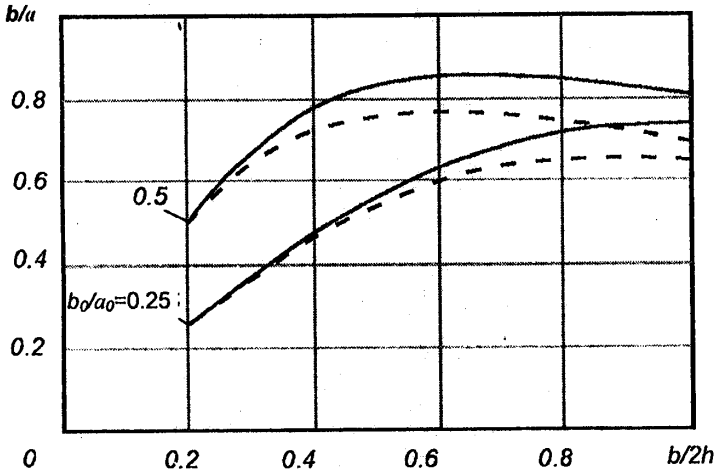


Рис. 6. Зміна конфігурації тріщини в процесі її росту: суцільна лінія – від дії внутрішнього тиску; штрихова – від сумарної дії тиску і залишкових напружень

Як видно з графіків залишкові напруження впливають на конфігурацію тріщини під час її втомного підростання і спричинюють більше поздовжнє видовження дефекту ( $b/a$  зменшується, штрихові криві), ніж зумовлене дією тільки пульсуючого внутрішнього тиску (суцільні криві). Внаслідок цього збільшується довжина тріщини, яка утворюється після розгерметизації труби і зростає загроза її лавинного руйнування на стадії поширення наскрізної тріщини.

## ВИСНОВКИ

На основі виконаних комплексних теоретичних та експериментальних досліджень і розроблених нових розрахунково-експериментальних підходів вирішено важливу науково-технічну задачу з підвищення вірогідної оцінки довговічності магістральних трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні кільцевих зварних з'єднань під дією циклічного навантаження і залишкових напружень.

1. Розроблено математичну модель для визначення залишкових напружень в зонах трубних стикових зварних з'єднань, виконаних багат шаровими кільцевими швами. В рамках теорії оболонки отримано вирази для обчислення колових  $\sigma_{\beta\beta}$  і поздовжніх  $\sigma_{\alpha\alpha}$  напружень в трубопроводі, зумовлених локалізованими двовимірними полями колових  $e_{\beta\beta}^0$  і осьових  $e_{\alpha\alpha}^0$  несумісних залишкових деформацій. Для визначення цих деформацій побудовано функціонал, що виражає

нев'язку між усередненими експериментальними характеристиками напруженого стану  $\sigma_+^E$ , які можна отримати неруйнівними методами, і аналогічними характеристиками  $\sigma_+^T$ , обчисленими теоретично.

2. Для заданої множини функцій, які апроксимують розподіл залишкових деформацій  $e_{\beta\beta}^0$  і  $e_{\alpha\alpha}^0$  здійснено числовий аналіз прямої задачі і оцінено вплив ширини їх зон та градієнтів вздовж твірної і за товщиною труби на напружений стан в зоні зварного з'єднання.

3. На основі експериментальних досліджень, проведених на трубах зі сталі Х70 МІ "Більче-Волиця-Долина"  $\varnothing 1420 \times 22,5$  мм електромагнітним методом за допомогою приладу "MESTR-411", та розв'язку оберненої задачі в рамках розробленої математичної моделі визначено залишкові напруження в зоні кільцевого зварного шва. При цьому враховано неоднорідність розподілу напружень в зоні контакту електромагнітного перетворювача трансформаторного типу з поверхнею труби та вплив структурних змін в ЗТВ на відлікові покази приладу. Встановлено, що колові залишкові напруження розтягальні біля зварного шва, а з віддаленням від осі шва вони переходять у стискальні. Осьові напруження при віддаленні від осі шва розтягальні на внутрішній і стискальні на зовнішній поверхнях.

4. В рамках математичної моделі закриття тріщини і концепції ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, використавши закон росту тріщини в ефективних координатах, отримано систему нелінійних диференціальних рівнянь зміни півосей поздовжньої півеліптичної тріщини в трубі в процесі її росту. Ці рівняння, разом з початковими умовами для вихідних розмірів тріщини становлять розрахункову модель оцінки впливу залишкових напружень на ріст втомних тріщин в стінках трубопроводів до їх критичних розмірів.

5. На основі кінетичної діаграми втомного руйнування прямокутного компактного зразка зі зварним швом визначено характеристики циклічної тріщиностійкості зварного з'єднання. Встановлено, що зварювальні залишкові напруження можуть значно вплинути на довговічність трубопроводу. Так, для трубопроводу  $\varnothing 1420 \times 22,5$  мм з півеліптичною тріщиною з розмірами півосей  $18,0 \times 4,5$  мм біля зварного шва під дією пульсуючого внутрішнього тиску розглянутий рівень залишкових напружень істотно підвищує швидкість росту тріщини і зменшує у 2,5 рази період до розгерметизації труби. Залишкові напруження впливають на конфігурацію тріщин в процесі їх втомного підростання і зумовлюють більше видовження дефектів вздовж труби, ніж під дією тільки внутрішнього тиску.

#### Список опублікованих автором праць за темою дисертації:

1. Осадчук В.А., Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Пороховський В.В. Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі



- кільцевих зварних швів розрахунково-експериментальним методом // *Машинознавство*. – 2003. – №11. – С. 23-27.
2. Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Осадчук В.А., Кичма А.О. Діагностика напружень у трубах шлейфів і трубопровідних об'язок з корозійними дефектами навколо зварного шва // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – Івано-Франківськ, 2004. – № 2(8). – С. 102-107.
  3. Драгілев А.В., Осадчук В.А. Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в магістральних трубопроводах біля монтажних швів // *Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ"*. – Івано-Франківськ, 2005. – № 1(14). – С. 25-29.
  4. Драгілев А.В. Оцінка впливу перепаду пластичних деформацій по товщині труби на розподіл залишкових напружень в зоні монтажного зварного шва магістрального трубопроводу // *Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ"*. Івано-Франківськ, 2005. – № 2(15). – С. 50-53.
  5. Драгілев А.В. Дослідження напруженого стану в зоні кільцевих зварних швів трубопроводів електромагнітним методом // *Методи та прилади контролю якості*. – 2005. – №15. – С. 113-115.
  6. Дарчук О.І. Драгілев А.В. Моделювання впливу залишкових напружень на швидкість росту втомних тріщин у зварних з'єднаннях // *Машинознавство*. – 2005. – № 3(93). – С. 7-12.
  7. Деклараційний патент України № 7910. Спосіб визначення напруженого стану біля зварних з'єднань трубопроводів / А.В. Драгілев, Ю.В. Банахевич, В.А. Осадчук, А.О. Кичма. – Опубл. в Бюл. №7 від 15.07.2005. – 2 с.
  8. Патент України № 73429. Спосіб проведення моніторингу нафтогазопроводу / Ю.В. Банахевич, А.М. Бубняк, І.М. Бубняк, О.В. Гвоздевич, А.В. Драгілев, А.О. Кичма. – Опубл. в Бюл №7 від 15.07.2005. – 3 с.
  9. Палцан И.Г., Банахевич Ю.В., Драгилев А.В., Шлапак Л.С. Проблемы надежности газопроводов в сложных условиях // *XI-я Международная деловая встреча «Диагностика - 2001»*. – Москва: ИРЦ Газпром, 2001. – С. 186-190.
  10. Иткин А.Ф., Коваль Р.И., Банахевич Ю.В., Драгилев А.В. Анализ результатов диагностики трубопроводов и их влияние на виды и объемы ремонтных работ // *Материалы XII Международной деловой встречи "Диагностика – 2002"*. – Том 3. – Часть 1. – Турция, 2002. – С. 28-31.
  11. Савула С.Ф., Банахевич Ю.В., Драгилев А.В., Кычма А.А. Опыт применения электромагнитного маркирования при проведении внутритрубной диагностики газопроводов в УМГ «Львовтрансгаз» // *Материалы XIII Международной*

- деловой встречи "Диагностика - 2003". – Том 3. – Часть 1. Мальта, 2003. – С. 70-74.
12. Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Осадчук В.А., Кычма А.А. Определение остаточных напряжений в трубопроводах около монтажных сварных швов // Материалы XIV Международной деловой встречи "Диагностика-2004". – Том 2. – Часть 1. – Арабская республика Египет, 2004. – С.83-86.
13. Осадчук В.А., Драгілев А.В., Банахевич Ю.В., Пороховський В.В. Діагностування напруженого стану магістральних газопроводів в околі стикових зварних з'єднань розрахунково-експериментальним методом // 3-я Міжнародна конференція "Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій" Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – Львів, 2004. – С. 439-444.
14. Dragilyev A., Savula S., Banachewych J., Osadchuk V., Kychma A. Diagnostics of residual technological stress in circumferential welds in pipelines // 3<sup>rd</sup> International congress of technical diagnostics "Diagnostics-2004", september 6-9, 2004, Poznan. – Poland. – P. 155-158.

## АНОТАЦІЯ

**Драгілев А.В. Визначення залишкових напружень і оцінка їх впливу на довговічність трубопроводів в зоні кільцевих зварних з'єднань. – 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, 2006.

Дисертацію присвячено розвитку розрахунково-експериментального методу визначення залишкових напружень в зонах багатошарових кільцевих швів трубопроводів і оцінці їх впливу на довговічність зварних з'єднань за наявності гострокінцевих дефектів при дії повторно-змінних навантажень. В рамках теорії оболонки побудовано математичну модель для визначення компонентів напруженого стану з урахуванням двовимірного розподілу залишкових несумісних деформацій локалізованих біля шва, та структурно-фазових змін в зоні термічного впливу. Вона ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонки з власними напруженнями і використанні експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами. Використавши математичну модель закриття тріщини і концепцію ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень, отримано розрахункову модель для врахування впливу залишкових напружень на втомне руйнування при циклічному навантаженні. Оцінено вплив залишкових напружень на довговічність трубопроводу з осьовим поверхневим дефектом в зоні зварного з'єднання під дією експлуатаційного навантаження.

**Ключові слова:** *трубопровід, кільцеве зварне з'єднання, розрахунково-експериментальний метод, залишкові напруження, довговічність.*

## АННОТАЦИЯ

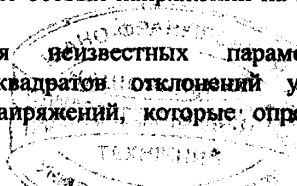
**Драгилев А.В. Определение остаточных напряжений и оценка их влияния на долговечность трубопроводов в зоне кольцевых сварных соединений. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2006.

Диссертация посвящена развитию расчетно-экспериментального метода определения остаточных напряжений в зонах многослойных кольцевых швов трубопроводов и оценке их влияния на долговечность сварных соединений при наличии остроконечных дефектов под действием переменных нагрузок. В рамках теории оболочек разработана математическая модель для определения компонентов тензора технологических остаточных напряжений с учетом двумерного распределения несовместных остаточных деформаций, локализованных возле шва и структурно-фазовых изменений в зоне термического влияния. Модель базируется на решении обратных задач теории оболочек с остаточными деформациями и использовании экспериментальной информации об усредненных характеристиках напряженного состояния, которую можно получить физическими методами. Получены выражения для окружных и осевых напряжений в трубопроводе с учетом локальных остаточных деформаций в зоне сварного шва, распределение которых аппроксимировано тензорными полиномиальными функциями с определенным количеством произвольных параметров.

На основании решения прямой задачи проанализировано влияние ширины зоны сварочных деформаций и их градиентов вдоль и по толщине трубы на напряженное состояние в зоне сварного соединения. Установлено, что увеличение перепада окружных деформаций по толщине трубы обуславливает незначительное увеличение окружных напряжений на ее внешней поверхности и приводит к существенному уменьшению растягивающих окружных и осевых напряжений на внутренней и сжимающих на внешней поверхностях трубы. С увеличением окружных остаточных деформаций и их градиентов вдоль трубы максимальные растягивающие окружные напряжения и осевые напряжения – на ее внутренней поверхности возрастают почти пропорционально приращениям максимальных деформаций. Уменьшение ширины зоны осевых деформаций, при фиксированной ширине зоны окружных, несущественно влияет на величину и распределение окружных остаточных напряжений на поверхностях трубы и может обусловить значительное возростание осевых напряжений на внутренней поверхности трубы в зоне сварного шва.

Для определения неизвестных параметров построен функционал, выражающий сумму квадратов отклонений усредненных величин разности окружных и осевых напряжений, которые определяют электромагнитным или



ультразвуковым методами, от аналогичных величин, полученных расчетным способом. Электромагнитным методом, с использованием измерительного прибора "MESTR-411" с четырехполосным электромагнитным преобразователем трансформаторного типа, определены значения усредненной разности главных напряжений на поверхности трубы в зоне кольцевого сварного шва магистрального газопровода ( $\varnothing$  1420 x 22,5 мм, материал X70). Приведены соотношения для аналогичных усредненных характеристик, полученных расчетным способом и построен соответствующий функционал, с помощью которого найдены неизвестные параметры, а затем рассчитаны кольцевые и осевые остаточные напряжения на внешней и внутренней поверхностях трубы в зоне сварного шва.

С использованием математической модели закрытия трещины и концепции эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений разработана расчетная модель для учета влияния остаточных напряжений на скорость распространения осевой поверхностной трещины в трубе в зоне сварного соединения при циклическом нагружении. Определены характеристики циклической трещиностойкости сварного соединения. Оценено влияние остаточных напряжений на долговечность трубопровода с осевой полуэллиптической трещиной в зоне сварного шва под воздействием пульсирующего внутреннего давления.

**Ключевые слова:** *трубопровод, кольцевое сварное соединение, расчетно-экспериментальный метод, остаточные напряжения, долговечность.*

## SUMMARY

**Dragilyev A.V. – Determination of residual stresses and estimation of their influence on the longevity of circumferential of pipelines in zone welding joints. – Manuscript.**

This is to gain the scientific degree of the Candidate of technical Sciences according to the speciality 05.15.13 – Oil and Gas Pipelines, Reservoirs and Storages – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2006.

The dissertation develops calculation-experimental method of determining residual stresses in zone of multi-layer circumferential welding beads of pipelines and estimation of their influences on the durability of welding joints with cracks under cyclic loads. Within the shell theory, a mathematic model for determining components of stress state with taking into account the two-dimensional plastic deformation distribution localized near the welding bead and structural-phases changes in the thermal influence zone is created. The model is based on solving inverse problems of shell theory with own stresses on using experimental information obtained by non-destructive method. Having used crack closure mathematical model and the concept of effective amplitude of stress intensity factor, a calculational model for taking into account the influence of residual stresses on fatigue fracture under cyclic load is obtained. The influence of residual stresses on welding joint durability of a pipeline with an axial surface defect under workload is estimated.

**Key words:** *pipeline, circumferential welding joints, calculation-experimental method, residual stresses, longevity.*