

622.692.4
1-23

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

ІВАНЧУК Олександр Олексійович



УДК 622.692.4 (043)

1-23

**ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ І ОЦІНКА
ЗАПАСУ МІЦНОСТІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ СТИКІВ
РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБ
МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОГАЗОПРОВІДІВ**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2008

Дисертацією є рукопис.

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



Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Осадчук Василь Антонович,
Національний університет "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України, м. Львів, завідувач
кафедри "Зварювальне виробництво, діагностика та
відновлення металоконструкцій".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Білобран Богдан Степанович,
Національний університет "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України, м. Львів, професор
кафедри опору матеріалів;

кандидат технічних наук
Радченко Сергій Анатолійович,
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України
м. Київ, старший науковий співробітник.

Захист
вченої
універс
76019,

ні спеціалізованої
ному технічному

З дисе
Франкі
(76019,

ібліотеці Івано-
газу за адресою

Автореє

Вчений
спеціал
кандид

нута О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Різноманітні обстеження магістральних трубопроводів (МТ) показали, що термін їх безпечної експлуатації у значній мірі залежить від корозійної стійкості металу та надійності зварних з'єднань. Особливо це стосується багат шарових 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 зоні монтажних кільцевих зварних з'єднань та оцінки їх впливу на міцність таких з'єднань за наявності в них дефектів типу тріщин.

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" та Державної науково-технічної програми "Ресурс", затвердженої 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 за держбюджетною науковою темою Національного університету "Львівська політехніка" ДБ/ОКТЕ "Розроблення методів та засобів визначення напруженого стану різновисинних зварних з'єднань оболонкових конструкцій тривалої експлуатації" (2008 – 2009 рр).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях різновисинних труб МТ розрахунково-експериментальним методом з урахуванням двовимірного розподілу технологічних пластичних деформацій біля шва і оцінка їх впливу на статичну міцність магістральних трубопроводів з тріщиноподібними дефектами в зоні зварного шва.

Вказана мета досягається шляхом реалізації таких задач:

- для відтворення рівня і розподілу залишкових напружень в зонах кільцевих зварних з'єднань різновисинних труб МТ з використанням експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами, розробити розрахункову модель напруженого стану таких з'єднань;
- дослідити вплив ширини зон термопластичних деформацій та їх зміни за товщиною і довжиною різновисинних труб біля зварного шва на рівень і розподіл залишкових напружень у трубопроводі;
- створити устаткування для експериментального визначення і аналізу характеристик напруженого стану в зоні кільцевих зварних з'єднань

НТБ
ІФНТУНГ



an1403

різновтовщинних труб МТ неруйнівними методами;

- на основі розрахункових співвідношень і експериментальних даних, отриманих електромагнітним методом та методом спекл-інтерферометрії обчислити залишкові напруження в зоні кільцевого зварного шва різновтовщинних труб МТ;

- оцінити вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок магістральних трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різновтовщинних труб.

Об'єкт дослідження. Зварні кільцеві з'єднання різновтовщинних труб магістральних трубопроводів.

Предмет дослідження. Залишкові технологічні напруження в зоні стикових зварних з'єднань різновтовщинних труб та їх вплив на статичну міцність трубопроводів з дефектами біля кільцевих швів.

Методи досліджень. Дослідження ґрунтуються на застосуванні: методу розв'язування обернених задач теорії різновтовщинних оболонок із технологічними залишковими напруженнями з використанням експериментальних даних, отриманих за допомогою неруйнівних методів; теорії узагальнених функцій для побудови розв'язків ключових рівнянь; двопараметричних критеріальних співвідношень для оцінки впливу залишкових напружень на коефіцієнти запасу міцності трубопроводу з дефектами типу тріщин.

Положення, що захищаються: методи визначення залишкових напружень і оцінки їх впливу на статичну міцність ділянки магістрального трубопроводу з гострокінцевими дефектами в зоні кільцевого зварного з'єднання різновтовщинних труб.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

- вперше для визначення залишкових технологічних напружень біля багатшарових кільцевих зварних швів різновтовщинних труб побудовано розрахункову модель і розвинуто метод оцінки їх рівня та розподілу, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії різновтовщинних оболонок з використанням експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами;

- вперше побудовано розв'язки ключових рівнянь для множини характеристик залишкових термопластичних несумісних деформацій і досліджено вплив ширини їх зон та градієнтів за товщиною і довжиною труб на напружений стан у різновтовщинному зварному з'єднанні;

- розвинуто спосіб відтворювання рівня залишкових технологічних напружень і їх розподілу в зоні кільцевих зварних швів з використанням експериментальної інформації, отриманої електромагнітним методом та методом голографічної спекл-інтерферометрії для різновтовщинних труб;

- на базі двокритеріального підходу, основу якого складає діаграма оцінки

руйнування, оцінено вплив залишкових напружень на коефіцієнти запасу міцності ділянки МТ з дефектами типу тріщин в зоні стикового зварного з'єднання різнотовщинних труб.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано спосіб відтворення рівня і розподілу залишкових напружень і оцінки їх впливу на коефіцієнти запасу міцності, який може бути використаний при розрахунку кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб, що працюють в умовах статичного навантаження;

- створено комплекс вимірювального і метрологічного устаткування для діагностування напруженого стану зварних з'єднань трубопроводів тривалої експлуатації, який дозволяє уточнити методику перерахунку показів приладів неруйнівного контролю в зоні зварних з'єднань різнотовщинних труб в напруження з урахуванням неоднорідності їх розподілу на базі вимірювань давачів;

- розроблено пакет програм для обчислення залишкових технологічних напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб.

Результати досліджень практично застосовано для оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність в зонах зварних з'єднань різнотовщинних труб з дефектами типу тріщин на ділянці магістрального газопроводу "КЗУ – II нитка" (км 360,8 – км 379,7) (передбачуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 471,865 тис. грн.).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих роботах, автором особисто:

- проведено аналіз проблем експериментального дослідження напружено-деформованого стану трубопроводів [9, 11];

- розроблено математичну модель розрахунково-експериментального діагностування напруженого стану різнотовщинних кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів [1, 3];

- проведено аналіз напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів [2, 4, 7, 10];

- досліджено вплив локалізації зварювальних деформацій в зоні кільцевого з'єднання різнотовщинних труб на розподіл технологічних залишкових напружень [6];

- оцінено вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб [5, 8].

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

Всеукраїнській науковій конференції "Сучасні проблеми механіки" (Львів, 2004); 4-й науково-технічній конференції і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового

обладнання” (Івано-Франківськ, 2005), VII-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2005); V-ій Науково-практичній конференції з НК ”Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості” (Єгипет, 2007); 37-й Міжнародній конференції ”Дефектоскопія 2007” (Прага, 2007); Міжнародній науково-технічній конференції ”Ресурсозберігаючі технології в нафтовій енергетиці” (Івано-Франківськ, 2007); II-й Міжнародній науковій конференції ”Сучасні проблеми механіки та математики” (Львів, 2008).

У повному обсязі результати досліджень доповідались на: розширеному засіданні кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій НУ ”Львівська політехніка”; розширеному науковому семінарі факультету нафтогазопроводів ІФНТУНГ.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, в тому числі 5 у фахових наукових виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яťох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 173 найменувань, і двох додатків. Основний зміст роботи викладений на 145 сторінках і містить 55 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито її сутність і стан, 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 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., Радченко С.А., Трошенко В.Т., Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Lubkiewicz J., Rybicki 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., Мелехов Р.К., Недосека А.Я., Ніколаєв Г.А., Осадчук В.А., Патон Є.О., Патон Б.Є., Підстригач Я.С., Похмурський В.І., Розгонюк В.В., Середюк М.Д., Талипов Г.В., Труфяков В.І., Фомічов С.К., Shi Y.W. та інші вітчизняні і зарубіжні вчені.

Для визначення напруженого стану зварних з'єднань трубопроводів використовують розрахункові та експериментальні методи. Що стосується трубопроводів тривалої експлуатації, то при застосуванні перших треба знати режими зварювання і способи, які використовувались для зменшення рівня напружень після зварювання, що утруднює, а то й не дає змоги використати ці методи для визначення напружень у трубопроводах тривалої експлуатації. Неруйнівні (фізичні) методи не завжди придатні для контролю напруженого стану зварних з'єднань через неповну інформацію про розподіл напружень в елементі труби. У рішенні комісії ОАО "Газпром" відзначено, що тепер ні один засіб неруйнівного визначення напружень (випробувано біля 10 різних приладів) у реальних умовах експлуатації трубопроводів безпосередньо не забезпечує вірогідних даних про напружений стан. У зв'язку з цим, найбільш реальним для діагностування напруженого стану зварних з'єднань трубопроводів тривалої експлуатації є поєднання математичного моделювання з експериментальною інформацією, отриманою в окремих точках поверхні неруйнівними методами.

На основі аналізу сучасного стану проблеми сформульовано мету і задачі дослідження дисертаційної роботи, результати вирішення яких викладено у наступних розділах.

У другому розділі для оцінки напруженого стану в зоні кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб розвинуто розрахунково-експериментальний метод, який ґрунтується на експериментальних даних, отриманих неруйнівними, а також напівруйнівними методами, і розв'язках обернених задач теорії оболонок з власними напруженнями. Розроблено розрахункову модель визначення залишкових напружень в зоні кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб, зварених без спеціальної розробки товстішої стінки.

Для побудови ключових рівнянь, що описують напружений стан кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб, прийнято модель різновтовщинної циліндричної оболонки, складеної із частин постійної товщини. Так, зварне з'єднання зображене на рис. 1, моделлюється оболонкою із двох частин завтовшки $2h_1$ і $2h_2$ (зліва і справа від осі шва, рис. 1б).

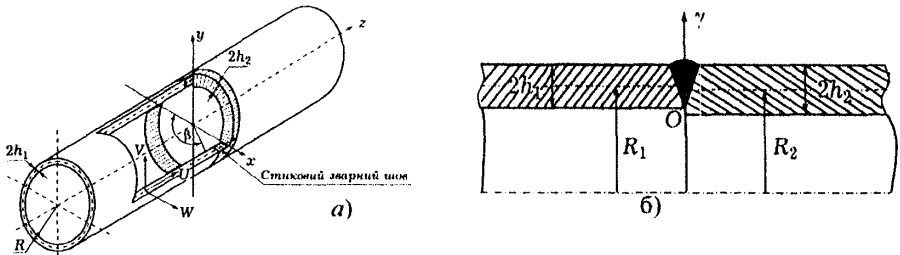


Рис. 1. Схема стикового зварного з'єднання різновтовщинних труб у вигляді замкнених колових циліндричних оболонок (а), осьовий переріз зварного з'єднання (б)

Складові частини такої оболонки віднесено до триортогональних систем координат α, β, γ_i , де $\alpha = z/R_1$, z - координата вздовж осі оболонки (початок координат вибрано в площині шва), β - кутова координата, γ_i - координата вздовж зовнішніх нормалей до серединних поверхонь i -их складових, радіуси яких позначимо через R_1, R_2 (рис. 1). Локалізовані біля шва колові $e_{\beta\beta}^0$ і осьові $e_{\alpha\alpha}^0$ несумісні залишкові деформації подано у вигляді

$$e_{ll}^0(\alpha, \gamma) = \begin{cases} e_{ll}^{01}(\alpha, \gamma), & \alpha \leq 0, \\ e_{ll}^{02}(\alpha, \gamma), & \alpha \geq 0, \end{cases} \quad l = \alpha, \beta. \quad (1)$$

При цьому на основі узагальнення розрахункових і експериментальних даних з літературних джерел про розподіл термопластичних залишкових деформацій біля зварного шва множину функцій e_{ll}^0 апроксимовано виразами

$$\begin{aligned} e_{\beta\beta}^{0i}(\alpha, \gamma_i) &= -E_{1i}^* f_{1i}(\gamma_i) \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha), \\ e_{\alpha\alpha}^{0i}(\alpha, \gamma_i) &= -E_{2i}^* f_{2i}(\gamma_i) \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha). \end{aligned} \quad (2)$$

Тут

$$f_{ij}(\gamma) = 1 - m_{ij} \left(1 - \frac{\gamma}{h_i}\right)^2,$$

$$\varphi_{ij} = 1 + s_{ij} \frac{\alpha^2}{\alpha_{ij}^2} - (3 + 2s_{ij}) \frac{\alpha^4}{\alpha_{ij}^4} + (2 + s_{ij}) \frac{\alpha^6}{\alpha_{ij}^6}, \quad i, j = 1, 2, \quad (3)$$

$S_{ij}^0(\alpha)$ - одиничні східчасті функції: $S_{ij}^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq |\alpha_{ij}|$; $S_{ij}^0(\alpha) = 0, |\alpha| > |\alpha_{ij}|$ ($j = 1, \alpha \leq 0$; $j = 2, \alpha \geq 0$); E_{ij}^*, m_{ij}, s_{ij} - числові параметри; $\alpha_{ij} = z_{ij}/R_1$; z_{ij} - координати меж зон колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ деформацій. З умови неперервності цих деформацій в перерізі $\alpha = 0$ встановлено наступні зв'язки між параметрами E_{ij}^*, m_{ij} :

$$E_{11}^* = E_{12}^* = E_1^*, \quad E_{21}^* = E_{22}^* = E_2^*, \quad m_{12} = \gamma_2^2 m_1, \quad m_{22} = \gamma_2^2 m_2, \quad (4)$$

де позначено $m_{11} = m_1, m_{21} = m_2, \gamma_2 = h_2/h_1$.

Графіки функцій

$$\varphi_i(\alpha) = \varphi_{i1}(\alpha) S_{i1}^0(\alpha) + \varphi_{i2}(\alpha) S_{i2}^0(\alpha), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

для деяких значень параметрів s_{ij}, z_{ij} зображені на рис. 2, 3.

Прогин оболонки $W(\alpha)$ позначено через $W_1(\alpha)$ для $\alpha \leq 0$ і $W_2(\alpha)$ для $\alpha \geq 0$, а безрозмірні функції

$$\bar{W}_i(\alpha) = \frac{1}{E_1^* R_1} W_i(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Використавши вихідні співвідношення класичної теорії оболонок з власними напруженнями і вирази (1) - (6), ключові рівняння для визначення функцій прогину $\bar{W}_i(\alpha)$ подано у вигляді

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4 \right) \bar{W}_i = -2 \frac{R_i}{R_1} \left[2\lambda_i^4 \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) - \mu y_i^2 m_1 \frac{R_1 \rho_i}{h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} \right] \times \\ \times \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + 2k y_i^2 m_2 \frac{R_1}{h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} \left[\varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha) \right], \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

де $\lambda_i^4 = 3R_1^2(1-\mu^2)\rho_i^2/(4h_i^2)$; $\rho_i = \frac{R_i}{R_1}$; $k = \frac{E_2^*}{E_1^*}$; $y_1 = 1$; μ - коефіцієнт Пуассона.

Застосувавши операцію згортки фундаментальних розв'язків рівнянь (7) з їх правими частинами і розв'язки однорідних рівнянь, після відповідних перетворень загальні розв'язки $\bar{W}_i(\alpha)$ зображено так:

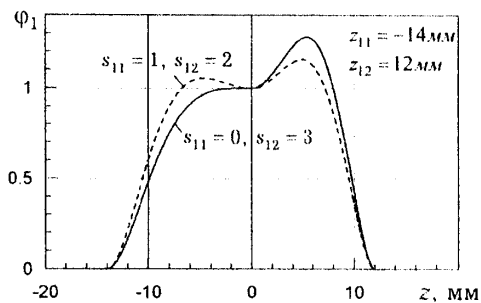


Рис. 2. Графіки функції $\varphi_1(\alpha)$

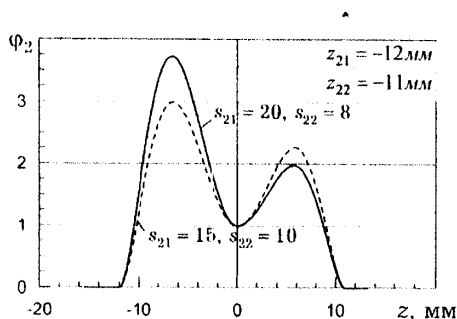


Рис. 3. Графіки функції $\varphi_2(\alpha)$

$$\bar{W}_i(\alpha) = A_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + A_{2i} \omega_{2i}(\alpha) + \bar{W}_{0i}(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

Тут

$$\omega_{11}(\alpha) = e^{\lambda_1 \alpha} \cos \lambda_1 \alpha, \quad \omega_{21}(\alpha) = e^{\lambda_1 \alpha} \sin \lambda_1 \alpha, \\ \omega_{12}(\alpha) = e^{-\lambda_2 \alpha} \cos \lambda_2 \alpha, \quad \omega_{22}(\alpha) = e^{-\lambda_2 \alpha} \sin \lambda_2 \alpha, \quad (9)$$

$$\bar{W}_{0i}(\alpha) = -\lambda_i \frac{R_i}{R_1} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{11}^{(i)}(\alpha) + \frac{y_i^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left[\mu m_1 F_{21}^{(i)}(\alpha) + k m_2 F_{22}^{(i)}(\alpha) \right] \right],$$

$$F_{ij}^{(1)}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\xi) K_j^{(1)}(\xi - \alpha) d\xi, \quad F_{ij}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\xi) K_j^{(2)}(\xi - \alpha) d\xi,$$

$$K_j^{(i)}(\xi - \alpha) = e^{-\lambda_i |\xi - \alpha|} \left[\cos \lambda_i (\xi - \alpha) + (-1)^{i-1} \sin \lambda_i |\xi - \alpha| \right]. \quad (10)$$

Сталі інтегрування A_{ij} ($i, j = 1, 2$), що входять у формули (8), знайдено із умов ідеального механічного контакту, тобто рівності переміщень кутів повороту, моментів і поперечних сил в перерізі $\alpha = 0$.

На основі співвідношень (8) – (10) і відомих в літературі формул отримано вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових (кільцевих) $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в трубах в зоні зварного з'єднання

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = EE_1^* \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i), \quad \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = EE_1^* \hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i), \quad i = 1, 2.$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = & -\sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \frac{R_1 \gamma_i}{R_i h_i} \Omega_i(\alpha) + \frac{\lambda_i}{1-\mu^2} \frac{\gamma_i}{h_i} \left[\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \times \right. \\ & \times \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{21}^{(i)}(\alpha) + y_i^2 \mu m_1 F_{11}^{(i)}(\alpha) + y_i^2 k m_2 F_{12}^{(i)}(\alpha) \left. \right] + \\ & + \frac{y_i^2}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma_i^2}{h_i^2} \right) \left[\mu m_1 \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + k m_2 \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha) \right], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = \frac{R_1}{R_i} \bar{W}_i(\alpha) + \mu \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) + \left[1 - y_i^2 m_1 \left(1 - \frac{\gamma_i}{h_i} \right)^2 \right] \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha), \quad (12)$$

де

$\Omega_1(\alpha) = -A_{11}\omega_{21}(\alpha) + A_{21}\omega_{11}(\alpha)$, $\Omega_2(\alpha) = A_{12}\omega_{22}(\alpha) - A_{22}\omega_{12}(\alpha)$, E - модуль Юнга.

У ці вирази входять довільні числові параметри $E_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}$ ($i, j = 1, 2$). Щоб їх знайти для конкретних з'єднань, використано експериментальну інформацію про залишкові напруження у трубопроводах, отриману за допомогою неруйнівних методів і побудовано функціонал нев'язки між експериментально визначеними і теоретично обчисленими характеристиками напруженого стану.

Третій розділ присвячений визначенню напруженого стану кільцевого зварного з'єднання зі спеціальним розробленням скосом товстішої стінки з внутрішньої поверхні труби. В цьому випадку за розрахункову модель прийнято оболонку, складену із декількох частин, зокрема трьох (рис. 4 і 5), тобто скіс моделюватимемо східчатою формою.

Координату, що описує відстань правого торця оболонки проміжної товщини, позначимо через z_0 . Ця координата виражається через різницю товщин стінок труб, кут скосу β^* і ширину зазору $2l$ так: $z_0 = l + 2(h_2 - h_1) \operatorname{ctg} \beta^*$.

При цьому в зоні скосу $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$ ($\alpha_0 = z_0/R_1$) позначимо:

$$\varphi_{10}(\alpha) = \varphi_{12}(\alpha), \quad S_{10}^0(\alpha) = S_{12}^0(\alpha); \quad \varphi_{20}(\alpha) = \varphi_{22}(\alpha), \quad S_{20}^0(\alpha) = S_{22}^0(\alpha), \quad (13)$$

а з умов неперервності деформацій $e_{\beta\beta}^0$, $e_{\alpha\alpha}^0$ за товщиною оболонок впливають наступні зв'язки між параметрами m_{ij}

$$m_{12} = y_0^2 m_1, \quad m_{22} = y_0^2 m_2, \quad y_0 = h_0/h_1, \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_0, \\ m_{12} = y_2^2 m_1, \quad m_{22} = y_2^2 m_2, \quad y_2 = h_2/h_1, \quad \alpha \geq \alpha_0. \quad (14)$$

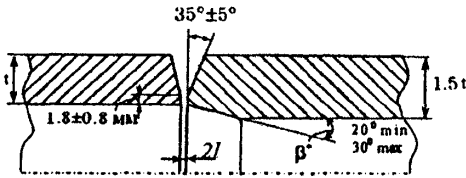


Рис. 4. Розробка торців за товщини стінки труб t до 16 мм

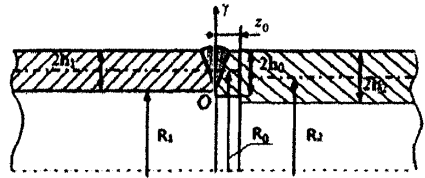


Рис. 5. Схема стикового зварного з'єднання різновтовщинних труб

Прогин оболонки, зумовлений залишковими деформаціями подано так:

$$W(\alpha) = \begin{cases} W_1(\alpha), & \alpha \leq 0, \\ W_0(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha_0, \\ W_2(\alpha), & \alpha \geq \alpha_0. \end{cases}$$

Тоді диференціальні рівняння для визначення безрозмірних функцій $\bar{W}_i(\alpha)$ ($i=0,1,2$), що виражаються через $W_i(\alpha)$ співвідношеннями (6), можна записати у формі (7).

Загальні розв'язки ключових рівнянь, аналогічно як і рівняння (7), зобразимо у формі (8), врахувавши при цьому, що індекс i приймає значення $i=0,1,2$, а функція $\bar{W}_0(\alpha)$ така:

$$\bar{W}_0(\alpha) = B_1 \omega_{10}(\alpha) + B_2 \omega_{20}(\alpha) + B_3 \omega_{30}(\alpha) + B_4 \omega_{40}(\alpha) + \bar{W}_{00}(\alpha), \quad (15)$$

де

$$\omega_{10}(\alpha) = \text{ch } \lambda_0 \alpha \cos \lambda_0 \alpha, \quad \omega_{20}(\alpha) = \text{ch } \lambda_0 \alpha \sin \lambda_0 \alpha, \\ \omega_{30}(\alpha) = \text{sh } \lambda_0 \alpha \cos \lambda_0 \alpha, \quad \omega_{40}(\alpha) = \text{sh } \lambda_0 \alpha \sin \lambda_0 \alpha,$$

B_r ($r=1,2,3,4$) – сталі інтегрування.

Вісім сталих інтегрування A_{ij} ($i, j=1,2$), B_r ($r=2,3$), що входять у вирази (8), (15), визначимо із умов ідеального механічного контакту в перерізах $\alpha=0$ і $\alpha=\alpha_0$.

Вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень зберігають структуру (11), тільки в даному випадку $i=0,1,2$.

Числові параметри знаходять шляхом мінімізації функціонала нев'язки. З цією метою важливо встановити, які з цих параметрів суттєво впливають на рівень і просторовий розподіл по об'єму труби залишкових напружень. Для зварного з'єднання труб зовнішнім діаметром 1020 мм і товщинами $2h_1=10$ мм, $2h_0=12$ мм, $2h_2=14$ мм, виготовлених зі сталі 17Г1С ($E=2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu=0.3$),

для характерних розподілів залишкових деформацій $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$, що описуються виразами (1) - (4), (13), (14), проведено числовий аналіз задачі. Залишкові напруження обчислено за формулами (11, 12) при різних значеннях параметрів m_i, s_{ij}, α_{ij} ($i, j = 1, 2$) та β^* , результати яких для деяких значень цих параметрів і $EE_1^* = 1.68 \cdot 10^2$ МПа; $k = 2$, зокрема, графічно зображені на рис. 6, 7.

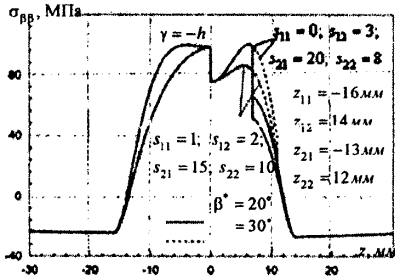


Рис. 6. Залежність рівня і розподілу колових залишкових напружень на внутрішніх поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій за довжиною труб

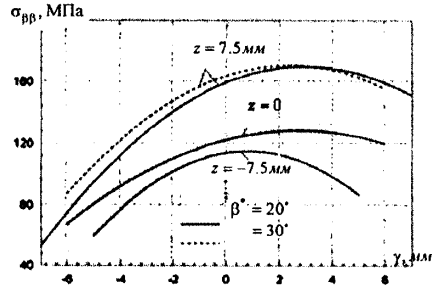


Рис. 7. Розподіл колових залишкових напружень за товщиною труби в зоні різнотовщинного зварного з'єднання дослідного стенду

На рис. 6 графічно зображено залежність рівня і розподілу колових залишкових напружень на внутрішніх поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій вздовж труб (зміна параметрів s_{ij}), ширини зон яких описуються вказаними значеннями параметрів z_{ij} . Розподіл колових залишкових напружень за товщиною труб в поперечних перерізах на осі шва ($z = 0$) і в зонах максимальних напружень ($z = -7.5$ мм, $z = 7.5$ мм) графічно зображено на рис. 7 для числових значень параметрів $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$, $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$, $s_{11} = -16$, $s_{12} = 14$, $s_{21} = -13$, $s_{22} = 12$.

В четвертому розділі отримані розрахункові формули для обчислення колових $\sigma_{\beta\beta}^P$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}^P$ напружень в трубах різнотовщинного зварного з'єднання від внутрішнього тиску P . Описано дослідницький стенд, що був розроблений здобувачем для визначення характеристик напруженого стану в зоні різнотовщинних труб неруйнівними методами. Стенд виготовлено у вигляді горизонтального резервуара із обичайок різнотовщинних труб зовнішнім діаметром 1020 мм, зварених між собою багат шаровими кільцевими швами і привареними півсферичними днищами. Резервуар заповнено водою і за допомогою насосної станції в ньому створюється внутрішній тиск P заданого рівня.

В зоні зварного з'єднання виготовлених зі сталі 17Г1С труб з товщинами стінок $2h_1 = 10$ мм і $2h_2 = 14$ мм методом спекл-інтерферометрії визначали колові $\sigma_{\beta\beta}^E$ і осові $\sigma_{\alpha\alpha}^E$ залишкові напруження в певних перерізах на зовнішній поверхні резервуара до і після опресування. В цих же перерізах електромагнітним методом за допомогою приладу "MESTR – 411" визначали усереднену за площею дії давача різницю головних напружень σ_+^E .

Результати обробки, отриманих на стенді електромагнітним методом експериментальних даних, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати обробки експериментальних вимірювань

z_n , мм	-65	-50	-35	-25	25	35	50	65	$N_{10} - N_{20}$
N	-21	-49	124	207	201	69	-72	-56	33
ΔN	-54	-82	91	174	168	36	-105	-89	
$\sigma_+^E(z_n)$, МПа	-62,4	-94,8	105,2	201,1	194,2	41,6	-121,4	-102,9	

В усіх дослідженнях кількість повторних вимірювань n складала 4, в табл. 1 наведені усереднені значення за чотири вимірами.

Використавши отримані експериментальні дані і формули для обчислення напружень, мінімізацією функціоналу нев'язки між експериментально визначеними і теоретично обчисленими характеристиками напружень знайдено числові параметри E_1^* , k , m_i , s_{ij} , α_{ij} і обчислено залишкові напруження в зоні даного конкретного зварного з'єднання.

На рис.8 суцільною кривою графічно зображено рівень і розподіл обчислених теоретично колових залишкових напружень на зовнішній поверхні

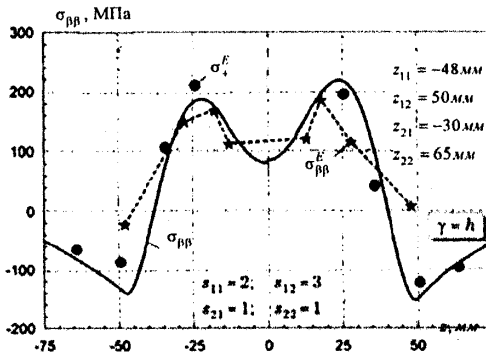


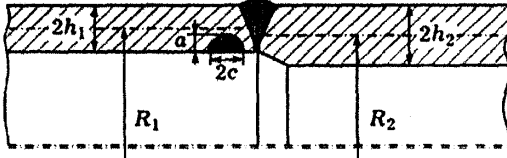
Рис. 8. Розподіл колових залишкових напружень в зоні зварного з'єднання

досліджуваного зварного з'єднання. Експериментальні дані, отримані методом спекл-інтерферометрії $\sigma_{\beta\beta}^E$ показані на рисунку зірочками (*), а електромагнітним методом σ_+^E - кружечками (o). Як видно із рис. 8 максимальна різниця між коловими напруженнями, обчисленими теоретично - розрахунковим способом і методом спекл-інтерферометрії не перевищує 12 %.

П'ятий розділ присвячено дослідженню впливу незреласованих залишкових напружень на статичну міцність зварних з'єднань з дефектами типу тріщин. Розглянуто ділянку трубопроводу зі зварним з'єднанням під дією внутрішнього тиску P і залишкових напружень. При цьому постулюється наявність у стінці тоншої труби гострокінцевого дефекту, який згідно з відомою в літературі методикою схематизації виявлених дефектів відповідними дефектами канонічної форми, можна змоделювати осьюою поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a і c (рис. 9).

Положення довільної точки на контурі тріщини задається через кут $0 \leq \varphi \leq \pi$.

Для оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність даного зварного з'єднання використано рекомендовану відомчими будівельними нормами діаграму оцінки руйнування (ДОР), що постулює інтерполяційний взаємозв'язок



між двома граничними станами у вигляді функції від двох параметрів K_r і S_r , де K_r характеризує міру схильності до крихкого руйнування в деякій точці в зоні дефекту, а S_r - міру пластичного стану нетто перерізу стінки труби з тріщиною.

Рис. 9. Зварне з'єднання різновтовщинних труб з поздовжньою поверхневою тріщиною у внутрішній стінці тоншої труби

Гранична крива статичної міцності в координатах K_r , S_r описується виразом

$$\begin{cases} K_r(S_r) = f(S_r), & S_r \leq S_r^{\max}, \\ K_r(S_r) = 0, & S_r > S_r^{\max}, \end{cases} \quad (16)$$

де $f(S_r) = (1 - 0.14S_r^2)[0.3 + 0.7 \exp(-0.65S_r^6)]$; $S_r^{\max} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T}$; σ_B - границя

міцності матеріалу, $K_r = K_1 / K_{1c}^*$ - безрозмірний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), а $S_r = P / P_{LL}(l, \sigma_T)$; P - параметр, прикладеного номінального навантаження в зоні дефекту; $P_{LL}(l, \sigma_T)$ - граничне значення P за розмірів дефекта l і номінальних напруженнях, що відповідають границі плинності σ_T матеріалу в

цій зоні; $\sigma_{ref} = \frac{P}{P_{LL}(l, \sigma_T)} \hat{R}_2$; K_1 - максимальне значення КІН на контурі тріщиноподібного дефекту; $K_{1c}^* = K_{1c} / k_0$; $\hat{R}_2 = \sigma_T / \kappa_0$; K_{1c} - критичне значення K_1 ; k_0 - інтегральний коефіцієнт надійності трубопроводу.

Для прикладеної системи навантаження, що діють на зварне з'єднання з дефектом, розраховують напружений стан, КІН та σ_{ref} і визначають параметри K_r та

S_r . При цьому характерним є те, що, згідно з літературними даними, залишкові зварювальні напруження не впливають на величину σ_{ref} , оскільки встигають майже повністю релаксувати до появи пластичної нестійкості, тому при розрахунку параметра S_r залишкові напруження рекомендують не враховувати і далі позначимо його через S_r^P .

Для оцінки впливу залишкових напружень на рівень коефіцієнта запасу міцності параметр K_r подано у вигляді

$$K_r = K_r^P + K_r^r, \quad (17)$$

де K_r^P – безрозмірний КІН, викликаний дією зовнішніх силових факторів, а K_r^r – залишковими напруженнями.

Тоді коефіцієнт запасу міцності з урахуванням залишкових напружень, який позначимо через n_r , обчислюємо за формулою

$$n_r = S_r^N / S_r^P, \quad (18)$$

де числове значення S_r^N – розв'язок трансцендентного рівняння

$$\frac{K_r^P}{S_r^P} \left(1 + \frac{K_r^r}{K_r^P} \right) S_r^N = f(S_r^N). \quad (19)$$

Для обчислення КІН і напружень σ_{ref} використано співвідношення і таблиці, наведені в роботах Американського інституту нафти і газу, і для широкого діапазону зміни геометрії труби і розмірів тріщини розроблено програмне забезпечення. Розрахунок проведено для виготовлених зі сталі 17Г1С труб діаметром 1020 мм з товщинами стінок $2h_1 = 10$ мм, $2h_2 = 14$ мм і проміжковою $2h_0 = 12$ мм з тріщиною в стінці тоншої труби, центр якої розташований на відстані 15 мм від осі шва.

Значення усереднених по довжині тріщини напружень на внутрішній поверхні труби, зумовлених дією внутрішнього тиску $P = 4$ МПа, прийнято $\hat{\sigma}_{\beta\beta}^P = 175$ МПа. Рівень усереднених по довжині тріщини колових залишкових напружень на внутрішній поверхні труби прийнято $\sigma_{\beta\beta} = 95$ МПа, що знаходиться в межах зміни незреласованих напружень після високого відпуску зварного з'єднання. Згідно з нормативними документами для даної марки сталі $K_{Ic}^* = 61$ МПа $\sqrt{м}$, $R_2 = 223$ МПа, $k_0 = 1.63$.

На рис. 10 графічно зображено залежність коефіцієнтів запасу міцності зварного з'єднання з тріщинами зі співвідношенням півосей $c = a$ і $c = 2a$ від відносної глибини тріщини $a/2h_1$. Як видно з графіків з ростом глибини тріщини величина коефіцієнтів запасу міцності значно зменшується. При цьому суттєвий вплив відіграють залишкові напруження. Так, за умов їх відсутності значення коефіцієнта запасу міцності для даних геометричних розмірів ділянки труби,

тріщини та внутрішнього тиску $n > 1$ і цю ділянку згідно з нормативними документами можна вважати працездатною. Урахування дії залишкових напружень для цих же геометричних параметрів і навантажень показує, що коли $c = 2a$,

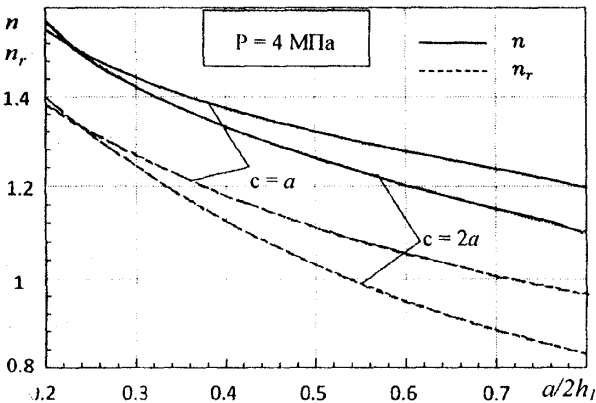


Рис. 10. Залежність коефіцієнтів запасу міцності n і n_r від відносної глибини тріщини

$a/2h_1 \geq 0.55$ коефіцієнт запасу міцності $n_r < 1$ і дана ділянка трубопроводу втрачає безумовну працездатність.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне науково-технічне завдання з підвищення вірогідності оцінки залишкових технологічних напружень в зоні кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб магістральних трубопроводів тривалої експлуатації і статичної міцності таких з'єднань за наявності в них дефектів типу тріщин.

У роботі отримано такі основні результати:

1. Вперше для визначення залишкових напружень в МТ в рамках розрахунково-експериментального методу побудовано розрахункову модель, що описує осесиметричний напружено-деформований стан стикових кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб однакових діаметрів за умов, коли не вимагається спеціального розроблення торців труб при зварюванні, а також у випадку, коли застосовують спеціальну форму розроблення скосом товстішої стінки з внутрішньої поверхні труби. Отримано ключове (визначальне) диференціальне рівняння четвертого порядку для визначення нормального до серединної поверхні оболонки переміщення (прогину) W , в праву частину якого входять усереднені по товщинах труб залишкові несумісні деформації, побудовано його розв'язок і на цій основі отримано вирази для обчислення залишкових напружень в зоні кільцевого з'єднання різновтовщинних труб.

2. Оцінено на основі числового аналізу знайдених розв'язків вплив різних параметрів, що входять у вирази для обчислення залишкових напружень, і, зокрема, встановлено, що:

- збільшення ширини зон несумісних залишкових колових деформацій розширює межі дії розтягальних колових залишкових напружень і неістотно впливає на характер їх розподілу;

- збільшення градієнтів залишкових деформацій вздовж труб при фіксованих ширинах зон їх локалізації може значно вплинути на рівні колових і осьових залишкових напружень;

- зростання перепаду термопластичних деформацій за товщиною труб незначно впливає на рівень колових і може зумовити суттєве збільшення стискальних осьових залишкових напружень;

- рівень колових і осьових залишкових напружень в глибинних шарах труб може значно перевищувати їх рівень на поверхнях труб. При цьому зі збільшенням кута скосу β^* рівень колових залишкових напружень в трубі з товстішою стінкою дещо зростає, а осьових - спадає.

3. Створено устаткування для експериментального визначення і аналізу характеристик напруженого стану в зоні зварних з'єднань різнотовщинних труб. Для зварного з'єднання різнотовщинних труб діаметром 1020 мм з товщинами стінок 10 мм і 14 мм методом спекл-інтерферометрії в декількох перерізах на зовнішніх поверхнях труб визначено залишкові колові $\sigma_{\beta\beta}^E$ і осьові $\sigma_{\alpha\alpha}^E$ напруження, а електромагнітним методом – значення усередненої різниці головних напружень σ_{\pm}^E .

4. На основі мінімізації функціоналу нев'язки між теоретично розрахованими і експериментальними значеннями характеристик напруженого стану, які отримано за допомогою електромагнітного методу та методу спекл-інтерферометрії, за наведеними формулами обчислено залишкові напруження в довільній точці конкретного зварного з'єднання.

5. На базі двохпараметричного критерію граничного стану і відповідної діаграми оцінки руйнування оцінено вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянки трубопроводу під внутрішнім тиском з кільцевим зварним з'єднанням з дефектом в тоншій трубі, який моделюється внутрішньою осьовою півеліптичною тріщиною. Для труб діаметром 1020 мм з товщинами стінок 10 мм і 14 мм з тріщиною зі співвідношеннями півосей еліпса $c = a$ і $c = 2a$ в межах зміни відносної глибини дефекту $0,2 \leq a/10 \leq 0,8$ обчислено коефіцієнти запасу міцності n у випадку дії тільки внутрішнього тиску $P = 4$ МПа, та n_c коли враховується ще і дія залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta} = 95$ МПа. Встановлено, що:

- за умови відсутності дії залишкових напружень для такої ділянки трубопроводу коефіцієнт запасу міцності $n > 1$ і її згідно з нормативними документами можна вважати безумовно працездатною;
- урахування дії залишкових напружень на рівні, що знаходиться в межах значень незреласованих напружень після опресування, значно зменшує коефіцієнт запасу міцності і для $a/10 \geq 0,55$ значення $n_r < 1$, тобто дана ділянка трубопроводу втрачає безумовну працездатність.

Список опублікованих автором праць за темою дисертації:

1. Іванчук О.О. Математична модель розрахунково-експериментального діагностування напруженого стану різнотовщинних кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів / О.О. Іванчук, В.А. Осадчук // Науково-технічний журнал "Методи та прилади контролю якості". – Івано-Франківськ, 2005. – №15. – С. 97-100.
2. Осадчук В.А. Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич, О.О. Іванчук // "Фізико-хімічна механіка матеріалів". – 2006 р. – Том 42. – № 2. – С. 99-105.
3. Іванчук О. Розрахунково-експериментальне визначення напруженого стану кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб/ О.О. Іванчук // Машинознавство. – 2006. – № 9-10. – С. 22 – 26.
4. Іванчук О.О. Визначення залишкових напружень в зоні кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб / О.О. Іванчук, В.А. Осадчук // Науковий вісник Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 2 (16). – С. 98 – 101.
5. Осадчук В.А. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різнотовщинних труб з дефектами типу тріщин / В.А. Осадчук, Ю.В. Пороховський, О.О. Іванчук // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – 51, № 2. – С. 133 – 146.
6. Іванчук О.О. Вплив локалізації зварювальних деформацій в зоні кільцевого з'єднання різнотовщинних труб на розподіл технологічних залишкових напружень / О.О. Іванчук // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки "Галицька академія". – Івано-Франківськ, 2006. – № 2(10). – С. 89 – 91.
7. Залишкові напруження в зоні стикового зварного з'єднання двох різнотовщинних циліндричних оболонок: матеріали VII-ї Міжнародної наукової конференції ["Математичні проблеми механіки неоднорідних структур"], в 2-х томах, (Львів, 20-23 вересня 2006 р.) / Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – Львів: ІППМіМ ім. Я.С. Підстригача, ВКП "ВМС", 2006. – Т. 2. – 243 с.

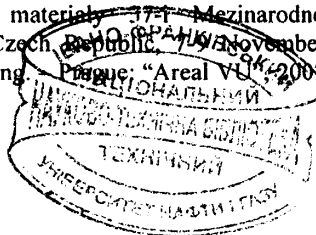
8. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на міцність трубопроводу з дефектами в зоні кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб: матеріали II-ї Міжнародної наукової конференції ["Сучасні проблеми механіки та математики"], в 3-х томах, (Львів 25-29 травня 2008 р.) / Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. – Львів: ІППМіМ ім. Я.С. Підстригача, ВКП "ВМС", 2008. – Т. 1. – 288 с.
9. Розрахунково-експериментальне визначення залишкових напружень у зварному з'єднанні трубопроводу з використанням інформації, отриманої методом голографічної інтерферометрії: тези доповідей Всеукраїнської наукової конференції ["Сучасні проблеми механіки"], (Львів, 2-5 листопада 2004 р.) / Міністерство освіти і науки України та Національна академія наук України. – Львів: ЛНУ ім. Ів. Франка, 2004. – 82 с.
10. Контроль напруженого стану в зварних з'єднаннях різновтовщинних труб магістральних трубопроводів: матеріали V-ї науково-практичної конференції з НК ["Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості"], (Шарм ель Шейх, Єгипет, 22-29 квітня 2007 р.) / Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики. – К.: ДП "Тест", 2007. – 72 с.
11. Diagnostics of technological residual stresses in different thickness circumferential welded joints of pipelines: materials of 7th International conference ["Defektoskopie 2007"], (Prague, Czech Republic, 29-30 November, 2007 y.) / Czech Society for Nondestructive Testing, Prague, "Areal VÚK", 2007. – 321 p.

АНОТАЦІЯ

Іванчук О.О. Діагностування напруженого стану і оцінка запасу міцності кільцевих зварних стиків різновтовщинних труб магістральних нафтогазопроводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2008.

Дисертацію присвячено розвитку розрахунково-експериментального методу визначення залишкових напружень в зонах кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб і оцінці їх впливу на статичну міцність ділянок трубопроводів з такими з'єднаннями за наявності в них гострокінцевих дефектів типу тріщин. В рамках теорії оболонок побудовано математичну модель, що описує осесиметричний напружений стан зварених різновтовщинних труб під дією локалізованих біля шва залишкових несумісних деформацій. Визначення залишкових напружень ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонок з власними напруженнями з використанням експериментальної



інформації, отриманої неруйнівними методами. Використавши діаграму оцінки руйнування, яка базується на двопараметричному критерії механіки руйнування, оцінено вплив залишкових напружень на коефіцієнти запасу міцності ділянки трубопроводу під внутрішнім тиском зі зварним з'єднанням, з внутрішньою півеліптичною поверхневою тріщиною в стінці тоншої труби.

Ключові слова: *трубопровід, кільцеві зварні з'єднання різновисотних труб, розрахунково-експериментальний метод, залишкові напруження, статична міцність.*

АННОТАЦІЯ

Иванчук А.А. Диагностирование напряженного состояния и оценка запаса прочности кольцевых сварных стыков разнотолщинных труб магистральных нефтегазопроводов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2008.

Диссертация посвящена развитию расчетно-экспериментального метода определения остаточных напряжений в зонах кольцевых сварных соединений разнотолщинных труб и оценке их влияния на статическую прочность участков трубопроводов с такими соединениями при наличии в них остроконечных дефектов типа трещин. В рамках теории оболочек построено математическую модель, описывающую осесимметрическое напряженное состояние сваренных разнотолщинных труб под действием локализованных возле шва остаточных несовместных деформаций. Определение остаточных напряжений базируется на решении обратных задач теории оболочек с собственными напряжениями с использованием экспериментальных данных, полученных неразрушающими методами. Получены выражения для расчета окружных и осевых напряжений в трубопроводе, обусловленных локальными остаточными деформациями в зоне сварного шва, двумерное распределение которых описано тензорными полиномиальными функциями с определенным количеством произвольных параметров.

В зависимости от разности толщин стенок труб одного диаметра рассмотрены сварные соединения без и со специальной разделкой толстой стенки трубы. На основании решения задачи для заданного множества несовместных остаточных деформаций проанализировано влияние ширины зоны их локализации и градиентов вдоль и по толщине трубы на уровень и распределение остаточных напряжений в зоне сварного шва. Установлено, что с увеличением ширины зоны термопластических остаточных деформаций расширяются пределы растягивающих окружных остаточных напряжений, а характер их распределения изменяется незначительно. Увеличение градиентов остаточных деформаций вдоль труб при фиксированных ширинах зон их локализации может значительно изменить уровни

окружных и осевых остаточных напряжений. С увеличением градиента термопластических деформаций по толщине труб уровень окружных напряжений изменяется незначительно, а осевые сжимающие напряжения могут существенно увеличиться. Уровень окружных и осевых остаточных напряжений в глубинных слоях труб может значительно превышать их уровень на поверхностях труб.

Изготовлено оборудование для экспериментального определения характеристик напряженного состояния в зоне сварных соединений разнотолщинных труб. Для соединения труб (\varnothing 1020 мм, сталь 17Г1С) с толщинами стенок 10 мм и 14 мм методом спекл-интерферометрии в нескольких сечениях на внешних поверхностях определены значения окружных и осевых остаточных напряжений, а электромагнитным методом – значения усредненной разности главных напряжений. С использованием функционала невязки между теоретически рассчитанными и экспериментальными данными определены произвольные параметры в формулах для напряжений и рассчитаны окружные и осевые остаточные напряжения в произвольной точке сварного соединения.

На основании двухпараметрического критерия предельного состояния и соответствующей диаграммы определения разрушения оценено влияние остаточных напряжений на статическую прочность участка трубопровода под внутренним давлением с кольцевым сварным швом с дефектом в тоньшей трубе, который моделируется внутренней осевой полуэллиптической трещиной. Показано, что при внутреннем давлении $P = 4$ МПа нерелаксированные остаточные кольцевые напряжения на уровне 95 МПа, который может иметь место даже при высоком отпуске, для определенных размеров дефекта могут существенно влиять на работоспособность сварного соединения.

Ключевые слова: трубопровод, кольцевое сварное соединение разнотолщинных труб, расчетно-экспериментальный метод, остаточные напряжения, статическая прочность.

ANNOTATION

Ivanchuk O.O. Diagnostics of stressed state and estimation of safety margin of circumferential welded joints of different thickness pipes of main oil/gas pipelines. – Princtscript.

The dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences on 05.15.13 speciality – pipeline transport and oil/gas storages – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2008.

The dissertation is devoted to the development of design-experimental method for determining of residual stresses in zones of circumferential welded joints of different thickness pipes and for estimation of their influence on static strength of segments of pipeline with such joints, sharp-ended defects like cracks being present in them. Within the shell theory, a mathematical model is developed which describes the axis-symmetrical stressed state of welded pipes of different thickness under the influence of localized near a joint residual non-compatible deformations. The determination of

residual stresses is based on solutions of inverse problems of the theory of shells with inner stresses, information from experiments based on non-destructive methods being used. Using the diagram of fracture estimation which is based on fracture mechanics, the effect of residual stresses on safety factors of pipeline segment with a welded joint and with an internal semi-elliptical surface crack in the wall of the thinner pipe under internal pressure is estimated.

Key words: pipeline, circumferential welded joint of different thickness pipes, design-experimental method, residual stresses, static durability.