

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

На правах рукопису

Іванчук Олександр Олексійович

УДК 622.692.4

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

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Осадчук Василь Антонович,
доктор фіз.-мат. наук, професор

Львів - 2008

d 333

З М І С Т

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	13
1.1. Проблеми працездатності магістральних трубопроводів тривалої експлуатації	13
1.2. Проблеми оцінки міцності магістральних трубопроводів тривалої експлуатації	16
1.3. Методи визначення залишкових напружень	19
1.3.1. Розрахункові методи визначення залишкових напружень	19
1.3.2. Експериментальні методи.....	24
1.3.3. Розрахунково-експериментальні методи	28
1.4. Особливості різнотовщинних стикових зварних з'єднань магістральних трубопроводів.....	32
1.5. Основні задачі та напрямки досліджень	35
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗОНІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБ, ЗВАРЕНИХ БЕЗ СПЕЦІАЛЬНОЇ РОЗРОБКИ ТОВСТІШОЇ СТІНКИ.....	37
2.1. Розрахункова модель методу.....	37
2.1.1. Основні співвідношення і визначальні диференціальні рівняння, що описують напружено-деформований стан різнотовщинних труб, зумовлений осесиметричними залишковими деформаціями.....	38
2.1.2. Апроксимація розподілу власних залишкових деформацій в зоні кільцевого зварного з'єднання різнотовщинних труб і побудова розв'язку прямої задачі	42
2.1.3. Обернена задача теорії різнотовщинних оболонок з залишковими технологічними деформаціями і напруженнями	54

2.2. Особливості, характерні для деяких неруйнівних методів, що застосовуються для визначення напруженого стану	59
2.3. Оцінка впливу ширини зони локалізації несумісних залишкових деформацій і їх градієнтів по довжині і товщині труб на рівень і розподіл залишкових напружень	62
2.3.1. Вплив ширини зони несумісних деформацій на рівень максимальних напружень біля зварного шва різнотовщинних труб	63
2.3.2. Розподіл залишкових напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб при різних градієнтах залишкових деформацій вздовж труб за їх товщиною	68
Висновки до розділу 2	76
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБАХ, ЗВАРЕНИХ КІЛЬЦЕВИМ ШВОМ З РОЗРОБЛЕННЯМ СКОСОМ ТОВСТІШОЇ СТІНКИ	78
3.1. Побудова розрахункової моделі зварного з'єднання з розробленням скосом товстішої стінки	78
3.2. Числовий аналіз впливу рівня кута скосу оброблення товстої стінки та ширини зони і градієнтів термопластичних деформацій на розподіл залишкових напружень	86
3.2.1. Вплив ширини зони залишкових термопластичних деформацій на рівень максимальних напружень біля зварного шва	86
3.2.2. Розподіл залишкових напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб при різних градієнтах залишкових деформацій вздовж труб за їх товщиною	89
Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНОМУ З'ЄДНАННІ РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБ	99

4.1. Напруження в трубах різнотовщинного зварного з'єднання від внутрішнього тиску	99
4.2. Експериментальне визначення напруженого стану зварних стиків різнотовщинних труб	104
4.2.1. Устаткування для моделювання НДС в зоні зварних різнотовщинних з'єднань	104
4.2.2. Методика визначення залишкових напружень в зоні зварних з'єднань з використанням електронної спекл-інтерферометрії	107
4.2.3. Визначення залишкових напружень в зоні різнотовщинних зварних з'єднань труб за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу	110
4.2.4. Визначення усереднених характеристик залишкових напружень в зоні різнотовщинних зварних з'єднань труб електромагнітним методом	116
4.2.5. Розв'язання оберненої задачі і обчислення залишкових напружень у різнотовщинному кільцевому зварному з'єднанні трубопроводу	121
Висновки до розділу 4.....	124
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБ З ДЕФЕКТАМИ ТИПУ ТРІЩИН.....	125
5.1. Схематизація поверхневих дефектів суцільності матеріалу труби.....	125
5.2. Розрахунок на статичну міцність трубопроводу з дефектами в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб	128
5.2.1. Напруження в трубопроводах від зовнішнього навантаження і розрахункові характеристики матеріалу.....	128
5.2.2. Критерій статичної міцності трубопроводу з дефектом типу тріщин.....	131

5.3. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень і напружень σ_{ref} в трубі з внутрішньою півеліптичною поверхневою тріщиною	135
5.3.1. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень	135
5.3.2. Розрахунок напружень σ_{ref}	139
5.4. Розрахунок коефіцієнтів запасу міцності і оцінка впливу на їх величину залишкових напружень в різнотовщинному зварному з'єднанні з поверхневою тріщиною в стінці тоншої труби.....	140
Висновки до розділу 5.....	142
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
ДОДАТКИ.....	168

Вступ

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. При цьому особливе місце займають кільцеві зварні з'єднання різновтовщинних труб, оскільки вони є однією з причин високої концентрації напружень. При проведенні діагностування напруженого стану таких з'єднань найскладнішим є встановлення рівня і характеру розподілу в тілі труби залишкових технологічних напружень, зумовлених зварюванням, оскільки для трубопроводів тривалої експлуатації ні розрахункові, ні існуючі неруйнівні методи контролю не дозволяють розв'язати цю проблему.

Визначенням напружено-деформованого стану (НДС) і розрахунками трубопроводів на міцність при статичних і повторно-змінних навантаженнях займалися багато відомих у цій галузі учених та спеціалістів: А.Б. Айбіндер [2, 3], О.Є. Андрейків [6, 106], Л.А. Бабін [8], В.О. Березін [12], Б.С. Білобран [13], П.П. Бородавкін [16], О.М. Карпаш [36, 49], Є.І. Крижанівський [60, 61], А.Я. Красовський [59], Л.М. Лобанов [64, 69, 81], Н.А. Махутов [77, 78], І.В. Ориняк [97, 98, 122], В.В. Панасюк [84, 106], Й.В. Перун [33, 109], Ю.Д. Петрина [21], В.Т. Трощенко [141], Д.Ф. Тимків [153], Л.С. Шлапак [20, 137, 149, 150], J. Lubkiewicz [155, 165], E. Rubicki [171] та ін.

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. [19], Грудз В.Я. [26], Капцов І.І. [47], Кир'ян В.І. [55-54], Ковалко М.П. [55, 142], Махненко В.І. [70-76], Мелехов Р.К. [58], Недосека А.Я. [85-88], Ніколаєв Г.А. [89, 90], Осадчук В.А. [99-104], Патон Б.Є. [107, 108], Підстригач Я.С. [111-113], Похмурський В.І. [58], Розгонюк В.В. [124, 150], Середюк М.Д. [130], Талипов Г.В. [135], Труфяков

В.І. [143], Фомічов С.К. [145], Shi Y.W. [172] та інші вітчизняні і зарубіжні науковці.

На основі аналізу опублікованих за даною проблемою робіт виділено науково-технічні задачі, що мають важливе значення для забезпечення надійної експлуатації трубопроводів, які були покладені в основу дисертаційної 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 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 зоні монтажних кільцевих зварних з'єднаннях і 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних труб МТ;
- оцінити вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок магістральних трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб.

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

Предмет дослідження. Залишкові технологічні напруження в зоні стикових зварних з'єднань різновисотних 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 різновисотних 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 різновисотних труб.

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

– вперше для визначення залишкових технологічних напружень біля багат шарових кільцевих зварних швів різновисотних труб побудовано розрахункову модель і розвинуто метод оцінки їх рівня та розподілу, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії різновисотних 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 різновисотному 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 різнотовщинних 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 [104, 159];
- розроблено математичну модель розрахунково-експериментального діагностування напруженого стану різнотовщинних кільцевих зварних з'єднань магістральних трубопроводів [41, 42];
- проведено аналіз напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів [37, 40, 56, 99];
- досліджено вплив локалізації зварювальних деформацій в зоні кільцевого з'єднання різнотовщинних труб на розподіл технологічних залишкових напружень [39];
- оцінено вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб [100, 101].

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 симпозіумі 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'ятих 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.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Проблеми працездатності магістральних трубопроводів тривалої експлуатації

Численні трубопроводи України входять в міждержавні системи транспортування газу і нафти, які є одними з найбільших у світі. В процесі експлуатації транснаціональних трубопровідних систем (наприклад, газотранспортна система, що пролягає з Далекого Сходу Росії до Західної Європи) виникають ряд технічних проблем, які є спільними для газової і нафтової промисловості України, Росії, Німеччини, Польщі та інших країн. Тому забезпечення надійної роботи трубопровідних систем під час транзиту нафти і газу є одним із пріоритетних напрямків технічної політики України. Успішне розв'язання цієї проблеми можливе тільки при забезпеченні ефективного використання існуючих трубопровідних систем і продовження терміну їх надійної експлуатації шляхом своєчасного проведення діагностичних та ремонтних робіт і дотримання технологічної дисципліни під час тривалої їх експлуатації [9, 17, 24, 29, 49, 96].

На думку авторів праць [35, 144, 164, 167] до числа найбільш поширених механізмів пошкоджень МГ є корозійне розтріскування, водневе окрихчення, статична міцність і циклічна втома.

Згідно даних ВАТ "Газпром" за період з 1991 р. по 2005 р. причини аварій на МГ розподілились таким чином:

стрес-корозія (корозійне розтріскування під напруженням - КРН) – 62,0 %; брак заводського виготовлення в тому числі дефекти зварювання – 21,8 %; зовнішня корозія (без врахування КРН) – 13,2 % [80].

Найбільш часті аварії спостерігались на трубах Челябінського трубопрокатного (ЧТПЗ) і Харцизького трубного заводів (ХТЗ). За марками сталей найбільше число аварій спостерігалось на трубах із імпортованих сталей X 70, друге місце займають труби із сталі 17Г1С.

З підвищенням категорійності газопроводу з III-ої до II-ої категорії (що рівнозначно переходу на більш низький рівень напруженого стану) число аварій спричинених стрес-корозією значно знижується. Крім цього переважна кількість таких аварій припадає на найбільш навантажені газопроводи діаметром 1420 мм (робочий тиск = 7,5 МПа) і діаметром 1220 мм (робочий тиск 5,5 МПа) [80].

Щодо аварій, зумовлених дефектами заводського зварювання труб, то найбільш частими є випадки руйнування труб, виготовлених з сталей марок 17Г1С (виробництва ЧТПЗ і Х70 виробництва ХТЗ). При цьому утворювались тріщини в напрямках лінії сплавлення або в зоні термічного впливу зварних швів [80] (див. рис. 1.1 і рис. 1.2).

Як показує статистика, аварії під час тривалої експлуатації трубопроводів, які спричинені руйнуванням зварних стиків займають друге місце після аварій, зумовлених корозійними дефектами [5]. Досвід спорудження і тривалої експлуатації МТ показує, що руйнування трубопроводів під час випробувань і роботі найбільш часто здійснюється на стикових з'єднаннях, які були заварені ручним дуговим зварюванням [129].

Автор праці [127] вважає, що в біляшовній зоні найбільш небезпечною ділянкою з пониженими механічними властивостями (за KCV перевіркою на ударну в'язкість руйнуванню) є як зона перекристалізації (2-4 мм) з ферито-перлітною сумішшю, так і зона, яка безпосередньо примикає до зварного шва. Бейнітна структура біляшовної зони в невідпущеному стані може являтися зародком майбутнього руйнування. В цій зоні можливе сповільнене руйнування, а якщо присутні зовнішні напруження і корозійне середовище, то ця зона є подвійно небезпечною щодо виникнення КРН. Ось чому майже половина корозійно-механічних руйнувань трубопроводів здійснюється в зонах зварних швів [127].

Оскільки при виконанні кільцевих зварних швів, які здійснюються в польових умовах, може виникати ще і мартенситна структура, небезпека таких швів ще більше зростає [127].



Рис. 1.1. Утворення тріщин в пришовній зоні поздовжнього зварного шва труби



Рис. 1.2. Дефекти в околі кільцевого зварного шва трубопроводу

Приклад руйнування зварного кільцевого шва, виконаного в польових умовах наведений в праці [126]. Описаний зварний шов, який не маючи візуально означених дефектів піддався руйнуванню внаслідок утворення тріщини в пришовній зоні.

В монографії [58] Похмурського В.І., Мелехова Р.К., Круцана Г.М. Здановського В.Г. розглянуті питання корозійно-механічного руйнування зварних з'єднань трубопроводів нафтогазової, переробної і хімічної галузей промисловості. Наведені рекомендації з запобігання корозійно-механічних руйнувань зварних з'єднань трубопроводів шляхом оптимального підбору конструкційних матеріалів, технології і режимів зварювання, термічної та поверхневої обробки.

1.2. Проблеми оцінки міцності магістральних трубопроводів тривалої експлуатації

Значна частина трубопровідної системи України запроектована і побудована більше 25 років тому, відповідно до стандартів і відомчих нормативних документів, які не повністю відповідають сучасним методам розрахунку і експлуатації транспортної системи. Існуючі нормативні документи, що використовуються в різних країнах при розрахунку і експлуатації МТ практично не враховують фактор часу при оцінці їх міцності і надійності [22, 66, 82, 83, 132].

В Європейських і Американських нормах на проектування магістральних трубопроводів розглядаються також не всі граничні стани. Однак в цих нормативних документах наголошується, що вони не є довідником з проектування і при необхідності дозволяють використовувати інші норми і апробовані інженерні методики [162]. Тому в закордонній

практиці переважно “замовник” складає додаткові і більш детальні вимоги щодо критеріїв міцності МТ, ніж ті, що передбачені стандартами [114, 134].

За критерій статичної міцності трубопроводу з дефектами приймається діаграма оцінки руйнування (ДОР), яка побудована за двокритеріальним підходом NUCLER ELECTRIC-R6. Критерій R6 (Велика Британія) одночасно враховує крихке і пластичне руйнування. ДОР є граничною кривою, яка визначає межу між безпечним і небезпечним станом трубопроводу. Діаграма оцінки руйнування будується в координатах K_r та S_r , де K_r – безрозмірний коефіцієнт інтенсивності напружень, віднесений до його критичного значення K_{1c} , а S_r – параметр, що характеризує в’язке руйнування.

При цьому, якщо дефект знаходиться в зоні зварного шва при визначенні коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) потрібно враховувати вплив на його величину залишкових зварювальних напружень

$$K_1 = K_1^H + K_1^{zal}, \quad (1.1)$$

де K_1^H - величина КІН від зовнішнього навантаження, а K_1^{zal} – від залишкових напружень. Тобто залишкові напруження в зоні зварного шва є додатковими силовими факторами, які впливають на величину КІН.

Коефіцієнт запасу міцності за тимчасовим опором металу бездефектного трубопроводу, навантаженого тиском визначають так:

$$n_B^0 = \frac{R_m^0}{[\sigma]}, \quad (1.2)$$

де R_m^0 – границя міцності (значення тимчасового опору) металу труби, яку приймають згідно з сертифікатом на трубу; $[\sigma]$ - допустиме напруження при розрахунку трубопроводу на міцність за граничними навантаженнями.

Фактичний коефіцієнт запасу міцності металу труби (за тимчасовим опором) з урахуванням дійсних параметрів труби δ_0^r і D_{BH}^r на основі [7] має

ВИГЛЯД



ol 333

$$n_B^\tau = \frac{4\delta^\tau R_m^\tau}{\sqrt{3P_{max} D_{вн}^\tau}}, \quad (1.3)$$

де P_{max} – максимально допустимий тиск в трубопроводі; δ^τ і $D_{вн}^\tau$ - відповідно мінімальна товщина стінки, та внутрішній діаметр розглянутої ділянки трубопроводу; R_m^τ - границя міцності (значення тимчасового опору) металу труби на момент проведення перевірки.

Трубопровід вважається працездатним, якщо виконується умова

$$n_B^\tau \geq n_B^0, \quad (1.4)$$

де n_B^0 – мінімально допустимий під час експлуатації трубопроводу коефіцієнт запасу міцності металу труби (за тимчасовим опором). Значення n_B^0 визначають згідно виразу (1.2).

В сталевих магістральних газопроводах проходить процес старіння матеріалу труб. Більш інтенсивно цей процес проходить в сталях, виготовлених за технологіями контрольованої прокатки. Інтенсивність процесу старіння трубних сталей залежить від структурних параметрів, температури і величини сумарних напружень в стінці труби. [147].

Старіння матеріалу приводить до зниження тріщиностійкості і корозійної стійкості, що сприяє розвитку корозійного розтріскування під напруженням (КРН). Старіння неістотно впливає на границю міцності, але суттєво змінює границю пружності, що погіршує умови забезпечення тривалої міцності матеріалу [25, 115, 121, 131, 147, 154].

В зоні монтажних кільцевих зварних з'єднань умови для старіння ще більш сприятливі і при пошкодженні ізоляції внаслідок зменшення корозійної стійкості імовірність їх тривалої експлуатації знижується [147].

Таким чином, знання закономірностей дійсного розподілу напружень дуже важливо для достовірної оцінки ризику експлуатації старіючих трубопровідних систем. Отже, на основі вище наведеного можна зробити

висновок, що проблема старіння трубних сталей є частиною проблеми забезпечення необхідного терміну служби [35] об'єктів трубопровідної системи тривалої експлуатації.

У своєму виступі на науково-практичному семінарі “Проблеми старіння сталей магістральних трубопроводів” (Н. Новгород 2006 р.) Н.А. Махутов відзначив, що визначення дійсного напружено-деформованого стану трубопроводів тривалої експлуатації є дуже важливим чинником при оцінці їх залишкового ресурсу [116].

Щоб надійно оцінити працездатність трубопроводів необхідний комплексний підхід однією з важливих складових якого є визначення напруженого стану в цілому, зокрема, залишкових напружень в зонах зварних швів.

1.3. Методи визначення залишкових напружень

1.3.1. Розрахункові методи визначення залишкових напружень.

Методи визначення залишкових напружень у літературі розділяють на розрахункові (аналітичні та числові) і експериментальні. Розрахункові умовно розділяють на дві групи. До першої відносять методи, що ґрунтуються на аналізі розвитку пружно-пластичних деформацій за нагрівання і вирівнювання температур під час технологічних процесів. Їх реалізація вимагає, навіть у порівняно простих випадках, потужних обчислювальних засобів [74, 166]. До другої групи розрахункових методів відносять наближені методи. Більшість відомих результатів про розподіл залишкових напружень отримано з допомогою цих методів.

Враховуючи, що зварювання є один із найрозповсюдженіших технологічних процесів під час спорудження трубопроводів, проаналізуємо методи визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях.

У багатьох наближених методах припускають одновісність зварювальних напружень. До уваги беруть тільки напруження, які діють у

напрямку, паралельному до осі шва, а інші вважають незначними. Такі методи описані у працях Г.О. Ніколаєва [89, 90], І.П. Трочуна [140], Н.О. Окерблома [93], К.М. Гатовського [23] та ін.

Г.О. Ніколаєв [89] розробив метод, що ґрунтується на наступних припущеннях: наявність тільки одновісних поздовжніх напружень; схематизована залежність границі текучості і відносної пружної деформації на цьому рівні від температури; модель ідеально пружно-пластичного тіла; незалежність теплофізичних властивостей матеріалу від температури у досить широкому діапазоні температур; рівномірність розподілу температурного поля, деформацій та напружень за товщиною пластини. За цим методом можна обчислити залишкові напруження і деформації. При цьому максимальні розтягувальні напруження у пластинах, виготовлених з низьковуглецевих сталей, у біляшовної зони залишкових пластичних деформацій дорівнюють границі текучості сталі, а за межами зони пластичних деформацій є стискальні.

У розрахунковому методі І.П. Трочуна [140] такі ж припущення, як і у методі Г.О. Ніколаєва [90], і, крім того, вважають, що в пластичній зоні залишкові напруження розподілені рівномірно і дорівнюють границі текучості металу σ_T . Для розрахунку ширини зони пластичних деформацій І.П. Трочун запропонував два способи.

Аналіз результатів, отриманих цими методами, а також порівняння їх з експериментальними даними [19], показує їх придатність для визначення залишкових напружень і деформацій у зварних з'єднаннях типу довгих вузьких пластин або балок. Вони оправдані для аустенітних сталей, а також для маловуглецевих і низьколегованих з $\sigma_T \leq 300$ МПа.

Завдяки розвитку комп'ютерної техніки стало можливим у багатьох випадках для довговимірних (одновимірних) зварних конструкцій розробити нові, мобільніші і водночас достатньо точні інженерні методи розрахунку

напружено-деформованого стану. Зокрема в працях В.М. Прохоренка, А.С. Карпенка, О.В. Прохоренка [117-120] створено метод складних перерізів для розрахунку залишкових деформацій від зварювання поздовжніх швів довговимірних конструкцій. Цей метод ґрунтується на наближеному визначенні повної деформації у точках зони пластичних деформацій, укорочення вздовж проекції на площину зварного з'єднання рухомої квазістаціонарної просторової кривої максимальних температур при зварюванні і забезпечує єдиний підхід до розрахунку залишкових деформацій одновимірних зварних конструкцій будь-якої жорсткості.

Важливе місце в дослідженні зварювальних напружень займають пружні розв'язки, які можна використовувати як перше наближення точних пружно-пластичних розв'язків. Такий підхід використаний, наприклад, у методі пружних розв'язків. О.А. Ільюшина [11].

Окремо можна виділити наближені методи, які використовують апарат теорії пластичності з певними припущеннями. До них відносять метод, запропонований Г.Б. Талиповим [135]. Головним його припущенням є те, що "кожен метал різко втрачає здатність чинити опір пластичним деформаціям у певному для нього достатньо вузькому інтервалі температур". І це відбувається за певної середньої у цьому інтервалі температури T_K , тобто $\sigma_T = 0$ для температур $T \leq T_K$. Межі області, в якій метал нагрівся до $T = T_K$, розраховують від рухомого джерела тепла під час зварювання.

Крім цього припущення, яке Г.Б. Талипов відніс до основного, значно більше впливає на точність розрахунків, як відзначено в праці [19], інше припущення, яке слід розглядати як принципове. Воно полягає в тому, що розраховують напруження відразу на стадії охолодження, а утворення деформацій на стадії нагрівання не розглядають. Вважають, що області, в яких температура була нижчою, ніж T_K , мають впродовж усього часу початкову температуру T_0 і перед охолодженням вільні від напружень. Таким чином,

причиною утворення залишкових деформацій і напружень є тільки температурне укорочення області, в якій температура була вища, ніж T_K . Тобто припускають, що причиною виникнення залишкових напружень є виключно температурне укорочення цієї області $\alpha (T_K - T_0)$, де α - коефіцієнт лінійного температурного розширення. Водночас автор запропонував також інший підхід. Він полягає в тому, що вказана область набуває початкові укорочення $\alpha (T_K - T_0)$ тільки у тих напрямках, в яких за нагрівання розширення було обмежене. Тому потрібно на межах цієї області та до останньої частини тіла прикласти сили протилежного знака p , щоб усунути "щілини" між цими областями. Напруження, які виникають при цьому, вважають залишковими.

Результати, отримані за цим методом для одновісних задач, практично збігаються з даними, одержаними вищезгаданими розрахунковими методами. Але перевага цього методу є в його придатності розглядати двовимірні задачі для пластин і оболонок з використанням апарату теорії пружно-пластичних деформацій. Однак для двовимірних задач, наприклад для заварювання кругового шва на площині, пластичні деформації є суттєво різними в радіальному і коловому напрямках. У методі, що розглядаємо, початкові деформації $\alpha (T_K - T_0)$ у цих напрямках вважають однаковими.

В.С. Ігнат'єва [43, 44] запропонувала розрахунковий метод, який базується на припущенні про миттєве укладення зварного шва по всій довжині та розрахунку тимчасових деформацій і напружень на стадії нагрівання в момент часу t_p , коли найбільша температура у будь-якій точці дорівнює T_p (T_p - температура, яка збігається з температурою T_K у методі Г.Б. Талипова). Для температурного поля, що відповідає моменту часу t_p , методами теорії термопружності визначають тимчасові умовні напруження. За інтенсивністю цих напружень σ_i , розраховують межу області пластичних деформацій. Далі з

використанням апарату теорії пластичності визначають компоненти поля пластичних деформацій, які для спрощення розрахунку замінюють деяким полем "фіктивних температур". Залишкові напруження обчислюють як температурні напруження фіктивного поля температур. Характерним для цього методу є те, що хоч і наближено, встановлюють напруження та деформації на стадії нагрівання, які як початкові використовують для обчислення залишкових напружень. Проте введення фіктивного температурного поля зумовлює те, що компоненти початкових пластичних деформацій приймають однакові значення.

У низці праць [19, 71, 111, 119, 120] задачу визначення зварювальних напружень та деформацій формують у вигляді задачі пружно-пластичного деформування тіла в умовах змінних температур і зводять до розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь з заданими крайовими умовами. Для побудови розв'язків таких задач широко використовують числові методи, поєднані зі сучасними обчислювальними засобами. Залежно від застосування різних підходів можна відмітити такі способи їх розв'язування: безпосереднє чисельне диференціювання та інтегрування нелінійних рівнянь; принципи пружних розв'язків; варіаційні принципи.

За принципами пружних розв'язків можна звести задачу теорії пружності до розв'язання послідовності задач теорії пружності з деякими додатковими умовами. Широко застосовуючи принципи додаткових об'ємних сил і додаткових навантажень; додаткових деформацій; змінних параметрів пружності.

Для оцінки кінетики зварювальних напружень і деформацій, а також залишкових напружень у зварних з'єднаннях В.І. Махненко запропонував [45, 73] змішаний принцип додаткових деформацій у сукупності зі змінним модулем зсуву. На цій основі розроблено низку розрахункових алгоритмів, які широко апробовані під час побудови розв'язків пружно-пластичних задач для тонких пластин і оболонок з поздовжніми та кільцевими швами, для

розрахунку об'ємного напруженого стану за одно- і багатопрохідного зварювання у стик товстих пластин тощо.

Поєднання принципу додаткових деформацій з методом граничних інтегральних рівнянь застосував В.М. Максимович [68] для визначення залишкових напружень у пластинчатих елементах конструкцій.

Побудові аналітичних розв'язків просторової задачі термопластичності для шару присвячені праці А.Я. Недосеки та О.І. Бойчук [85, 87].

Розрахунковий аналітичний метод визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях в умовах плоского напруженого стану, який ґрунтується на дислокаційних уявленнях про залишкові напруження, описано Б.С. Касаткіним, В.М. Прохоренком та І.М. Чертовим у монографії [50].

Термомеханічну модель для визначення поздовжніх зміщень зварних з'єднань різного поперечного перерізу запропонували, Л.М. Лобанов, В.А. Санченко та ін. [69].

Урахуванню залишкових напружень під час оцінки довговічності конструкцій присвячені праці В.І. Труф'якова [143], В.В. Панасюка і О.Є. Андрейківа [106], В.І. Кир'яна, В.В. Книша, О.З. Кузьменка [54], І. Мукаї [169].

1.3.2. Експериментальні методи. Аналітичні та чисельні розрахункові методи визначення залишкових напружень ґрунтуються на певній схематизації і в них неможливо врахувати всі діючі в технологічному процесі фізичні явища. Тому для отримання достовірних даних про реальні зварні з'єднання використовують експериментальні методи, які, як правило, розділяють на дві основні групи - руйнівні й неруйнівні (фізичні).

До руйнівних перш за все, слід віднести механічні методи. Які незалежно від того, що вимірюють базуються на визначенні переміщень одних точок відносно інших.

При цьому враховують, що залишкові напруження взаємно урівноважені всередині тіла і у довільному поперечному перерізі рівнодійна та момент залишкових напружень дорівнюють нулю. Після розвантаження певного об'єму тіла розрізанням його на частини ця рівновага зберігається, але виникають пружні деформації. Вимірявши переміщення та розрахувавши ці деформації, можна за формулами теорії пружності обчислити залишкові напруження [48, 50, 51, 67].

Для вимірювання переміщень і деформацій використовують електричні тензometri або механічні деформометри з індикаторними головками, індуктивними та ємністними перетворювачами, а також механотронні перетворювачі [151].

У багатьох випадках для встановлення залишкових напружень застосовують оптично активні давачі [65, 87]. Тоді на напружений елемент наклеюють давач із оптично активного матеріалу, потім у ньому висвердлюють отвір, який викликає локальну зміну поля напружень в елементі та відповідні деформації у давачі. На основі цих змін можна судити про рівень залишкових напружень в елементі. Напружений стан в оптичному давачі досліджують, використовуючи односторонній полярископ [152].

Високочутливим для вимірювання залишкових напружень є метод голографічної інтерферометрії [152]. Голографічна інтерферометрія несе інформацію про переміщення точок поверхні тіла за всіма трьома координатами. Завдяки високій чутливості методу вдається визначити залишкові напруження на поверхні тіла за незначного пошкодження (діаметр і глибина отворів порядку 1...2 мм). Останнім часом дослідження у цьому напрямку інтенсивно проводили Л.М. Лобанов, В.А. Півторак та їхні учні. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона створені компактні голографічні прилади, розроблені автоматизовані системи комп'ютерної обробки голографічних інтерферограм [81].

Велику практичну цінність для визначення та неруйнівного контролю залишкових напружень у конструкціях і спорудах мають фізичні методи. Серед них для дослідження напруженого стану найпоширеніші ультразвуковий, електромагнітний, тензометричний, поляризаційно-оптичний тощо [15, 32, 38, 57, 156, 158]. Проте обмежене їх використання для визначення зварювальних напружень пов'язано з тим, що цей процес супроводжується не тільки пружно-пластичними деформаціями, що викликають напруження, але й фізико-хімічними процесами в біляшовній зоні, які зумовлюють неоднорідність властивостей зварного з'єднання. Фізичні методи ґрунтуються на встановленні змін певних властивостей матеріалу під дією напружень. Якщо ж зміна властивостей металу біля шва викликана одночасною дією пластичних деформацій і фізико-хімічних процесів під час зварювання, то результати вимірювань фізичними методами неоднозначно характеризують рівень залишкових напружень.

Ультразвуковий метод базується на акустопружності – теорії [14, 33, 46, 173], що вивчає закономірності розповсюдження пружних хвиль у напружених тілах. Головна складність надійного акустичного вимірювання залишкових напружень в тому, що зміна параметрів пружної хвилі внаслідок дії напружень несуттєва. Це поглиблюється через наявність у матеріалі досліджуваного виробу структурних і фазових перетворень, що можуть викликати більші зміни параметрів пружної хвилі, а отже, маскувати ефект від залишкових напружень. Основним ефектом нелінійної пружності, який використовують в ультразвукових методах, є залежність швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі в металах від їх напруженого стану. Під час вимірювань застосовують поперечні, (зсувні) та поздовжні ультразвукові хвилі. Використовуючи перші можна отримати набагато більше інформації про внутрішній стан твердого тіла. Це пояснюють тим, що зсувну хвилю на відміну від поздовжньої можна отримати з поляризацією, близькою до лінійної, і розташування площини поляризації можна змінювати. За відомих

фізико-механічних характеристик матеріалу визначення напружень зводиться до вимірювання швидкості розповсюдження двох зсувних ультразвукових хвиль, перпендикулярних до площини дії головних напружень і поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах, що відповідають напрямкам головних напружень. На вибір методу вимірювання швидкості розповсюдження пружної хвилі в твердому тілі впливає багато умов і, в першу чергу, задана похибка вимірювань $(1 \div 3) 10^{-5}$ (0,001%-0,003%).

Використовують, в основному, імпульсні методи. На практиці для вимірювань швидкостей ультразвуку в металах найчастіше використовують прецизійний прилад з автоциркуляцією імпульсу [30].

В працях [27, 28, 148] проаналізовано розподіл одно- і двовісних залишкових напружень у різних зварних з'єднаннях, визначених за допомогою ультразвукового методу.

Під час вимірювань ультразвуковим методом неоднорідних полів напружень отримують усереднені напруження на базі, яка характеризується розмірами вимірювальних давачів. Для виробів зі зміною напружень за товщиною отримують також усереднені значення напружень.

Останнім часом також успішно розвивається ультразвукова комп'ютерна томографія для відтворення просторового розподілу напружень у матеріалі просторових механічних конструкцій [146].

Електромагнітний метод визначення напружень ґрунтується на залежності магнітної проникливості об'єму металу від рівня діючих у цьому об'ємі напружень. Цей метод використовують тільки для феромагнітних металів. Залежність напружень у матеріалі від його магнітних властивостей для двовісного напруженого стану отримують, сумісно розв'язуючи чотири групи рівнянь: теорії пружності, рівнянь магнітостатики, рівнянь сумісності магнітного поля і намагніченості, які зв'язують механічні та магнітні характеристики. Основні залежності, які використовують у цьому методі, та принципові схеми приладів для вимірювань напружень наведені, зокрема, в

монографії А.Я. Недосеки [88]. Тут необхідно враховувати той факт, що зміни властивостей матеріалу в біляшовній зоні можуть призводити до значних похибок. Серед багаточисленних методик і приладів, запропонованих для вимірювань напружень магнітним методом, слід відзначити роботи Н.Н. Максимова і В.В. Попова [67], А.Я. Недосеки, С.К. Фомічова, С.Н. Мінакова, М.Я. Яременко [105]. В праці [122] автори при відтворенні НДС сталевих конструкцій магнітопружним методом пропонують враховувати експериментально-вимірювальні та вчислювально-вимірювальні похибки визначення напружень. Врахування цих похибок при визначенні напружень з використанням магнітопружного методу, а також застосування кореляції розрахункових формул і тарувального коефіцієнта за даними, які отримані при аналогічних вимірюваннях з використанням руйнівних тензометричних і механічних методів дозволяє знизити похибку магнітопружного методу до величини, яка не перевищує $\pm 5\%$ [122].

Поляризаційно-оптичний метод або метод фотопружності це експериментальний метод визначення напруженого стану деталей і конструкцій, виготовлених із оптично чутливих матеріалів [1, 4]. Він ґрунтується на поляризації світла й властивості більшості прозорих ізотропних матеріалів набувати під дією напружень здатність подвійного променезаломлення. В праці [152] викладено основи поляризаційно-оптичного способу вимірювання залишкових напружень і проаналізовано їх розподіл у моделях зварних з'єднань, виготовлених із полікарбонату.

1.3.3. Розрахунково-експериментальні методи. Експериментальні неруйнівні методи не завжди придатні для діагностування НДС трубопроводів через недостатньо повну інформацію про зміну напружень біля їх зварних з'єднань. При використанні розрахункових методів необхідно знати режими зварювання та способи зменшення залишкових напружень в зварних з'єднаннях. Як правило це утруднює, а часто і зовсім не дозволяє

застосовувати ці методи для визначення напружень у трубопроводах тривалої експлуатації. Таким чином, удосконалення відомих та створення нових методів, наприклад експериментально-розрахункових, для визначення напруженого стану біля зварних стикових з'єднань труб є актуальною науково-технічною проблемою [10, 31, 34, 139, 163, 170].

Для визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях широко використовують розрахункові методи, що ґрунтуються на попередній експериментальній інформації. Зокрема, розповсюдженим підходом тут є введення в розрахунок відомих компонентів поля залишкових деформацій. Тоді задача зводиться до відшукування напружень, що відповідають заданим залишковим деформаціям. Однією з перших у цьому напрямку є праця Є.О. Патона про залишкові напруження при зварюванні циліндричних посудин. В ній з використанням функції усадження комплексно досліджено зварювальні напруження в циліндричних оболонках від кільцевих і поздовжніх швів. Дослідження в цьому напрямку і тепер не втратили свого наукового та практичного значення. Запропонована цій роботі ідея розрахункової оцінки методами теорії пружності залишкових напружень за заданими величинами усадних деформацій, що визначаються з простих дослідів, не втратила актуальності. Цей метод фактично повторно, як відзначено в праці [74], запропонували через 40 років японські дослідники [161] під назвою "inherent strain method".

Різні дослідники по-різному підходять до опису усадних явищ, викликаних зварюванням, для розрахунку залишкових напружень і деформацій. Відповідно і різні назви запропонованих ними методик: , метод фіктивної усадної сили (І.П. Трочун [140], В.О. Вінокуров [19] та ін.), метод умовних пластичних деформацій (Я.С. Підстригач, В.А. Осадчук [112], А.Я. Недосека [86]), метод рівномірного усадження (Г.Б. Талипов [135]), метод заданих об'ємів укорочення (М.О. Окерблом [93], С.А. Кузьмінов [62] та ін.) тощо.

У праці [166] розраховано розподіл напружень у пластині за стикового зварювання на основі експериментально встановлених результатів поперечного та поздовжнього усаджень.

Для заданого розподілу залишкових пластичних деформацій аналітичні розв'язки задач про визначення залишкових напружень у тонких оболонках отримано у працях [86, 112, 166]. Функції, що характеризують розподіл залишкових деформацій, тут рекомендують визначати експериментально на моделях та використовувати для розрахунку напружень в оболонках з іншими діаметрами. Слід зауважити, що точність обчислених залишкових напружень за такого підходу, в основному, визначається відповідністю апроксимаційних функцій розподілу пластичних деформацій, які вибрані в розрахунковій моделі, істинному характеру їх розподілу у зварному з'єднанні.

Запропонований *розрахунково-експериментальний метод* визначення залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій, який у літературі [128] називають методом умовних пластичних деформацій, ґрунтується на розв'язках обернених задач механіки деформівних твердих тіл з власними напруженнями та експериментальній інформації, отриманій неруйнівними методами (фотопружності, електромагнітного, ультразвукового, голографічної інтерферометрії тощо).

Суть цього методу для визначення залишкових напружень в оболонках полягає ось у чому. Спочатку записують основні співвідношення і диференціальні рівняння теорії оболонок з залишковими деформаціями, які одержують, використавши, як і у методі додаткових деформацій теорії термопластичності [136], зображення компонент тензора малої деформації $\{e_{ij}\}$ у вигляді суми:

$$e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0 \text{ де } e_{ij} - \text{компоненти тензора повної деформації; } e_{ij}^e - \text{ком-}$$

поненти тензора пружної деформації; e_{ij}^0 - компоненти тензора поля умовних пластичних деформацій, несумісність яких зумовлює залишкові напруження.

При цьому поле e_{ij}^0 враховує, крім пластичних деформацій, також деформації, спричинені різними структурними перетвореннями, які супроводжуються зміною об'єму матеріалу. Далі, використавши фундаментальні розв'язки ключових рівнянь, будують інтегральні подання компонент тензора напружень через невідомі компоненти деформацій e_{ij}^0 . Щоб знайти це поле, використовують експериментальну інформацію про поле залишкових напружень σ_{ij} , яку в певних перерізах оболонки можна отримати одним з неруйнівних методів або за допомогою синтезу цих методів, та будують функціонал, мінімізація якого забезпечує найменшу нев'язку між експериментально визначеними I_m^E і аналогічними теоретично обчисленими I_m^T характеристиками полів напружень.

Тоді задачу про знаходження деформацій e_{ij}^0 розв'язують як обернену задачу теорії оболонок з власним напруженням і вона є умовно коректною. Розв'язок такої задачі будують на певних підмножинках допустимих розв'язків, зокрема на компактній множині, що забезпечує його стійкість до малих змін вхідних параметрів, які одержують на основі експериментальних даних. Після знаходження поля e_{ij}^0 обчислюють компоненти тензора залишкових напружень у довільній точці оболонки, зокрема ті, які не можна отримати експериментально.

Короткий огляд досліджень, присвячених застосуванню такого підходу для визначення залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій, подано в праці [102].

1.4. Особливості різнотовщинних стикових зварних з'єднань магістральних трубопроводів

Дослідження закономірностей поведінки зварних з'єднань труб під час тривалої експлуатації магістральних трубопроводів набуває з кожним роком все більшого значення у зв'язку з новими науковими і інженерними проблемами [63, 91]. Це особливо актуально для оцінки технічного стану зварних з'єднань різнотовщинних труб магістральних трубопроводів, які під час тривалої експлуатації працюють під дією механічних напружень і корозійного середовища.

Різнотовщинні кільцеві зварні з'єднання магістральних трубопроводів зустрічаються у наступних випадках:

- Кільцеві стикові зварні з'єднання труб ділянок магістрального трубопроводу різної категорійності.
- На ділянках МТ при переходах через автомобільні і залізничні дороги.
- На ділянках компенсаторів надземних переходів МТ через природні та штучні перешкоди.
- На ділянках технологічної обв'язки компресорних станцій.

Приклади багат шарових різнотовщинних стикових зварних з'єднань і їх конструктивні елементи при різних співвідношеннях зовнішніх і внутрішніх діаметрів труб і деталей трубопроводу наведені на рис. 1.3.

Якщо при зварюванні кільцевим швом труб різниця між товщинами їх стінок (максимальна з яких 12 мм) не перевищує 2,5 мм і не перевищую 3 мм, коли максимальна товщина стінки більша ніж 12 мм, то форми розробок торців різнотовщинних труб такі як і у випадку однотовщинних. У випадку, коли різниця товщин стінок деталі трубопроводу і труби більша від вказаних значень, але не перевищує 0,5 товщини стінки труби, то застосовуються форми їх з'єднуючих поверхонь наведених на рис. 1.3 а. При різниці товщин деталі і труби більше ніж 0,5 t (при $t = 16...26$ мм) форма їх з'єднуючих

поверхонь наведена на рис. 1.3 б. Кромки і внутрішні та зовнішні поверхні, які прилягають до них зачищають на ширину не менше, ніж 10 мм [129].

З'єднання труб з запірною і розподільчою арматурою з різницею товщин стінок більшою 3 мм здійснюють за допомогою вварювання між

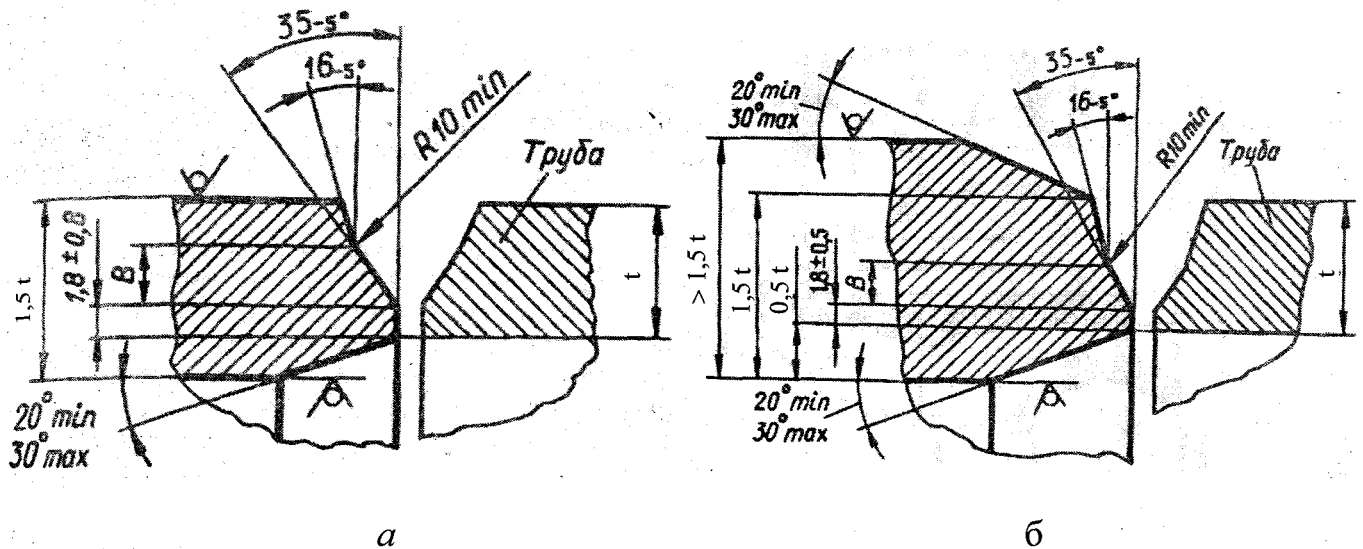


Рис. 1.3. Конструктивні елементи різновтовщинних стикових зварних з'єднань труб і деталей трубопроводу: а) при рівних зовнішніх діаметрах і нерівних внутрішніх діаметрах; б) при нерівних зовнішніх і внутрішніх діаметрах

стикуючими елементами перехідників заводського виготовлення або вставок із труб проміжної товщини, довжина яких не менша ніж 250 мм.

У випадку проведення зварювальних робіт для труб і деталей трубопроводу діаметром 720...1420 мм застосовують багатопрохідне зварювання з обов'язковою підваркою кореня шва.

На рис. 1.4 і рис. 1.5 наведена ділянка технологічної обв'язки ГПА – 1 на КС «Тернопіль». Складовими елементами цієї ділянки є кульовий кран Ду1000 мм з поверхнями під приварку (виробництва ВАТ «Тяжпромарматура» м. Алексин, матеріал сталь 09Г2С) – 1; перехідні кільця ($\varnothing 1020$ мм x $t = 21,0$ мм, з сталі Х60) – 2, 3; трійник ($\varnothing 1020$ мм x $t = 18,00$ мм, матеріал сталь

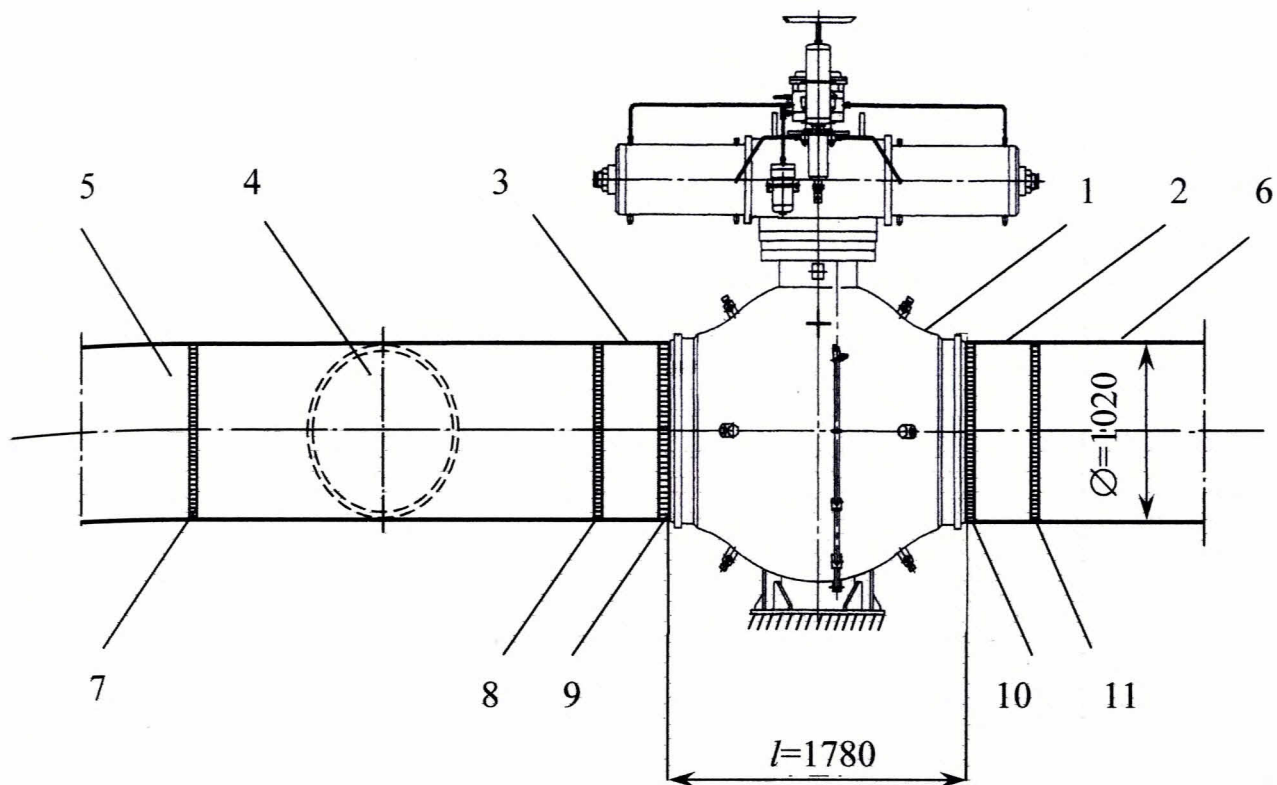


Рис. 1.4. Різновтовщинні стикові зварні шви на ділянці технологічної обв'язки компресорної станції



Рис. 1.5. Заміна кульового крана Ду1000 на ділянці технологічної обв'язки КС «Тернопіль»

15XCHD) – 4; і технологічні трубопроводи ($\varnothing 1020$ мм x $t = 16$ мм, матеріал сталь Х60) – 5, 6. Таким чином на розглянутій ділянці при заміні кульового крана необхідно виконати п'ять різнотовщинних багатошарових кільцевих зварних швів (7-11), в яких стикуючі деталі виготовлені із різних марок сталей.

1.5. Основні задачі та напрямки досліджень

Наведений вище аналіз літературних джерел показує, що розвиток існуючих та розроблення нових розрахунково-експериментальних методів визначення залишкових напружень в багатошарових кільцевих зварних з'єднаннях різнотовщинних труб і оцінка їх впливу на статичну міцність магістральних трубопроводів з тріщиноподібними дефектами в зоні зварного шва є важливим та актуальним науково-технічним завданням при діагностуванні технічного стану трубопроводів особливо за умов їх тривалої експлуатації.

В даній дисертаційній роботі були поставлені такі задачі:

- використавши апарат теорії узагальнених функцій, розвинути розрахунково-експериментальний метод відтворення рівня і розподілу залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях різнотовщинних труб без розроблення і з розробленням скосом товстішої з внутрішньої поверхні стінки труби з використанням експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами;
- побудувати розв'язки прямої задачі визначення напруженого стану зварних з'єднань різнотовщинних труб для заданої множини функцій, що описують розподіли локалізованих несумісних залишкових деформацій, і на основі числового аналізу оцінити вплив ширини зони і градієнтів вздовж за товщиною труб цих деформацій на рівень і розподіл залишкових напружень;

- створити комплекс устаткування зі зварними з'єднаннями різнотовщинних труб для експериментального визначення характеристик залишкових напружень неруйнівними методами;
- побудувати функціонал нев'язки між експериментально-визначеними і теоретично обчисленими характеристиками залишкових напружень і, використавши експериментальну інформацію, отриману за допомогою електромагнітного методу та методу спекл-інтерферометрії, мінімізацією цього функціоналу визначити довільні параметри, що характеризують залишкові деформації, і за розв'язками прямої задачі відтворити розподіл залишкових напружень в зоні зварного з'єднання;
- на основі діаграми оцінки руйнування, яка ґрунтується на двопараметричному критерії R 6, оцінити вплив залишкових напружень на коефіцієнти запасу міцності ділянки трубопроводу під внутрішнім тиском зі зварним з'єднанням з дефектом в стінці тоншої труби, який моделюється поздовжньою півеліптичною тріщиною. Двопараметричний критерій механіки руйнування R 6, який виражає умову непорушення рівноваги тріщиноподібного дефекту враховує міру наближення до крихкого руйнування в деякій точці в зоні тріщиноподібного дефекту та міру наближення до в'язкого руйнування широко застосовується для оцінки міцності зварних з'єднань.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗОНІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБ, ЗВАРЕНИХ БЕЗ СПЕЦІАЛЬНОЇ РОЗРОБКИ ТОВСТІШОЇ СТІНКИ

Залишкові напруження і деформації, зумовлені різними технічними процесами, зокрема зварюванням, впливають на працездатність конструкцій. Як рівень, так і розподіл таких напружень можуть суттєво змінювати робочі характеристики і повинні враховуватися при виготовленні та експлуатації різноманітних конструкцій та споруд. Тому важливою є проблема розробки і застосування сучасних методів і засобів визначення залишкових напружень, зокрема, при діагностуванні технічного стану споруд тривалої експлуатації. Одними з ефективних підходів до визначення залишкових напружень при діагностуванні напруженого стану споруд тривалої експлуатації є розрахунково-експериментальні методи, зокрема, метод, що ґрунтується на експериментальній інформації, отриманій неруйнівними способами, і розв'язках обернених задач теорії деформівних твердих тіл з власними напруженнями.

2.1. Розрахункова модель методу

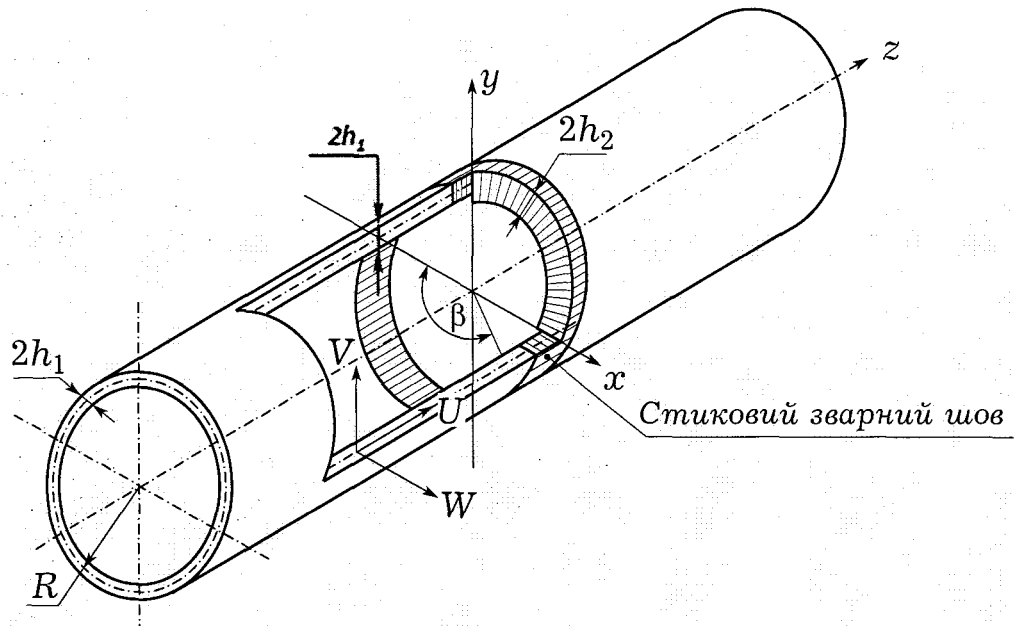
Кільцеві зварні з'єднання різновтовщинних труб займають особливе місце серед зварних з'єднань трубопроводів, оскільки вони є однією із причин високої концентрації напружень. При проведенні діагностування напруженого стану таких з'єднань в магістральних трубопроводах тривалої експлуатації найскладнішим є визначення рівня і характеру розподілу в тілі труби залишкових технологічних напружень, зумовлених зварюванням, оскільки ні розрахункові, ні існуючі неруйнівні методи контролю окремо

взяті не дозволяють розв'язати цю проблему. В даній роботі запропоновано модель розрахунково-експериментального визначення залишкових технологічних напружень в різнотовщинних зварних з'єднаннях з використанням експериментальної інформації, здобутої неруйнівними методами. Для її побудови застосовано розрахунково-експериментальний метод, що ґрунтується на розв'язанні обернених задач теорії оболонок з використанням експериментальних даних, отриманих неруйнівними методами. Кільцеві зварні з'єднання різнотовщинних труб однакових діаметрів допускається за наступних умов [12, 129] :

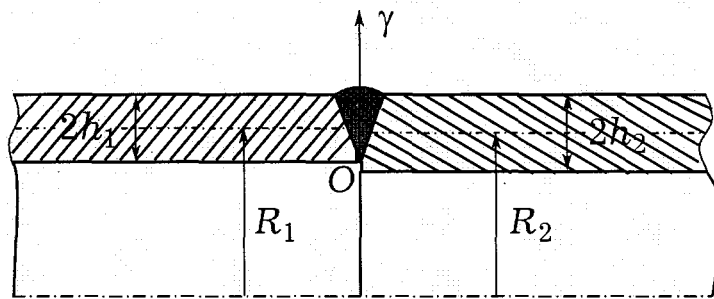
- якщо різниця товщин стінок труб (максимальна з яких 12 мм і менше) не перевищує 2,5 мм;
- якщо різниця товщин стінок (максимальна з яких більша ніж 12 мм) не перевищує 3 мм. За таких умов зварювання труб проводиться без спеціального оброблення стінок товстіших труб. За різнотовщинності стінок до 1,5 допускається зварювання труб зі спеціального оброблення товстої стінки труби. Зварні з'єднання труб з більшою різницею товщин стінок здійснюються шляхом застосування перехідників або вставок проміжкової товщини, довжина яких повинна бути не меншою ніж 250 мм.

2.1.1. Основні співвідношення і визначальні диференціальні рівняння, що описують напружено-деформований стан різнотовщинних труб, зумовлений осесиметричними залишковими деформаціями. Для побудови ключових рівнянь, що описують напружений стан кільцевого зварного з'єднання різнотовщинних труб, моделюватимемо його різнотовщинною оболонкою, складеною із двох колових циліндричних оболонок завтовшки $2h_1$ і $2h_2$ (зліва і справа від осі зварного шва, рис. 2.1). Віднесемо таку оболонку до триортогональної системи координат α, β, γ , де $\alpha = z / R_i$, z – координата вздовж осі оболонки (початок координат вибрано в площині шва), R_i ($i = 1, 2$) радіуси серединних поверхонь оболонок, β –

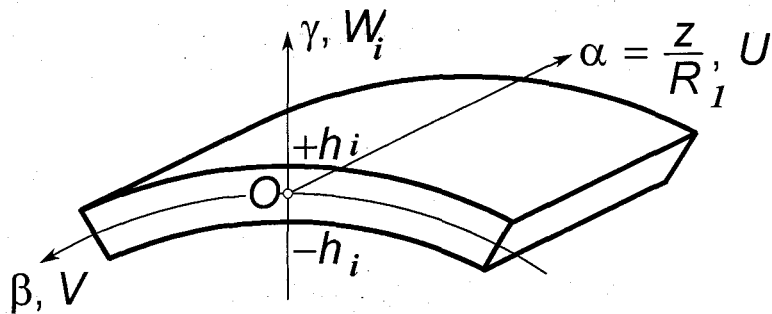
кутова координата, γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединних поверхонь труб.



a)



б)



в)

Рис. 2.1. Схема стикового зварного з'єднання різнотовщинних труб у вигляді замкнених колових циліндричних оболонок (а), осьовий переріз зварного з'єднання (б) і триортогональна система координат (в)

Компоненти тензора повної деформації $\{e_{ij}\}$ зобразимо у вигляді суми [112]:

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

де e_{ij} – компоненти тензора повної деформації; e_{ij}^0 – компоненти тензора власних несумісних залишкових деформацій, які зумовлюють виникнення в зварному з'єднанні залишкових напружень. При цьому деформації e_{ij}^0 враховують, крім пластичних, також деформації пов'язані з різного роду структурними змінами, що супроводжуються зміною об'єму матеріалу.

Введемо тепер наступні позначення: прогин серединної поверхні оболонки товщиною $2h_1$ позначимо через $W_1(\alpha)$, а прогин оболонки товщиною $2h_2$ – через $W_2(\alpha)$. Колові залишкові деформації $e_{\beta\beta}^0$ в лівій від шва труби частині оболонки позначимо через $e_{\beta\beta}^{01}$, а в правій – $e_{\beta\beta}^{02}$, відповідно осьові залишкові деформації $e_{\alpha\alpha}^0$ в лівій і правій частинах позначено через $e_{\alpha\alpha}^{01}$ і $e_{\alpha\alpha}^{02}$. За таких позначень запишемо

$$W(\alpha) = \begin{cases} W_1(\alpha), & \alpha \leq 0, \\ W_2(\alpha), & \alpha \geq 0; \end{cases} \quad (2.1)$$

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = \begin{cases} e_{\beta\beta}^{01}(\alpha, \gamma_i), & \alpha \leq 0, \\ e_{\beta\beta}^{02}(\alpha, \gamma_i), & \alpha \geq 0; \end{cases}$$

$$e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) = \begin{cases} e_{\alpha\alpha}^{01}(\alpha, \gamma_i), & \alpha \leq 0, \\ e_{\alpha\alpha}^{02}(\alpha, \gamma_i), & \alpha \geq 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Тепер ключові (визначальні) диференціальні рівняння для визначення функцій прогину $W_i(\alpha_i)$ у рамках класичних гіпотез Кірхгофа–Лява (зокрема гіпотези про ненатисканність волокон $\sigma_{\gamma\gamma} = 0$) в локальних координатах ($\alpha_i = z/R_i$) запишемо у вигляді

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha_i^4} + 4\bar{\lambda}_i^4 \right) W_i = 4\bar{\lambda}_i^4 R_i \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} - R_i^2 \frac{d^2}{d\alpha_i^2} (K_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu K_{\beta\beta}^{0i}), \quad i=1,2. \quad (2.3)$$

Тут

$$\mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} = \frac{1}{2h_i} \int_{-h_i}^{h_i} e_{\beta\beta}^{0i}(\alpha_i, \gamma) d\gamma, \\ K_{\alpha\alpha}^{0i} = \frac{3}{2h_i^3} \int_{-h_i}^{h_i} e_{\alpha\alpha}^{0i}(\alpha_i, \gamma) \gamma d\gamma, \quad K_{\beta\beta}^{0i} = \frac{3}{2h_i^3} \int_{-h_i}^{h_i} e_{\beta\beta}^{0i}(\alpha_i, \gamma) \gamma d\gamma, \quad (2.4)$$

$\bar{\lambda}_i^4 = 3R_i^2(1-\mu^2)/(4h_i^2)$; μ – коефіцієнт Пуассона.

При цьому колові зусилля N_{2i} , осьові M_{1i} , колові M_{2i} згинальні моменти та перерізуючі сили Q_{1i} визначаються за формулами:

$$N_{2i} = D_{0i} \left(\frac{W_i}{R_i} - \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} \right), \quad M_{1i} = -\frac{D_{1i}}{R_i^2} \left[\frac{d^2 W_i}{d\alpha_i^2} + R_i^2 (K_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu K_{\beta\beta}^{0i}) \right], \\ Q_{1i} = \frac{1}{R_i} \frac{dM_{1i}}{d\alpha_i}, \quad M_{2i} = -\frac{D_{1i}}{R_i^2} \left[\mu \frac{d^2 W_i}{d\alpha_i^2} + R_i^2 (K_{\beta\beta}^{0i} + \mu K_{\alpha\alpha}^{0i}) \right]; \quad (2.5)$$

де $D_{0i} = 2Eh_i$, $D_{1i} = 2Eh_i^3/[3(1-\mu^2)]$; E – модуль Юнга.

Якщо замість локальних координат $\alpha_i = z/R_i$ ввести єдину для всіх складових частин різнотовщинної оболонки $\alpha = z/R_1$, то, врахувавши, що $\alpha_i = \alpha R_1/R_i$, вирази (2.5) запишемо у вигляді

$$N_{2i} = D_{0i} \left(\frac{W_i}{R_i} - \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} \right), \quad M_{1i} = -\frac{D_{1i}}{R_1^2} \left[\frac{d^2 W_i}{d\alpha^2} + R_1^2 (K_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu K_{\beta\beta}^{0i}) \right], \\ Q_{1i} = \frac{1}{R_1} \frac{dM_{1i}}{d\alpha}, \quad M_{2i} = -\frac{D_{1i}}{R_1^2} \left[\mu \frac{d^2 W_i}{d\alpha^2} + R_1^2 (K_{\beta\beta}^{0i} + \mu K_{\alpha\alpha}^{0i}) \right]; \quad (2.6)$$

При цьому ключове рівняння (2.3) запишемо так:

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4 \right) W_i = 4\lambda_i^4 R_i \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} - R_i^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (K_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu K_{\beta\beta}^{0i}), \quad i = 1, 2. \quad (2.7)$$

де $\lambda_i^4 = 3R_1^2(1 - \mu^2)\rho_i^2 / (4h_i^2)$, $\rho_i = R_1/R_i$.

Нормальні $\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}$ та колові $\sigma_{\beta\beta}^{(i)}$ напруження обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)} &= \frac{3}{2h_i^3} M_{1i} \gamma + \frac{E}{1 - \mu^2} [\omega_{\alpha}^{0i}(\alpha, \gamma) + \mu \omega_{\beta}^{0i}(\alpha, \gamma)], \\ \sigma_{\beta\beta}^{(i)} &= \frac{1}{2h_i} \left(N_{2i} + 3M_{2i} \frac{\gamma}{h_i^2} \right) + \frac{E}{1 - \mu^2} [\omega_{\beta}^{0i}(\alpha, \gamma) + \mu \omega_{\alpha}^{0i}(\alpha, \gamma)], \end{aligned} \quad (2.8)$$

де

$$\omega_{\alpha}^{0i} = \mathbf{E}_{\alpha\alpha}^{0i} + \gamma K_{\alpha\alpha}^{0i} - e_{\alpha\alpha}^{0i}, \quad \omega_{\beta}^{0i} = \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} + \gamma K_{\beta\beta}^{0i} - e_{\beta\beta}^{0i}.$$

В праві частини диференціальних рівнянь (2.7) входять усереднені по товщинах оболонок залишкові деформації, що описуються функціями $\mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i}$, $K_{\alpha\alpha}^{0i}$, $K_{\beta\beta}^{0i}$, які визначаються в процесі розв'язку оберненої задачі за допомогою експериментальної інформації.

2.1.2. Апроксимація розподілу власних залишкових деформацій в зоні кільцевого зварного з'єднання різновисотних труб і побудова розв'язку прямої задачі. На основі аналізу даних з літературних джерел, зокрема [19, 71, 73, 74, 87], про розподіл власних пластичних деформацій в зоні зварного шва, отриманих розрахунковими і експериментальними методами, вирази (2.1) для локалізованих біля шва колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ несумісних

залишкових деформацій, що зумовлюють залишкові напруження, подано у вигляді

$$e_{\beta\beta}^{01}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{11}^* f_{11}(\gamma) \varphi_{11}(\alpha) S_{11}^0(\alpha),$$

$$e_{\beta\beta}^{02}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{12}^* f_{12}(\gamma) \varphi_{12}(\alpha) S_{12}^0(\alpha); \quad (2.9)$$

$$e_{\alpha\alpha}^{01}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{21}^* f_{21}(\gamma) \varphi_{21}(\alpha) S_{21}^0(\alpha),$$

$$e_{\alpha\alpha}^{02}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{22}^* f_{22}(\gamma) \varphi_{22}(\alpha) S_{22}^0(\alpha), \quad (2.10)$$

де

$$f_{ij}(\gamma) = 1 - m_{ij} \left(1 - \frac{\gamma}{h_i} \right)^2, \quad (2.11)$$

$$\varphi_{ij} = 1 + s_{ij} \frac{\alpha^2}{\alpha_{ij}^2} - (3 + 2s_{ij}) \frac{\alpha^4}{\alpha_{ij}^4} + (2 + s_{ij}) \frac{\alpha^6}{\alpha_{ij}^6}, \quad i, j = 1, 2, \quad (2.12)$$

$S_{ij}^0(\alpha)$ – одиничні східчасті функції: $S_{ij}^0(\alpha) = 1, |\alpha| \leq |\alpha_{ij}|$; $S_{ij}^0(\alpha) = 0, |\alpha| > |\alpha_{ij}|$ ($j = 1, \alpha \leq 0$; $j = 2, \alpha \geq 0$); $\mathbf{E}_{ij}^*, m_{ij}, s_{ij}$ – числові параметри; $\alpha_{ij} = z_{ij}/R_1$; z_{ij} – координати границь зон колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ деформацій. При цьому, позначивши $m_{11} = m_1, m_{21} = m_2$ з умови неперервності цих деформацій в перерізі $\alpha = 0$ встановлюємо наступні зв'язки між параметрами $\mathbf{E}_{ij}^*, m_{ij}$:

$$\mathbf{E}_{11}^* = \mathbf{E}_{12}^* = \mathbf{E}_1^*, \quad \mathbf{E}_{21}^* = \mathbf{E}_{22}^* = \mathbf{E}_2^*,$$

$$m_{12} = y_2^2 m_1, \quad m_{22} = y_2^2 m_2, \quad y_2 = h_2 / h_1 \quad (2.13)$$

Функції $\varphi_{ij}(\alpha)$ і їх похідні на межах зон пластичних деформацій $\alpha = \alpha_{ij}$ дорівнюють нулю. Графіки функцій φ_{ij} ,

$$\varphi_1(\alpha) = \varphi_{11}(\alpha) S_{11}^0(\alpha) + \varphi_{12}(\alpha) S_{12}^0(\alpha), \quad (2.14)$$

$$\varphi_2(\alpha) = \varphi_{21}(\alpha) S_{21}^0(\alpha) + \varphi_{22}(\alpha) S_{22}^0(\alpha), \quad (2.15)$$

для деяких значень параметрів зображені на рис. 2.2–2.4.

Якщо підставити тепер (2.9), (2.10) в (2.4) і врахувати, що

$$\frac{1}{2h_i} \int_{-h_i}^{h_i} f_{ij}(\gamma) d\gamma = 1 - \frac{4}{3} m_{ij}, \quad \frac{3}{2h_i^3} \int_{-h_i}^{h_i} f_{ij}(\gamma) \gamma d\gamma = 2 \frac{m_{ij}}{h_j}, \quad (2.16)$$

то після інтегрування отримаємо

$$\mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i}(\alpha) = -\mathbf{E}_1^* \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha),$$

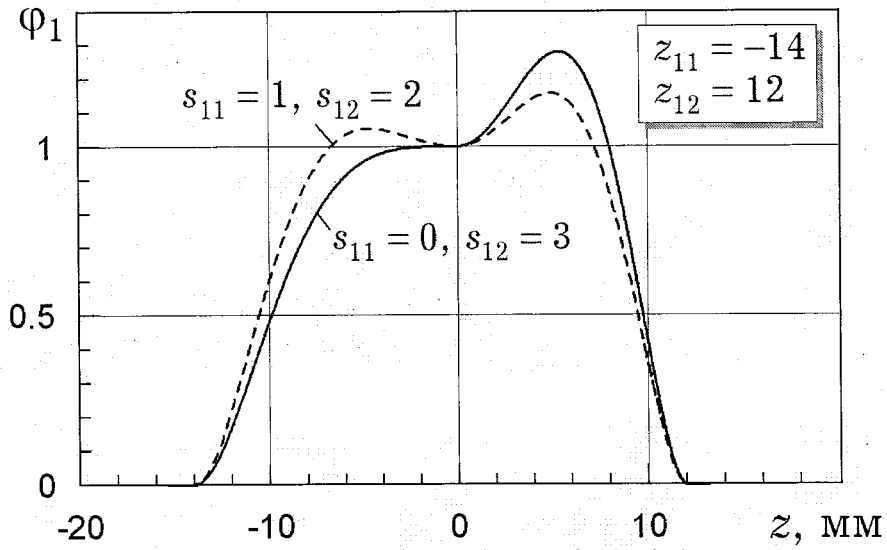
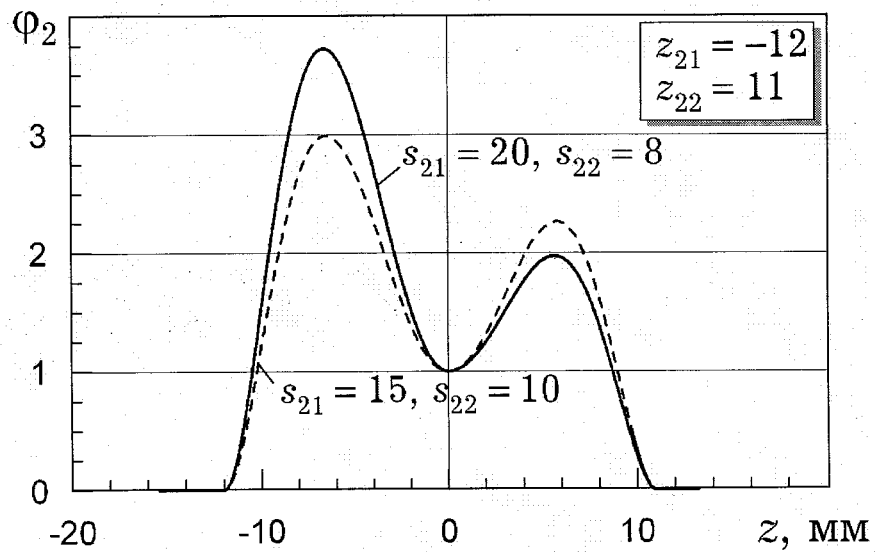
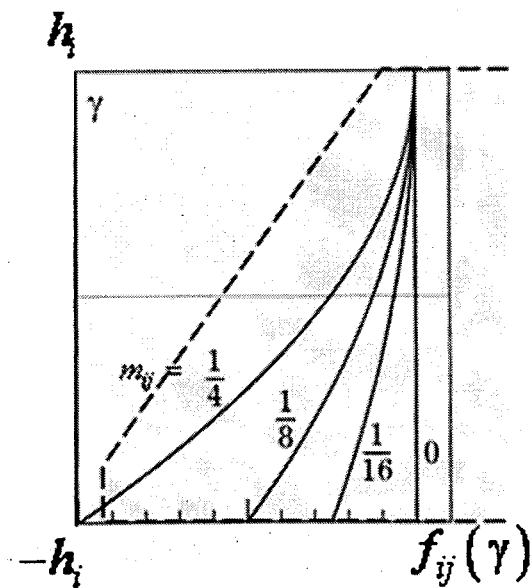
$$k_{\beta\beta}^{0i}(\alpha) = -2\mathbf{E}_1^* \frac{y_i^2}{h_i} m_1 \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha),$$

$$k_{\alpha\alpha}^{0i}(\alpha) = -2\mathbf{E}_2^* \frac{y_i^2}{h_i} m_2 \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha), \quad i = 1, 2, \quad (2.17)$$

де $y_1 = 1$.

Підставивши тепер ці інтегральні характеристики залишкових деформацій в рівняння (2.7), отримаємо визначальні диференціальні рівняння для визначення функцій $W_i(\alpha)$, які подамо у вигляді

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4 \right) W_i = -2R_i \mathbf{E}_1^* \left[2\lambda_i^4 \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) - \mu y_i^2 m_1 \frac{R_1^2}{R_i h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} \right] \times \\ \times \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + 2\mathbf{E}_2^* y_i^2 m_2 \frac{R_1^2}{h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (2.18)$$

Рис. 2.2. Графіки функції $\varphi_1(\alpha)$ Рис. 2.3. Графіки функції $\varphi_2(\alpha)$ Рис. 2.4. Графіки функції $f_{ij}(\gamma)$

Для побудови розв'язків рівнянь (2.18) використаємо фундаментальний розв'язок рівняння

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda^4\right)W^* = \delta(\alpha), \quad (2.19)$$

де $\delta(\alpha)$ – дельта-функція Дірака, який подамо у вигляді [111]

$$W^*(\alpha) = \frac{1}{8\lambda^3} e^{-\lambda|\alpha|} (\cos \lambda\alpha + \sin \lambda|\alpha|). \quad (2.20)$$

Тоді згідно з теоремою про згортку частинний розв'язок рівняння

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda^4\right)W(\alpha) = \Phi(\alpha), \quad a \leq \alpha \leq b, \quad (2.21)$$

де $\Phi(\alpha)$ – задана функція, можна подати в інтегральній формі у вигляді

$$W(\alpha) = \int_a^b \Phi(\xi) W^*(\xi - \alpha) d\xi. \quad (2.22)$$

Введемо тепер безрозмірні прогини серединної поверхні труби наступним чином

$$\bar{W}_i(\alpha) = \frac{1}{E_1^* R_1} W_i(\alpha). \quad (2.23)$$

Тоді диференціальні рівняння (2.18) для визначення безрозмірних прогинів $\bar{W}_i(\alpha)$ запишемо так:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4\right)\bar{W}_i = & -2\frac{R_i}{R_1} \left[2\lambda_i^4 \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1\right) - \mu y_i^2 m_1 \frac{R_1 \rho_i}{h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} \right] \times \\ & \times \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + 2k y_i^2 m_2 \frac{R_1}{h_i} \frac{d^2}{d\alpha^2} [\varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha)], \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (2.24)$$

де $k = E_2^*/E_1^*$.

Загальні розв'язки рівнянь (2.24) зобразимо у вигляді суми розв'язків однорідних рівнянь для $\alpha \leq 0$ ($i = 1$), $\alpha \geq 0$ ($i = 2$) і частинних розв'язків \bar{W}_{0i} цих диференціальних рівнянь, які побудуємо, застосувавши теорему про згортку. Подамо загальні розв'язки $\bar{W}_i(\alpha)$ у вигляді

$$\bar{W}_i(\alpha) = A_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + A_{2i} \omega_{2i}(\alpha) + \bar{W}_{0i}(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (2.25)$$

Тут

$$\begin{aligned} \omega_{11}(\alpha) &= e^{\lambda_1 \alpha} \cos \lambda_1 \alpha, & \omega_{21}(\alpha) &= e^{\lambda_1 \alpha} \sin \lambda_1 \alpha, \\ \omega_{12}(\alpha) &= e^{-\lambda_2 \alpha} \cos \lambda_2 \alpha, & \omega_{22}(\alpha) &= e^{-\lambda_2 \alpha} \sin \lambda_2 \alpha, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{W}_{0i}(\alpha) &= -\lambda_i \frac{R_i}{R_1} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{11}^{(i)}(\alpha) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{y_i^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left[\mu m_1 F_{21}^{(i)}(\alpha) + k m_2 F_{22}^{(i)}(\alpha) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Вирази для функцій $F_{lj}^{(i)}(\alpha)$ ($l, j = 1, 2$) запишемо так

$$F_{1j}^{(1)}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\xi) K_1^{(1)}(\xi - \alpha) d\xi, \quad F_{2j}^{(1)}(\alpha) = \int_{-\alpha_{j1}}^0 \varphi_{j1}(\xi) K_2^{(1)}(\xi - \alpha) d\xi,$$

(2.27)

$$F_{1j}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\xi) K_1^{(2)}(\xi - \alpha) d\xi, \quad F_{2j}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\xi) K_2^{(2)}(\xi - \alpha) d\xi, \quad (2.28)$$

де

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

Сталі інтегрування A_{ij} ($i, j = 1, 2$), що входять у формули (2.25), визначимо із умов ідеального механічного контакту, тобто рівності

переміщень W_i , кутів повороту θ_{1i} , моментів M_{1i} і поперечних сил Q_{1i} в перерізі $\alpha = 0$, які в рамках класичної теорії оболонок мають вигляд:

$$\begin{aligned} W_1 &= W_2, & \frac{dW_1}{d\alpha} &= \frac{dW_2}{d\alpha}, \\ M_{11} &= M_{12}, & \frac{dM_{11}}{d\alpha} &= \frac{dM_{12}}{d\alpha}, & \alpha &= 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Врахувавши вирази (2.7), (2.17), (2.23), (2.25), (2.26) на основі співвідношень (2.29) отримаємо систему чотирьох лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення сталих коефіцієнтів A_{ij} , яку запишемо так:

$$\begin{aligned} A_{11} - A_{12} &= d_0, \\ A_{11} + A_{21} + g_1(A_{11} - A_{22}) &= d_1, \\ A_{21} + g_2 A_{22} &= d_2, \\ A_{21} - A_{11} - g_3(A_{12} + A_{22}) &= d_3. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Тут

$$g_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad g_2 = y_2^2 \rho_2, \quad g_3 = g_1 g_2,$$

$$d_0 = \bar{W}_{02}(0) - \bar{W}_{01}(0),$$

$$d_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left(\frac{d\bar{W}_{02}}{d\alpha} - \frac{d\bar{W}_{01}}{d\alpha} \right) \Big|_{\alpha=0},$$

$$d_2 = \frac{1}{2\lambda_1^2} \left[y_2^3 \frac{d^2 \bar{W}_{02}}{d\alpha^2} - \frac{d^2 \bar{W}_{01}}{d\alpha^2} - \frac{2R_1}{h_1} (y_2^4 - 1)(k m_2 + \mu m_1) \right] \Big|_{\alpha=0},$$

$$d_3 = \frac{1}{2\lambda_1^3} \left(y_2^3 \frac{d^3 \bar{W}_{02}}{d\alpha^3} - \frac{d^3 \bar{W}_{01}}{d\alpha^3} \right) \Big|_{\alpha=0}. \quad (2.31)$$

Якщо продиференціювати тричі вирази для $\bar{W}_{0i}(\alpha)$ (2.26) і врахувати

що:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 K_1^{(1)}(\xi - \alpha)}{d\alpha^2} &= -2\lambda_i^2 K_2^{(1)}(\xi - \alpha), \\ \frac{d^2 K_2^{(1)}(\xi - \alpha)}{d\alpha^2} &= 2\lambda_i^2 K_1^{(1)}(\xi - \alpha) - 4\lambda_i \delta(\xi - \alpha),\end{aligned}\quad (2.32)$$

а потім похідні від $\bar{W}_{0i}(\alpha)$ при $\alpha = 0$ підставити у (2.31), то отримаємо

$$\begin{aligned}d_0 &= -\lambda_2 \frac{R_2}{R_1} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_2^2 m_1 \right) b_{11,0} + \frac{y_2^2}{\mu_0} (\mu m_1 b_{21,0} + k m_2 b_{22,0}) \right] + \\ &\quad + \lambda_1 \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) a_{11,0} + \frac{1}{\mu_0} (\mu m_1 a_{21,0} + k m_2 a_{22,0}) \right], \\ d_1 &= -\frac{\lambda_2^2 R_2}{\lambda_1 R_1} \left[\left(1 - \frac{4}{3} y_2^2 m_1 \right) b_{11,1} + 2 \frac{y_2^2}{\mu_0} (\mu m_1 b_{21,1} + k m_2 b_{22,1}) \right] + \\ &\quad + \lambda_1 \left[\left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) a_{11,1} + \frac{2}{\mu_0} (\mu m_1 a_{21,1} + k m_2 a_{22,1}) \right], \\ d_2 &= \lambda_2 y_2^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_2^2 m_1 \right) b_{21,0} - \frac{y_2^2}{\mu_0} \left[\mu m_1 \left(b_{11,0} - \frac{2}{\lambda_2} \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + k m_2 \left(b_{12,0} - \frac{2}{\lambda_2} \right) \right] \right\} - \lambda_1 \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) a_{21,0} - \frac{1}{\mu_0} \left[\mu m_1 \left(a_{11,0} - \frac{2}{\lambda_1} \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + k m_2 \left(a_{12,0} - \frac{2}{\lambda_1} \right) \right] \right\} - \frac{R_1}{\lambda_1^2 h_1} (y_2^4 - 1) (k m_2 + \mu m_1), \\ d_3 &= \lambda_2 y_2^2 \sqrt{\frac{\rho_2}{y_2}} \left[\left(1 - \frac{4}{3} y_2^2 m_1 \right) b_{21,1} - 2 \frac{y_2^2}{\mu_0} (\mu m_1 b_{11,1} + k m_2 b_{12,1}) \right] -\end{aligned}$$

$$-\lambda_1 \left[\left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) a_{21,1} - \frac{2}{\mu_0} (\mu m_1 a_{11,1} + k m_2 a_{12,1}) \right],$$

$$\mu_0 = \sqrt{3(1 - \mu^2)}. \quad (2.33)$$

Тут позначено

$$a_{j1,0} = \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{11}(\xi) K_j^{(1)}(\xi) d\xi, \quad a_{j2,0} = \int_{-\alpha_{21}}^0 \varphi_{21}(\xi) K_j^{(1)}(\xi) d\xi, \quad j=1,2;$$

$$a_{11,1} = \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{11}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \sin \lambda_1 \xi d\xi, \quad a_{12,1} = \int_{-\alpha_{21}}^0 \varphi_{21}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \sin \lambda_1 \xi d\xi,$$

$$a_{21,1} = \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{11}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \cos \lambda_1 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi,$$

$$a_{22,1} = \int_{-\alpha_{21}}^0 \varphi_{21}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \cos \lambda_1 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi,$$

$$b_{j1,0} = \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) K_j^{(2)}(\xi) d\xi, \quad b_{j2,0} = \int_0^{\alpha_{22}} \varphi_{22}(\xi) K_j^{(2)}(\xi) d\xi, \quad j=1,2;$$

$$b_{11,1} = \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \sin \lambda_2 \xi d\xi, \quad b_{12,1} = \int_0^{\alpha_{22}} \varphi_{22}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \sin \lambda_2 \xi d\xi, \quad (2.34)$$

$$b_{21,1} = \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \cos \lambda_2 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi, \quad b_{22,1} = \int_0^{\alpha_{22}} \varphi_{22}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \cos \lambda_2 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi.$$

Розв'язавши тепер систему рівнянь (2.30), знаходимо вирази для обчислення сталих інтегрування A_{ij} :

$$A_{11} = \frac{1}{g_0} \left\{ [g_2 g_3 + g_1 (g_2 + 2g_3)] d_0 + (g_2 + g_3) d_1 + (g_1 - g_3) d_2 - (g_1 + g_2) d_3 \right\},$$

$$A_{12} = \frac{1}{g_0} \left[-(g_1 + 2g_2 + g_3)d_0 + (g_2 + g_3)d_1 + (g_1 - g_3)d_2 - (g_1 + g_2)d_3 \right],$$

$$A_{21} = \frac{1}{g_0} \left\{ g_2 \left[(g_1 - g_3)d_0 + (1 + g_3)d_1 + (1 + g_1)d_3 \right] + \left[g_3 + g_1(1 + 2g_3)d_2 \right] \right\},$$

$$A_{22} = \frac{1}{g_0} \left[(g_3 - g_1)d_0 - (1 + g_3)d_1 + (2 + g_1 + g_3)d_2 - (1 + g_1)d_3 \right],$$

$$g_0 = g_3 + g_2(2 + g_3) + g_1(1 + g_2 + 2g_3). \quad (2.35)$$

Якщо у виразі для обчислення прогину $\bar{W}_i(\alpha)$ (2.25) покласти $h_1 = h_2$, то отримаємо співвідношення для обчислення прогину серединної поверхні труби постійної товщини, звареної кільцевим швом. Покажемо це, розглянувши вираз $\bar{W}_2(\alpha)$ для $\alpha > 0$. Для спрощення викладок розглянемо один із доданків, що входить у вираз для $\bar{W}_2(\alpha)$ (2.25) і введемо для нього позначення

$$\bar{W}_{21}(\alpha) = A_{12}^{(1)} \omega_{12}(\alpha) + A_{22}^{(1)} \omega_{22}(\alpha) - \frac{\lambda_2}{2} F_{11}^{(2)}(\alpha), \quad \alpha > 0. \quad (2.36)$$

У випадку, коли несумісні залишкові деформації e_{ii}^0 ($i = \alpha, \beta$) симетричні відносно перерізу $\alpha = 0$ функція $\bar{W}_{21}(\alpha)$ повинна задовольняти умови симетрії відносно цього перерізу, тобто:

$$\frac{d\bar{W}_{21}(\alpha)}{d\alpha} = 0, \quad \frac{d^3\bar{W}_{21}(\alpha)}{d\alpha^3} = 0, \quad \alpha = 0. \quad (2.37)$$

Підставивши (2.36) в (2.37), отримуємо систему двох алгебраїчних рівнянь для визначення сталих $A_{12}^{(1)}$, $A_{22}^{(1)}$:

$$A_{12}^{(1)} - A_{22}^{(1)} = -\lambda_2 \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \sin \lambda_2 \xi d\xi,$$

$$A_{12}^{(1)} + A_{22}^{(1)} = -\lambda_2 \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} \cos \lambda_2 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi. \quad (2.38)$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, знаходимо

$$A_{12}^{(1)} = -\frac{\lambda_2}{2} \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} (\cos \lambda_2 \xi \operatorname{sgn} \xi + \sin \lambda_2 \xi) d\xi,$$

$$A_{22}^{(1)} = -\frac{\lambda_2}{2} \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi|} (\cos \lambda_2 \xi \operatorname{sgn} \xi - \sin \lambda_2 \xi) d\xi. \quad (2.39)$$

Тепер вираз (2.36) запишемо так:

$$\bar{W}_{21}(\alpha) = -\frac{\lambda_2}{2} \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2(\xi+\alpha)} [\cos \lambda_2 \xi \cos \lambda_2 \alpha + \sin \lambda_2 \xi \cos \lambda_2 \alpha +$$

$$+ \cos \lambda_2 \xi \sin \lambda_2 \alpha - \sin \lambda_2 \xi \sin \lambda_2 \alpha] d\xi - \frac{\lambda_2}{2} F_{11}^{(2)}(\alpha). \quad (2.40)$$

Враховавши співвідношення (2.27), отримаємо

$$\bar{W}_{21}(\alpha) = -\frac{\lambda_2}{2} \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2(\xi+\alpha)} [\cos \lambda_2(\xi + \alpha) + \sin \lambda_2(\xi + \alpha)] d\xi +$$

$$-\frac{\lambda_2}{2} \int_0^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi-\alpha|} [\cos \lambda_2(\xi - \alpha) + \sin \lambda_2|\xi - \alpha|] d\xi, \quad \alpha > 0. \quad (2.41)$$

Цей вираз можна записати так:

$$\bar{W}_{21}(\alpha) = -\frac{\lambda_2}{2} \int_{-\alpha_{12}}^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi-\alpha|} [\cos \lambda_2(\xi - \alpha) + \sin \lambda_2|\xi - \alpha|] d\xi, \quad (2.42)$$

$\alpha > 0$.

Якщо аналогічні перетворення провести для складових виразів (2.25), (2.26), в які входять $F_{21}^{(2)}(\alpha)$ і $F_{22}^{(2)}(\alpha)$, то формулу для визначення прогину

$\bar{W}_2(\alpha)$ для зварених кільцевим швом труб однакової товщини можна записати у вигляді

$$\bar{W}_2(\alpha) = -\lambda \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} m_1 \right) F_{11}(\alpha) + \frac{1}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} [\mu m_1 F_{21}(\alpha) + k m_2 F_{22}(\alpha)] \right\}, \quad (2.43)$$

де

$$F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\xi) e^{-\lambda|\xi-\alpha|} [\cos \lambda(\xi - \alpha) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\xi - \alpha|] d\xi,$$

$$\lambda = \lambda_2, \quad \varphi_j = \varphi_{j1} = \varphi_{j2}, \quad \alpha_j = \alpha_{j1} = \alpha_{j2}, \quad i, j = 1, 2.$$

Таким чином, якщо у виразах (2.25) значення параметрів, що описують напружений стан зварного з'єднання різнотовщинних труб замінити на відповідні параметри, що описують напружений стан кільцевого зварного з'єднання труб однакової товщини, отримаємо вираз для визначення прогину серединної поверхні таких труб, наведений, зокрема, в роботах [41, 99].

Підставивши співвідношення (2.9) – (2.12), (2.17), (2.25), (2.26) у формули (2.6), (2.8) і провівши відповідні перетворення, отримаємо вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових (кільцевих) $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в довільній точці труби в зоні зварного з'єднання, які запишемо так:

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = E E_1^* \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i), \quad \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = E E_1^* \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i), \quad i = 1, 2,$$

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

$$+ \frac{y_i^2}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma_i^2}{h_i^2} \right) \left[\mu m_1 \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + k m_2 \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha) \right],$$

$$\sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) = \frac{R_1}{R_i} \bar{W}_i(\alpha) + \mu \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma_i) + \left[1 - y_i^2 m_1 \left(1 - \frac{\gamma_i}{h_i} \right)^2 \right] \varphi_{1i}(\alpha) S_{1j}^0(\alpha), \quad (2.44)$$

де

$$\Omega_1(\alpha) = -A_{11}\omega_{21}(\alpha) + A_{21}\omega_{11}(\alpha), \quad \Omega_2(\alpha) = A_{12}\omega_{22}(\alpha) - A_{22}\omega_{12}(\alpha). \quad (2.45)$$

У формули (2.44) для обчислення залишкових напружень входять довільні параметри E_1^* , k , α_{ij} , s_{ij} , m_i . Для їх визначення у випадку конкретного кільцевого зварного з'єднання різнотовщинних труб використовують експериментальну інформацію, яку можна отримати за допомогою неруйнівних методів, і розв'язують обернену задачу теорії оболонок з власними напруженнями.

2.1.3. Обернена задача теорії різнотовщинних оболонок з залишковими технологічними деформаціями і напруженнями. При розв'язуванні обернених задач взагалі і обернених задач теорії оболонок з залишковими технологічними деформаціями зокрема визначаються причинні характеристики за результатами посередніх проявів. Таким чином в них порушується причинно-наслідковий зв'язок, що зумовлює такі задачі некоректно поставленими. На протязі значного періоду вважалось, що обернені задачі не мають розв'язку. Тільки після введення А.Н. Тихоновим поняття умовної коректності, а також відомих інших авторів, появилась можливість розв'язування таких задач. Достатньо повний огляд робіт, присвячених побудові розв'язків обернених задач і аналізу методів, які при цьому використовуються наведено в двотомній монографії [79].

Для дослідження обернених задач зручно використовувати, як зазначено зокрема в [18, 138], математичну модель у вигляді операторного рівняння першого роду

$$Au = f, \quad u \in U, \quad f \in F. \quad (2.46)$$

де через u і f позначають відповідно шукані і спостережувані характеристики моделі, які належать до певних матричних просторів U і F . Оператор A діє із U в F , формалізуючи сукупність операцій, які визначаються вихідною математичною моделлю і умовами однозначності, та встановлює причинно-наслідкові зв'язки між шуканими величинами і вимірюваними параметрами.

В застосуванні до обернених задач теорії оболонок з залишковими напруженнями величина U може бути вектором, наприклад, вектор довільних числових параметрів \mathbf{E}_{ij}^* , m_{ij} , s_{ij} , α_{ij} , що описують локальні поля залишкових несумісних деформацій $e_{\beta\beta}^0$, $e_{\alpha\alpha}^0$ (2.2), (2.9)–(2.12). В якості f може бути вектор характеристик напруженого стану в зоні зварного з'єднання, які можна обчислити на основі експериментальної інформації, отриманої неруйнівними методами.

Обернена задача теорії оболонок, як і довільна інша математична задача може бути успішно розв'язана, якщо вона коректно поставлена. Задача побудови розв'язку рівняння (2.46) називається коректно поставлена за Адамаром, якщо задовольняються вимоги (умови):

- 1) для довільного елемента $f \in F$ існує розв'язок u з простору U (умова існування розв'язку);
- 2) розв'язок визначається однозначно (умова єдиності розв'язку);
- 3) розв'язок u неперервно залежить від f (умова стійкості розв'язку).

Остання умова означає, що малі зміни f зумовлюють малі зміни u . Якщо хоча б одна із цих трьох умов не виконується, задача вважається некоректно поставленою.

Ж. Адамар вважав, що задачі, в яких порушуються умови коректності не мають фізичного змісту. Пізніше виянилось, що багато прикладних задач, в тому числі і обернені задачі, що є некоректно поставленими за Адамаром, мають реальний фізичний смисл і вимагають розв'язку теорії цих задач і

методів їх розв'язання.

Обернені задачі теорії оболонок (ОЗТО) з залишковими напруженнями також відносяться до некоректно поставлених задач. Ця некоректність зазвичай полягає в порушенні третьої умови коректності, тобто в тім, що малим похибкам експериментально визначених величин f можуть відповідати як завгодно великі збурення розв'язку u . Це зумовлено специфікою ОЗТО, в яких порушуються причинно-наслідкові зв'язки (залишкові напруження в зварних з'єднаннях є наслідком, викликаним дією несумісних залишкових деформацій, які є причинними характеристиками, а розв'язок ОЗТО вимагає визначення цих характеристик за їх наслідком).

Не дивлячись на те, що ОЗТО властиві ознаки некоректності, вони успішно розв'язуються методами, розробленими для розв'язування некоректно поставлених задач. Це стає можливим завдяки введенню додаткових обґрунтованих на фізичних міркуваннях обмежень на вихідну постановку задачі.

Такий аналіз привів до введення умов коректності, зокрема, в роботах А.Н. Тихонова [138], виконання яких дозволяє звести некоректно поставлену задачу до коректної.

Задача (2.46) називається умовно коректною за Тихоновим, якщо:

- 1) апіорі відомо, що розв'язок рівняння (2.46) існує і належить множині допустимих розв'язків L із області визначення оператора A ;
- 2) розв'язок єдиний на множині L ;
- 3) безмежно малим варіаціям f , які не виводять розв'язок u із класу L , відповідають безмежно малі варіації u .

Таким чином, за виконання певних умов, що накладаються на розв'язок, задача, некоректна за Адамаром, може бути коректною за Тихоновим. Множина L , на якій некоректна задача стає коректно поставленою, називається множиною (або класом) коректності. При цьому легко зауважити, що умови коректності за Адамаром і за Тихоновим

співпадають, якщо $U = L$, тобто коректність за Тихоновим досягається звуженням множини U до класу коректності.

Одним із способів досягнення коректної постановки задачі за Тихоновим є звуження множини її розв'язків до компактної множини, тобто до такої множини, в якій існує послідовність елементів, що збігаються до елемента цієї множини. Вибір такої множини здійснюється в кожній конкретній задачі, виходячи з фізичних міркувань.

Відзначимо також, що введення обмежень на область шуканих величин, тобто зведення некоректно поставлених задач до умовно-коректних, – не є єдиним шляхом одержання стійких розв'язків ОЗТО. При практичних дослідженнях в літературі найбільше розповсюдження отримали методи, що ґрунтуються на регуляризації розв'язку суттєво некоректних задач у вихідній постановці, без апріорного вибору класу коректності. Частина з них базується на використанні методу регуляризації Тихонова, який передбачає побудову регуляризуючого алгоритму і одержання на його основі стійких розв'язків некоректно поставлених задач.

Такий підхід є найбільш універсальним і його використовують тоді, коли побудувати стійкі розв'язки обернених задач не вдається простими методами – методами природньої регуляризації [18, 79]. Останні також відносяться до методів регуляризації, які не передбачають зміни вихідної постановки обернених задач. В них найчастіше обмеження накладаються на степінь апроксимуючого полінома (степенева регуляризація), число ітерацій (ітераційна регуляризація тощо). Регулярність тут визначається без зміни постановки задачі урахуванням природних особливостей фізичного процесу. З іншого боку, всі такі регуляризації фактично обмежують точність отриманих розв'язків і в літературі їх об'єднують терміном «точнісна регуляризація» (або «регуляризація загрубленням»).

В даній роботі для розрахунково-експериментального визначення залишкових технологічних напружень використано методичний підхід,

характерний для методів розв'язування обернених задач в екстремальній постановці, який передбачає мінімізацію функціоналу, що описує міру відповідності розрахованих характеристик залишкових напружень експериментальним даним. При цьому шукані поля локалізованих в зоні шва несумісних залишкових деформацій, зазвичай, зображаються многочленами з певними властивостями.

Побудова функціоналу для обчислення невідомих параметрів задачі визначення залишкових напружень в різнотовщинних трубних з'єднаннях.

Для побудови розв'язку прямої задачі різнотовщинних оболонок з залишковими технологічними напруженнями і деформаціями множина функцій, що описує локалізований розподіл залишкових колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ деформацій апроксимована поліноміальними функціями (2.9)–(2.12). Функції $\varphi_{ij}(\alpha)$ – це поліноми шостого порядку по α , які разом з першими похідними обертаються в нуль на межі зони локалізації, а $f_{ij}(\gamma)$ – поліноми другого порядку по γ . За такої апроксимації множина функцій (2.9) є скінченновимірною. Крім того, пластичні деформації e_{ii}^0 ($i = \alpha, \beta$) є обмеженими, з чого випливає, що числові параметри, які входять у вирази для даних деформацій, обмежені деяким числом C . Таким чином, задана множина функцій, яка апроксимує локальний розподіл несумісних залишкових деформацій e_{ii}^0 біля зварного шва, є скінченновимірною і обмеженою, а отже і компактною множиною, на якій розв'язок задачі буде стійким [138].

У вирази (2.9) – (2.12) входять довільні числові параметри E_{ij}^* , m_{ij} , s_{ij} , α_{ij} , які потрібно визначати у кожному випадку дослідження конкретного зварного з'єднання. Для відшукування цих параметрів використовують інформацію, яку можна одержати за допомогою одного із експериментальних методів або їх синтезу. За допомогою експериментальних

методів визначають певні характеристики напруженого стану, які позначимо через $I_m^E(\sigma_{ij})$. Використавши формули для обчислення напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб (2.44), (2.45), будемо аналогічні характеристики, отримані розрахунковим способом, які позначимо через $I_m^T(\sigma_{ij})$. На цій основі будемо функціонал нев'язки між експериментальними I_m^E і розрахунковими I_m^T значеннями характеристик залишкових напружень у вигляді

$$g(\mathbf{E}_{ij}^*, m_{ij}, s_{ij}, \alpha_{ij}) = \sum_{c=1}^{c_1} \sum_{n=1}^{n_1} \rho_{cn} \left[I_c^T(\Omega_n; \mathbf{E}_i^*, k, \alpha_i, m_i, s_i) - I_c^E(\Omega_n) \right]^2, \quad (2.47)$$

де c_1 – число, що відповідає кількості експериментальних способів, які використані для проведення вимірювань; n_1 – кількість підобластей L_n , в яких вимірюються характеристики напруженого стану; ρ_{cn} – вагові множники.

Зауважимо, що функціонал (2.47), який є мірою відповідності розрахункових характеристик залишкових напружень експериментальним даним, може бути вибраний і в іншій формі.

2.2. Особливості, характерні для деяких неруйнівних методів, що застосовуються для визначення напруженого стану

В експлуатаційних умовах для оцінки напруженого стану трубопроводів найчастіше застосовують електромагнітний і ультразвуковий методи [152]. При цьому потрібно враховувати особливості як самих фізичних співвідношень, на яких ґрунтуються дані методи та і приладів, що використовуються для вимірювань, зокрема:

- методи дають первинну інформацію не про окремі компоненти напруженого стану, а про усереднені характеристики різниці головних

напружень. За вимірами електромагнітним методом визначають усереднену в приповерхневому шарі різницю головних напружень σ_+^E , а ультразвуковим – різницю головних напружень σ_0^E в об'ємі по всій товщині труби під поверхню її контакту з п'єзоелектричним перетворювачем;

- давачі приладів, що використовуються на теперішній час, не забезпечують достатню локальність при проведенні вимірювань в зонах неоднорідного напруженого стану;
- на результати вимірювань впливає зміна структурно-фазового складу матеріалу в зоні термічного впливу зварного з'єднання.

Перспективним методом оцінки напружень у зварних з'єднаннях є розроблений в останні роки в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України метод голографічної спекл-інтерферометрії, який можна віднести до частково неруйнівних. Цим методом застосувавши для вимірювань малогабаритний спекл-інтерферометр «ЕСІ-ОН 1001», вимірюють головні залишкові напруження $\sigma_{\alpha\alpha}^E$, $\sigma_{\beta\beta}^E$ на поверхні зварного з'єднання [81].

При визначенні параметрів напруженого стану електромагнітним методом в приповерхневому шарі труби широко застосовують прилад «MESTR-411» [105, 145] з первинним електромагнітним перетворювачем трансформаторного типу, первинна обмотка якого є обмоткою намагнічування, а вторинна – індикаторною обмоткою. Обидві обмотки містяться на П-подібних сердечниках, розташованих під кутом 90° один від другого.

Якщо зону поверхні труби, в якій первинний перетворювач фіксує зміну магнітних характеристик, викликану наявністю напружень в приповерхневому шарі металу труби, апроксимувати кругом радіуса r_* , то, використавши формули (2.25), (2.26), (2.33)–(2.35), (2.44), (2.45), для

обчислення усередненої по цій зоні різниці головних напружень σ_T^+ (аналогічній величині σ_+^E) отримаємо вираз

$$\sigma_+^{(i)T}(\alpha_n; \mathbf{E}_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}) = E \mathbf{E}_1^* J_+^{(i)T}(\alpha_n; k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}), \quad (2.48)$$

де

$$J_+^{(i)T} = \frac{2}{\pi r_0^2} \int_{\alpha_n - r_0}^{\alpha_n + r_0} [\sigma_{\beta\beta}^+(\alpha, h) - \sigma_{\alpha\alpha}^+(\alpha, h)] \sqrt{r_0^2 - (\alpha - \alpha_n)^2} d\alpha, \quad (2.49)$$

$\sigma_{jj}^{(i)+}(\alpha, h) = \sigma_{jj}^{(i)}(\alpha, h) \Big|_{\gamma=h}$; $j = \alpha, \beta$; $r_0 = r^*/R_1$; α_n – координати центрів круга вздовж труби під час вимірювань.

Аналогічний вираз для усередненої по об'єму труби під поверхнею контакту п'єзоелектричного перетворювача квадратної форми різниці головних напружень σ_0^T подамо так:

$$\sigma_0^{(i)T}(\alpha_n; \mathbf{E}_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}) = E \mathbf{E}_1^* J_0^{(i)T}(\alpha_n; k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}), \quad (2.50)$$

де

$$J_0^{(i)T} = \frac{2}{\pi r_1^2} \int_{\alpha_m - l}^{\alpha_m + l} \left[\bar{W}_i(\alpha) + \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1\right) \Phi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) \right] d\alpha,$$

$r_1 = l/R_1$; $2l$ – довжина сторін квадрата п'єзоперетворювача; α_m – координати його центрів під час вимірювань.

Тепер функціонал (2.47), для визначення параметрів $\mathbf{E}_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}$ виберемо у вигляді

$$g(\mathbf{E}_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}) = \sum_{n=1}^{m_1} p_n \left[E \mathbf{E}_1^* I_+^{(i)T}(\alpha_n) - \sigma_+^E(\alpha_n) \right]^2 + \\ + \sum_{m=1}^{l_1} q_m \left[E \mathbf{E}_1^* I_0^{(i)T}(\alpha_m) - \sigma_0^E(\alpha_m) \right]^2 +$$

$$+ \sum_{v=1}^{v_1} \rho_v \left\{ \left[E E_1^* \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\alpha\alpha}^E(\alpha_v) \right]^2 + \left[E E_1^* \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha_v) - \sigma_{\beta\beta}^E(\alpha_v) \right]^2 \right\}, \quad (2.51)$$

де n_1, l_1, v_1 – кількість перерізів труби, в яких вимірюють; ρ_n, ρ_m, ρ_v – вагові множники.

Мінімізуючи функціонал (2.51), знаходимо такі значення параметрів $E_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}$, за яких нев'язка між експериментальними і теоретично розрахованими характеристиками напруженого стану буде мінімальна. Знайшовши невідомі параметри, які характеризують несумісні залишкові деформації в конкретному кільцевому зварному з'єднанні різнотовщинних труб, за формулами (2.44), (2.45) обчислюємо залишкові напруження в довільній точці даного зварного з'єднання, зокрема ті, які не можна отримати експериментально. Отримані таким способом компоненти тензора залишкових напружень задовольняють рівняння рівноваги, сумісні деформації і крайові умови, а вірогідність їх рівня і розподілу залежить від обсягу і величини похибок експериментальних даних.

2.3. Оцінка впливу ширини зони локалізації несумісних залишкових деформацій і їх градієнтів по довжині і товщині труб на рівень і розподіл залишкових напружень

Для побудови розв'язків обернених задач теорії різнотовщинних оболонок з залишковими напруженнями, зумовленими зварюванням, важливо оцінити вплив рівнів параметрів $E_1^*, k, m_i, s_{ij}, \alpha_{ij}$, на розподіл залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0, e_{\alpha\alpha}^0$ і напружень. Це дозволяє обґрунтувати межі їх зміни, в яких дані параметри можуть суттєво вплинути на розподіл залишкових деформацій, що в свою чергу вплине на рівень і розподіл залишкових напружень. Така інформація є апріорною і важливою

при відтворенні напруженого стану в зонах зварних з'єднань на основі експериментальних даних, отриманих неруйнівними методами.

Для труб діаметром 1020 мм і товщиною $2h_1 = 12\text{мм}$, $2h_2 = 14\text{мм}$, зварених багат шаровим кільцевим швом, для заданих залишкових деформацій $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ обчислено залишкові напруження в зоні зварного з'єднання. Матеріал труб – сталь 17Г1С ($E = 2 \cdot 10^5 \text{МПа}$, $\mu = 0.3$). Розрахунки проведені для значень параметрів $E_1^* = 8 \cdot 10^{-4}$ і параметрів z_{ij} та s_{ij} ($i, j = 1, 2$), які наведені на рис. 2.5–2.15.

2.3.1. Вплив ширини зони несумісних деформацій на рівень максимальних напружень біля зварного шва різнотовщинних труб. На рис. 2.5 графічно зображено результати числового аналізу впливу ширини зон колових $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і осьових $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ залишкових термопластичних деформацій, розподіли яких вздовж труб графічно зображено суцільними кривими відповідно на рис. 2.2, 2.3, на розподіл і рівень колових залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}$.

Аналіз наведених графіків дозволяє зробити висновок, що зміна ширини зони термопластичних деформацій в даному випадку неістотно впливає на характер розподілу і рівень колових залишкових напружень на поверхнях труб.

Результати числового аналізу впливу ширин зон колових $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і осьових $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ залишкових деформацій, розподіли яких зображено суцільними кривими на рис. 2.2, 2.3, на рівень і розподіл осьових залишкових напружень $\sigma_{\alpha\alpha}$ графічно зображено на рис. 2.6.

Як видно з графіків зміна ширин зон за даного розподілу залишкових технологічних деформацій незначно змінює розподіли і рівні осьових залишкових деформацій на поверхнях труб.

На основі наведених на рис. 2.7, 2.8 графіків можна зробити висновок, що зміна градієнту розподілу залишкових термодинамічних деформацій вздовж труб в межах, що характеризуються пунктирними кривими на рис.

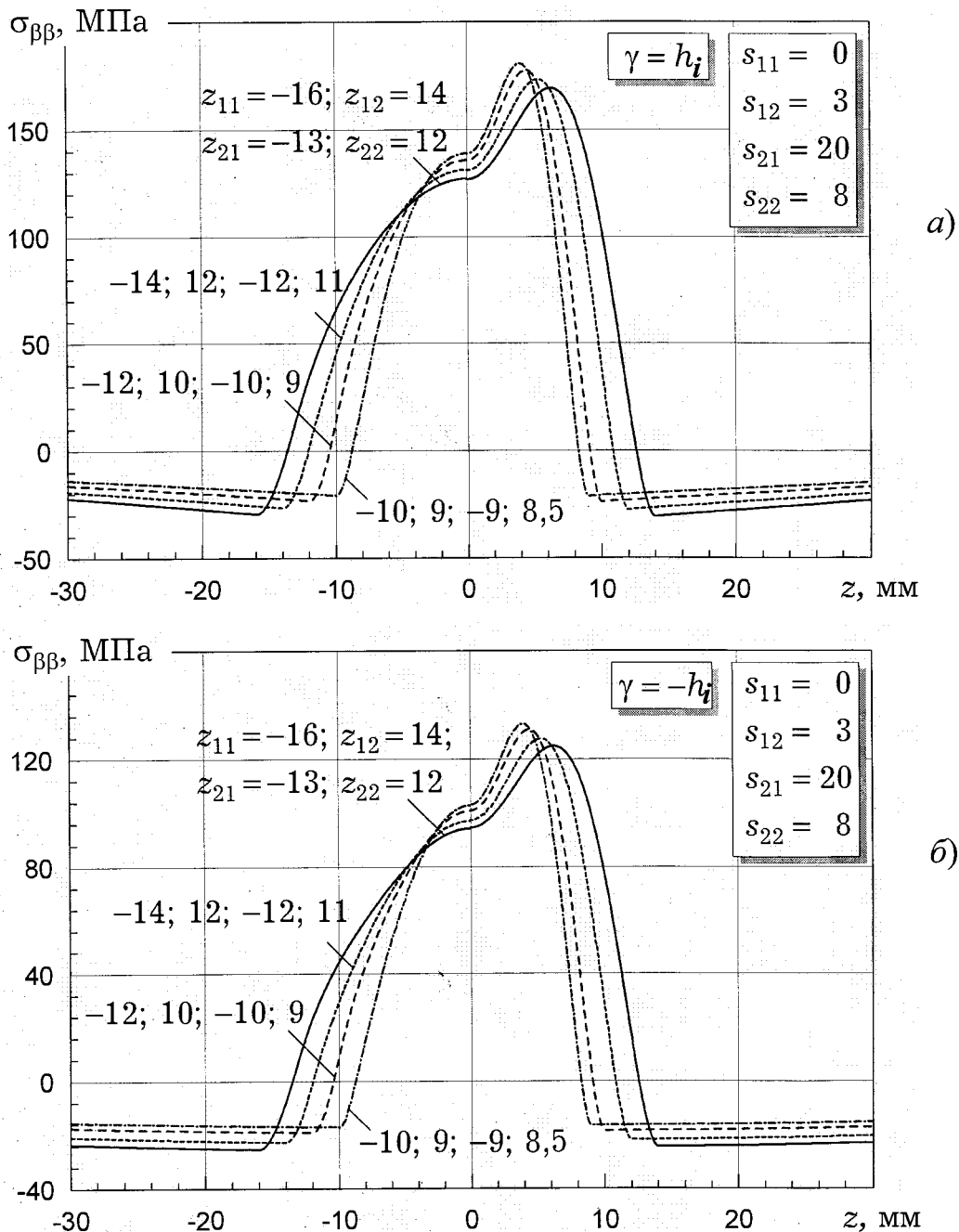


Рис. 2.5. Вплив ширини зон термопластичних деформацій (параметрів z_{ij}), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , на рівень і розподіл колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

2.2, 2.3, по суті не впливають на результати аналізу, зроблені на основі графіків відносно розподілу і рівня колових залишкових напружень, зображених на рис. 2.5.

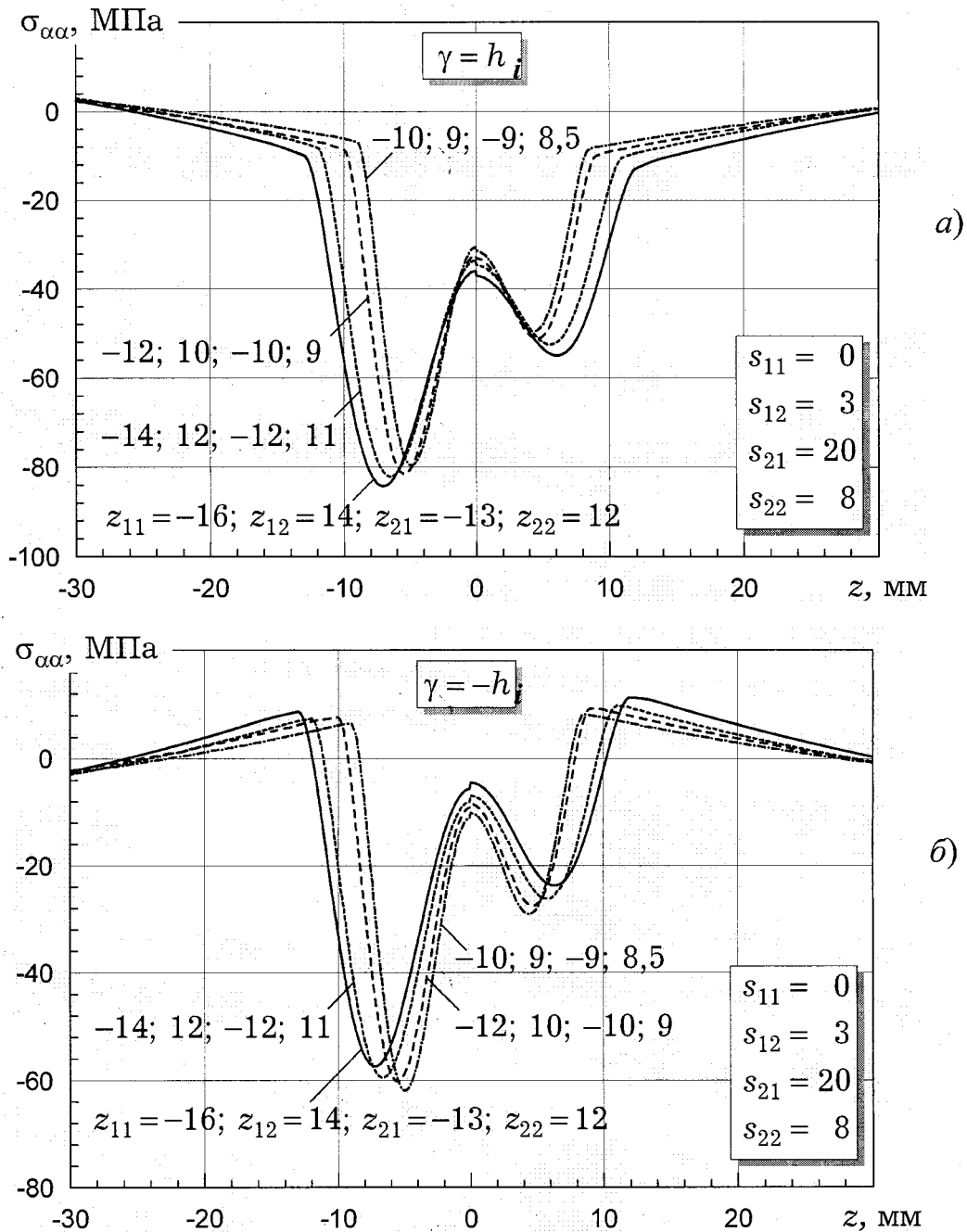
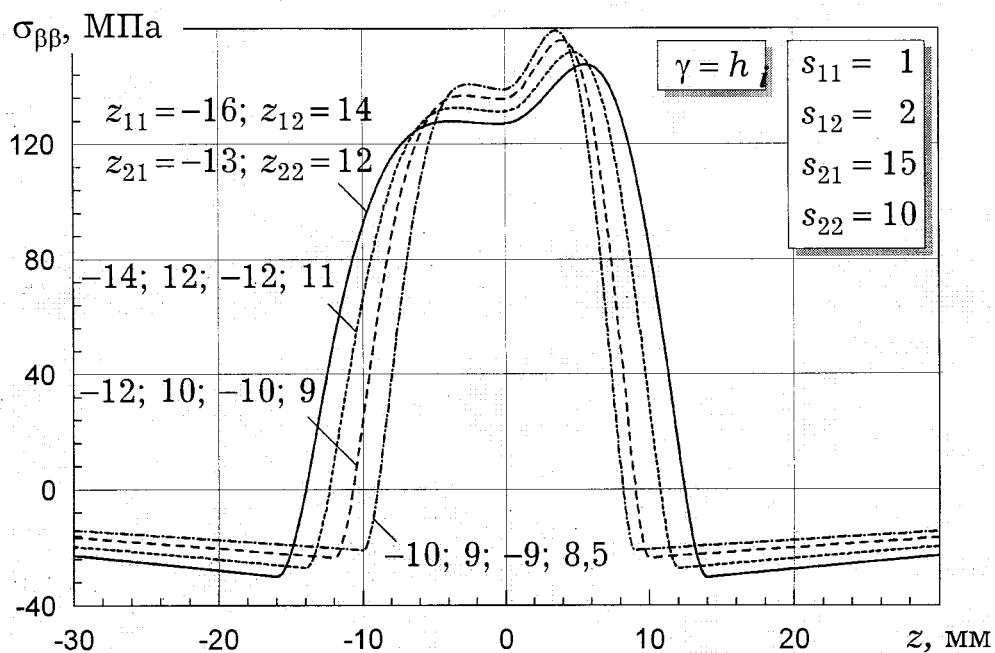
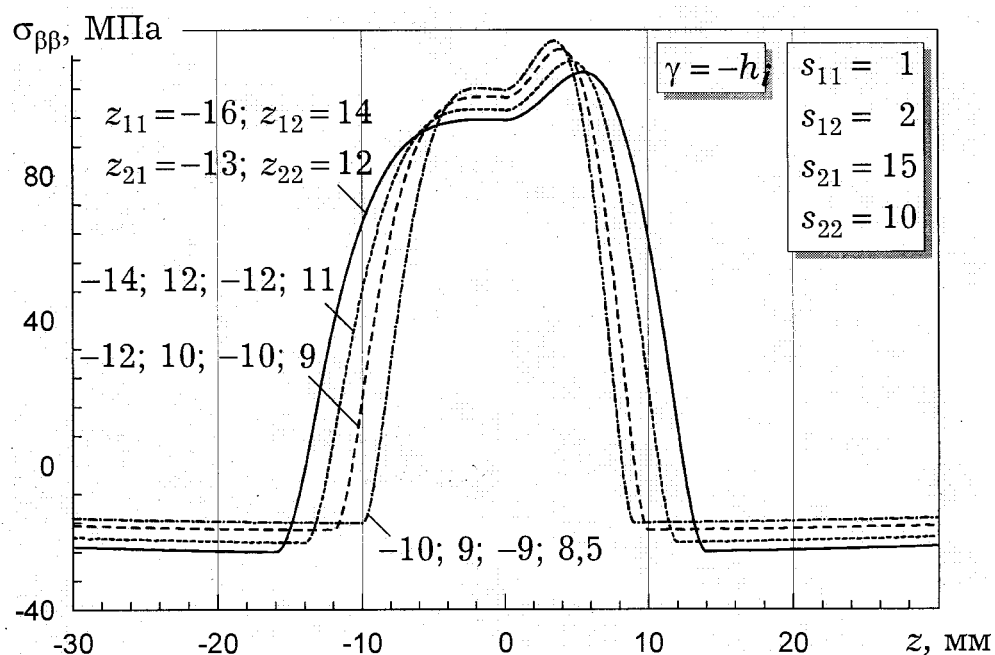


Рис. 2.6. Вплив ширини зон термопластичних деформацій (зміна параметрів z_{ij}), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , на рівень і розподіл осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)



a)



б)

Рис. 2.7. Вплив ширини зон термопластичних деформацій (зміна параметрів z_{ij}), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , на рівень і розподіл колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

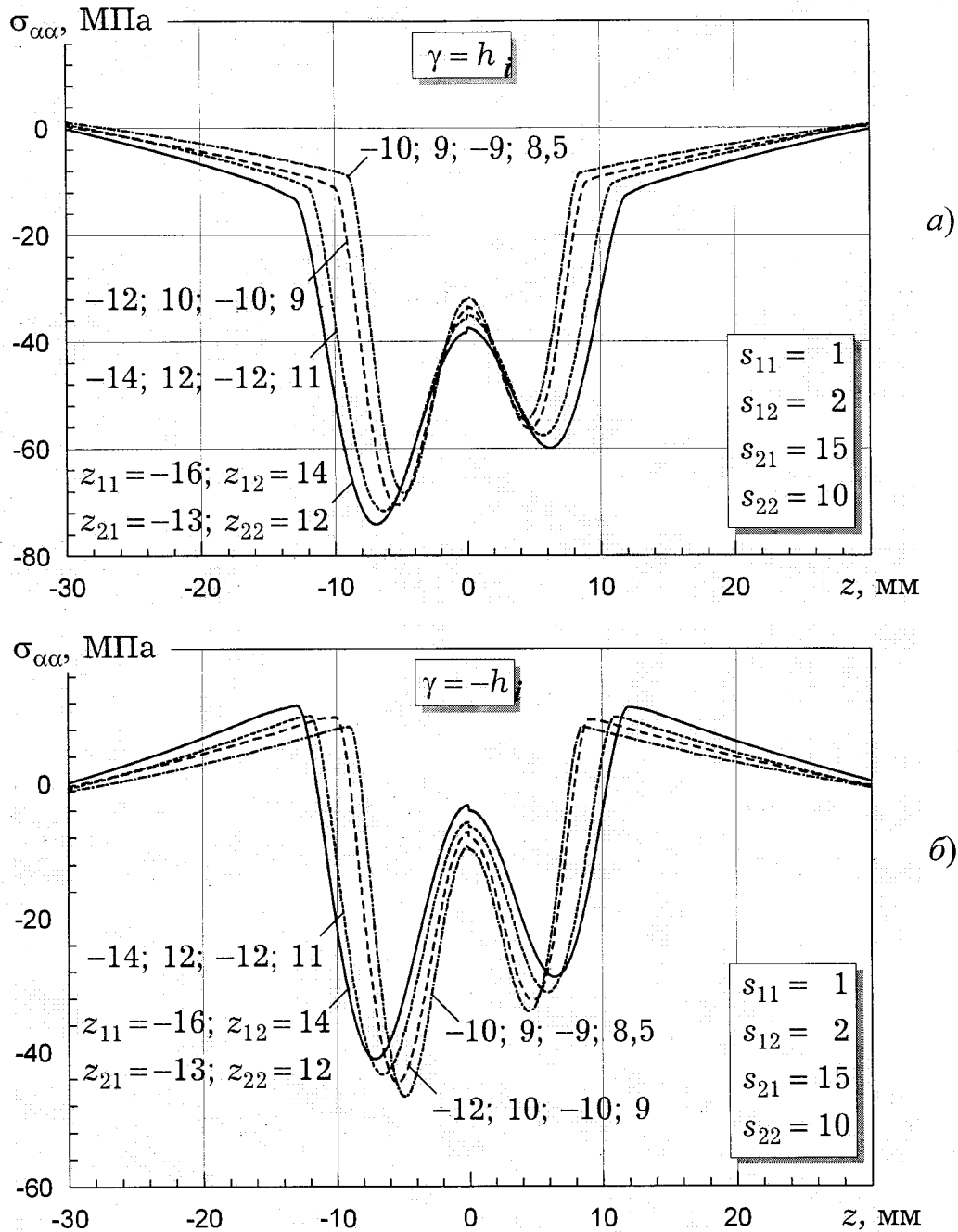


Рис. 2.8. Вплив ширини зон термопластичних деформацій (зміна параметрів z_{ij}), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , на рівень і розподіл осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

Як видно із графіків, зображених на рис. 2.8, зміна градієнту розподілу залишкових термопластичних деформацій вздовж труб в межах, що

відповідають пунктирним кривим на рис. 2.2, 2.3, неістотно змінює розподіл і дещо знижує рівень осьових залишкових напружень, в порівнянні з графіками, наведеними на рис. 2.6.

2.3.2. Розподіл залишкових напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб при різних градієнтах залишкових деформацій вздовж труб за їх товщиною. Аналіз впливу збільшення градієнтів термопластичних деформацій вздовж труб (зміна параметрів s_{ij} , див. рис. 2.9) при фіксованих ширинах зон їх локалізації (параметри z_{ij}) показує, що зі зростанням градієнтів в широких межах може значно вплинути на рівень колових залишкових напружень на поверхнях труб.

На основі графіків, наведених на рис. 2.10, можна зробити висновок, що зростання градієнтів залишкових пластичних деформацій вздовж труб (зміна параметрів s_{ij}) може суттєво вплинути на рівень осьових залишкових напружень.

Наведені на рис. 2.11 графіки показують, що зростання перепаду термопластичних деформацій по товщині труб (збільшення параметрів m_i) в розглянутих межах мало впливає на рівень і розподіл колових залишкових напружень на поверхнях труб.

Результати аналізу графічного матеріалу по дослідженню впливу зміни градієнтів термопластичних залишкових деформацій по товщині труби на розподіл залишкових осьових напружень, наведеного на рис. 2.12, дозволяють зробити висновок, що зростання градієнту термопластичних залишкових деформацій (збільшення параметрів m_i) зумовлює збільшення стискальних осьових залишкових напружень на поверхнях труб.

На основі наведених на рис. 2.13 графіків можна зробити висновок, що рівень колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень в зонах їх

максимальних значень і в осьовому перерізі зварного шва в глибинних шарах труб вищий, ніж на їх поверхнях.

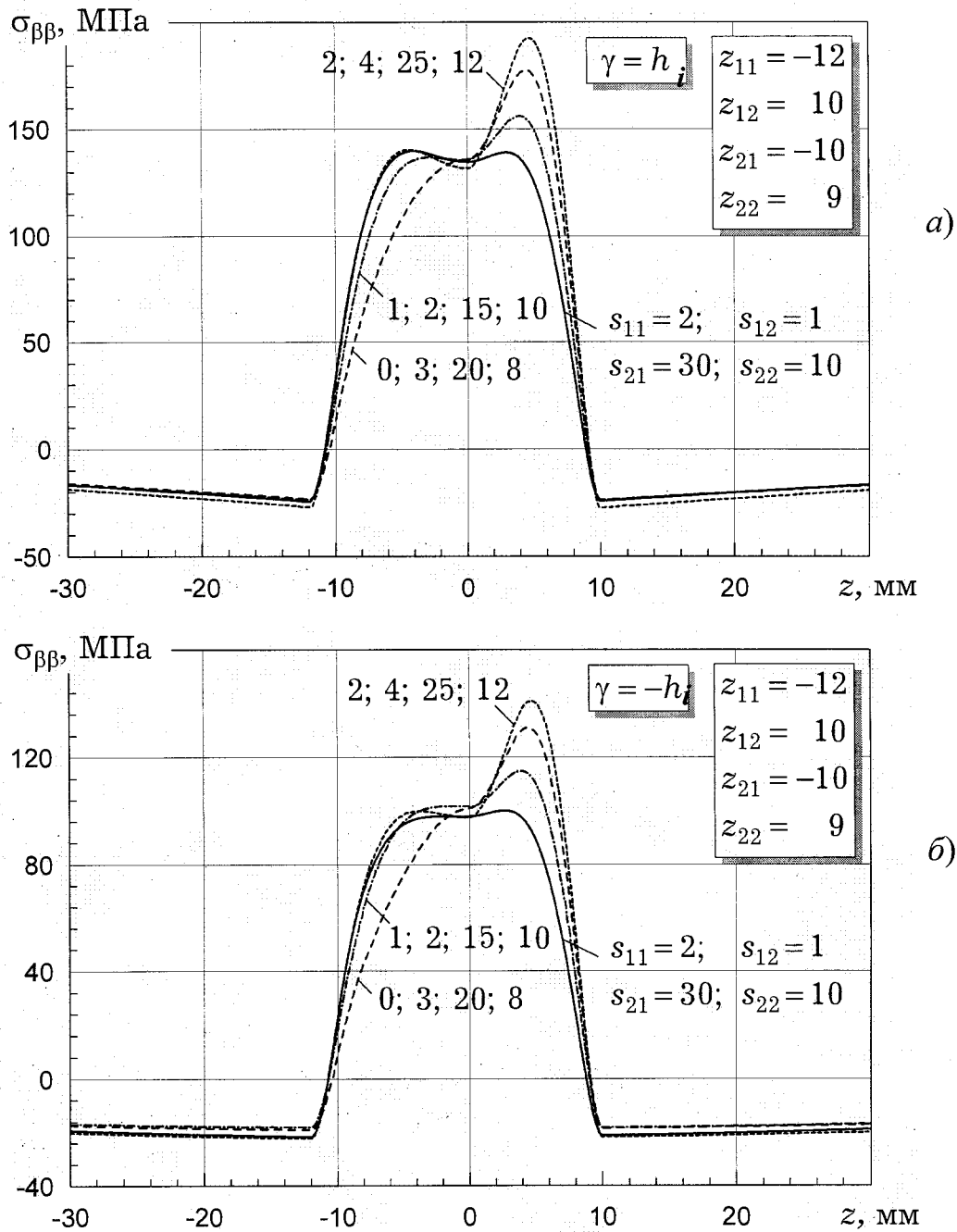


Рис. 2.9. Залежність рівня і розподілу колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій по довжині труб, ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів (z_{ij} , мм)

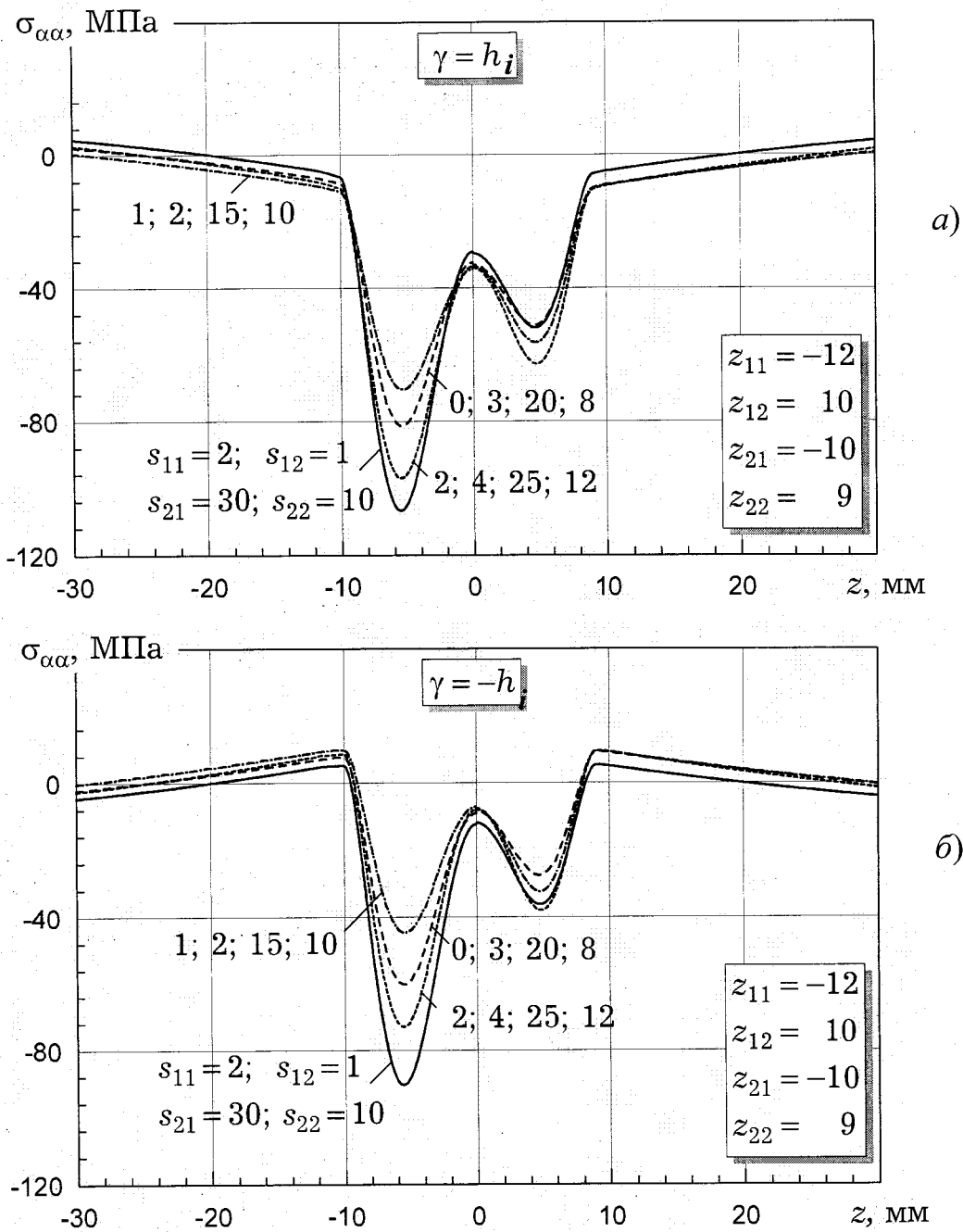


Рис. 2.10. Залежність рівня і розподілу осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій по довжині труб, ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів (z_{ij} , мм)

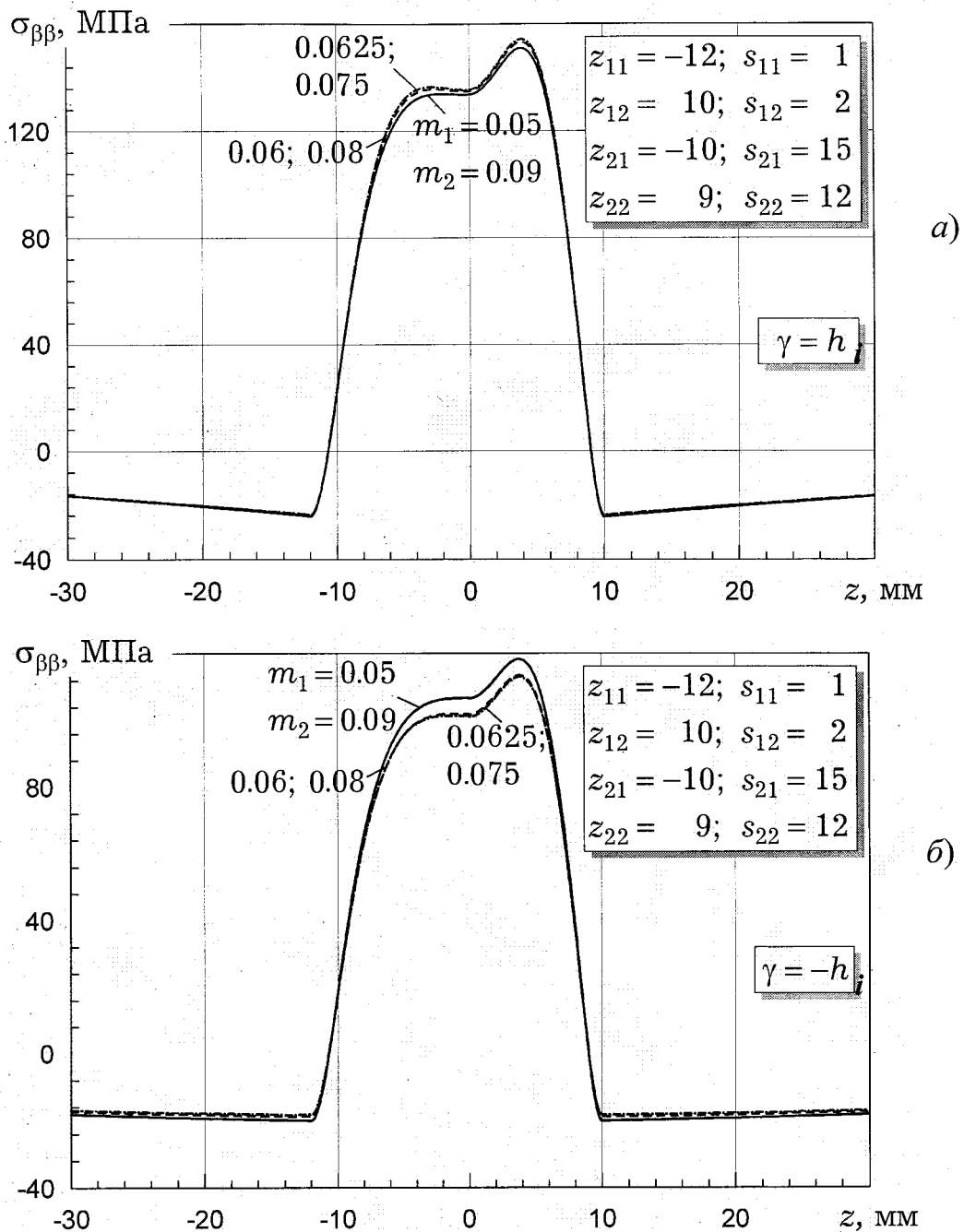


Рис. 2.11. Вплив градієнтів термопластичних деформацій по товщині (зміна параметрів m_i), розподіли і ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , z_{ij} , на рівень і розподіл колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

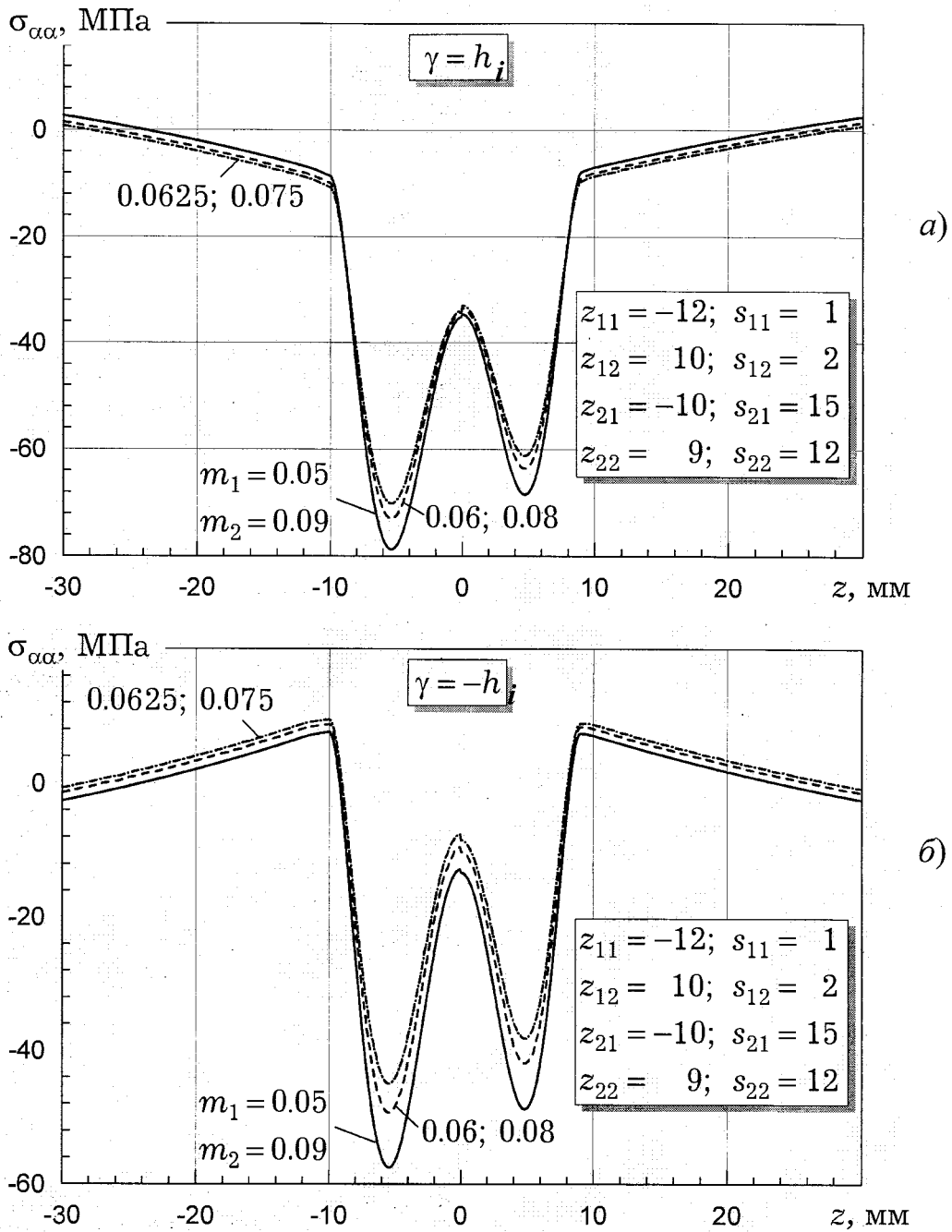


Рис. 2.12. Вплив градієнтів труб (зміна параметрів m_i), розподіли і ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , z_{ij} , на рівень і розподіл осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

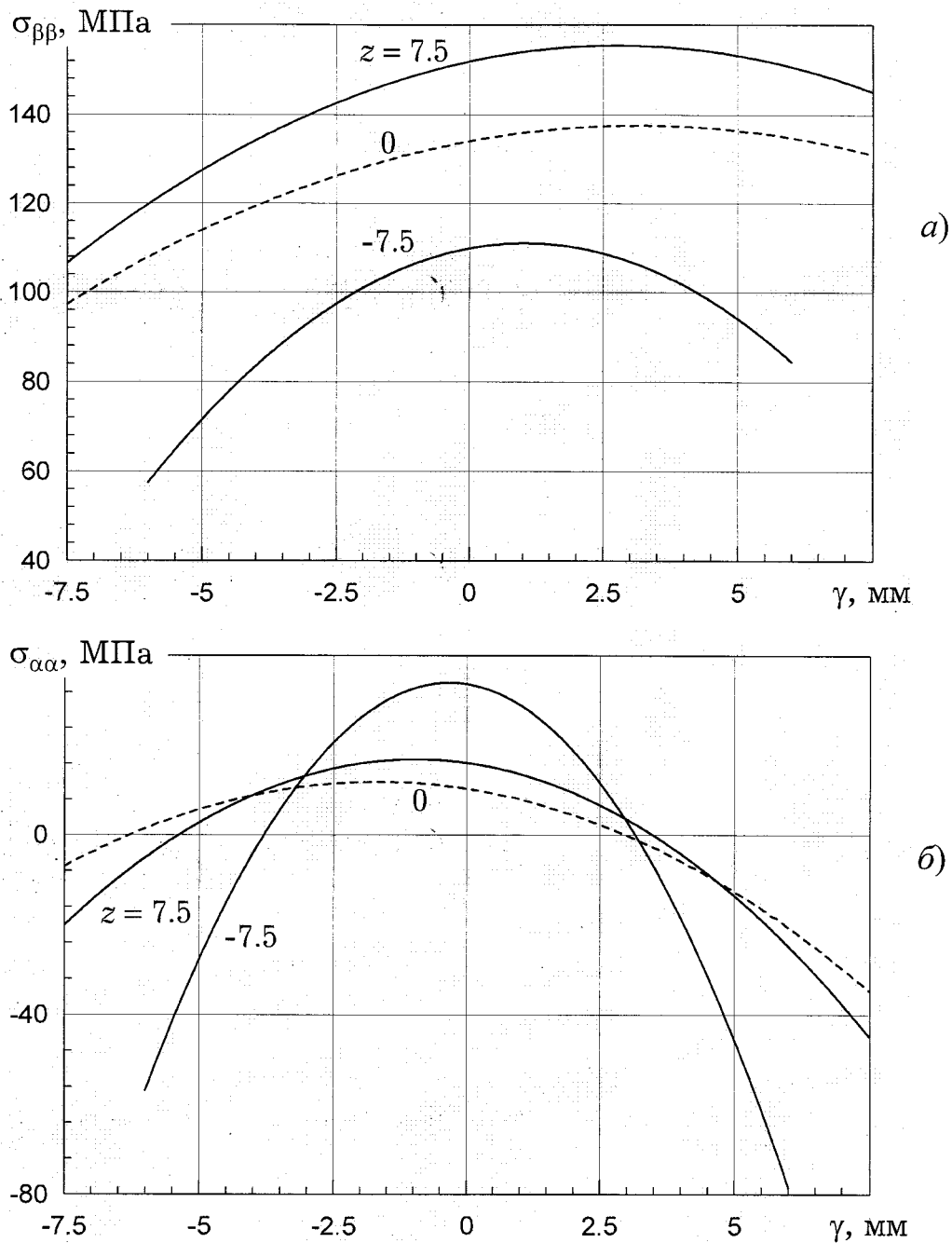


Рис. 2.13. Розподіл колових (а) і осьових (б) залишкових напружень по товщині труб в поперечних перерізах: на осі зварного шва ($z = 0$) і в зонах максимальних напружень ($z = -7.5$ мм, $z = 7.5$ мм). Параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$, $z_{11} = -14$ мм, $z_{12} = 12$ мм, $z_{21} = -12$ мм, $z_{22} = 11$ мм, $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$

На рис. 2.14, 2.15 графічно зображено просторовий розподіл колових і осьових залишкових напружень в осьовому перерізі кільцевого зварного з'єднання різновтовщинних труб.

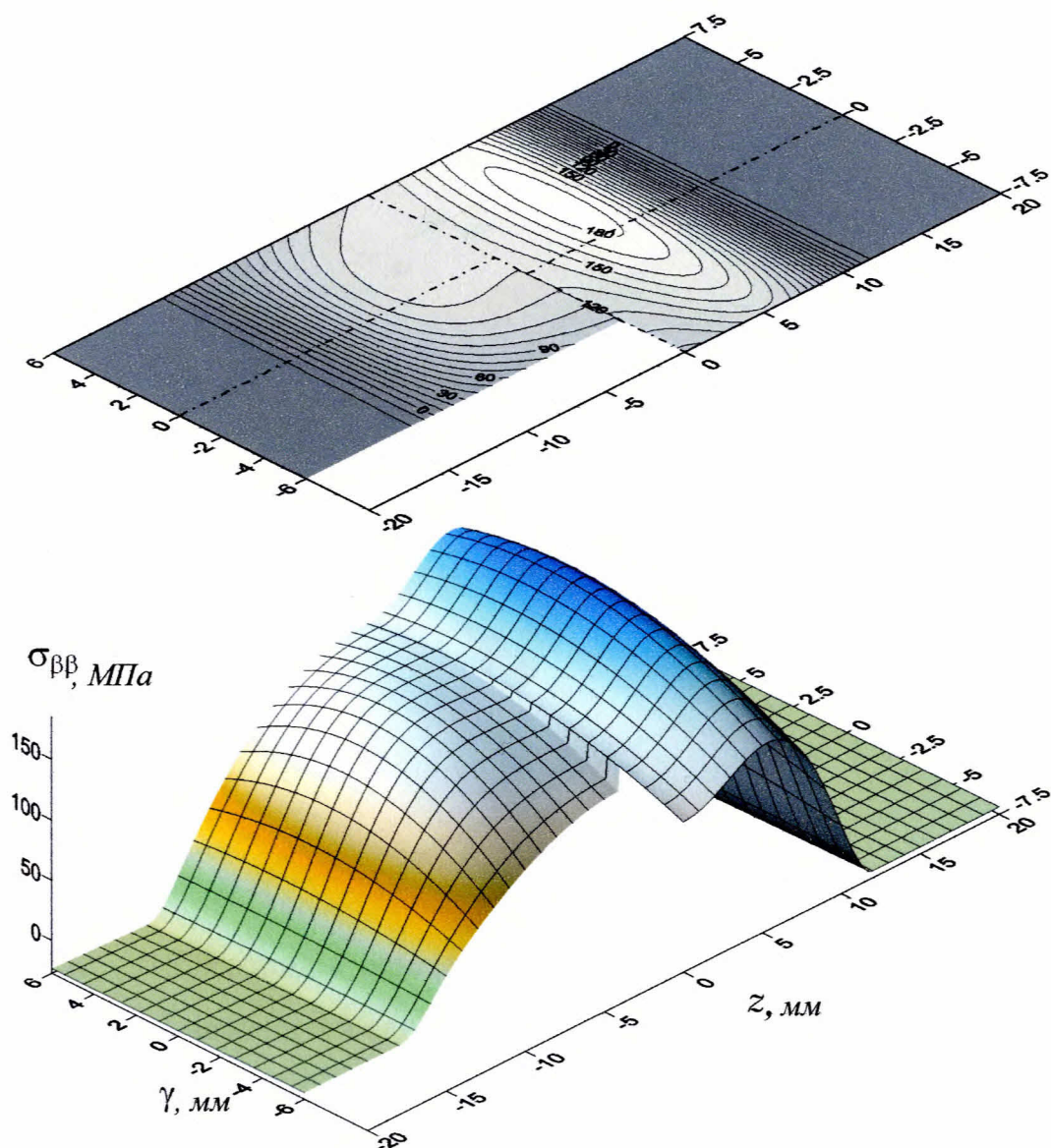


Рис. 2.14. Розподіл колових залишкових напружень в осьовому перерізі в зоні зварного з'єднання різновтовщинних труб (параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$; $z_{11} = -14$ мм, $z_{12} = 12$ мм, $z_{21} = -12$ мм, $z_{22} = 11$ мм; $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$)

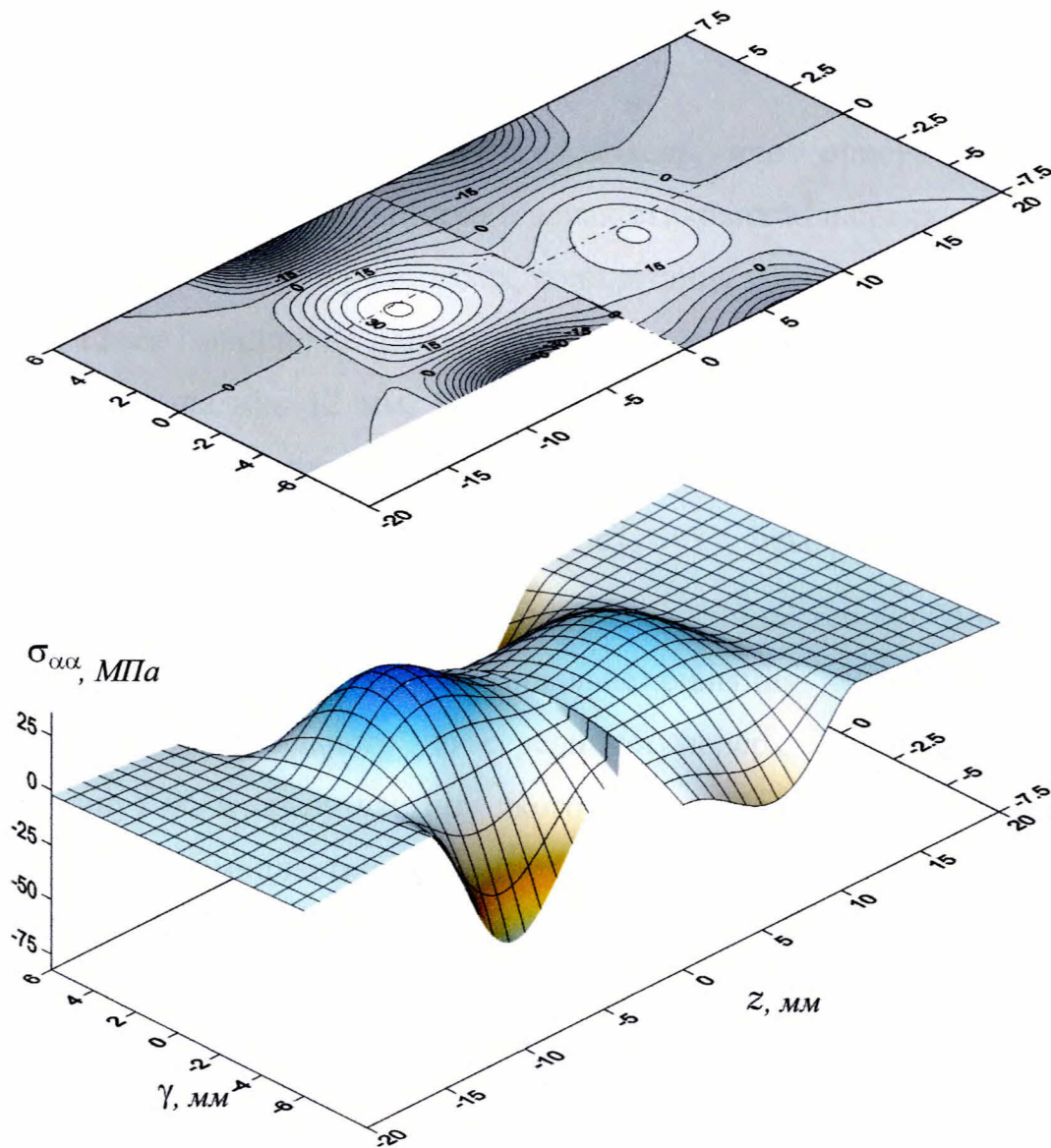


Рис. 2.15. Розподіл осьових залишкових напружень в осьовому перерізі в зоні зварного з'єднання різновтовщинних труб (параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$; $z_{11} = -14$ мм, $z_{12} = 12$ мм, $z_{21} = -12$ мм, $z_{22} = 11$ мм; $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$)

Наведені на рис. 2.14 та 2.15 графіки дозволяють проаналізувати розподіли колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень в осьових перерізах в зоні зварного з'єднання без спеціального розроблення товстішої стінки труби.

Висновки до розділу 2

1. Одержано математичну модель, що описує осесиметричний напружено-деформований стан в зонах стикових кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб у випадках, коли різниця товщин стінок (максимальна з яких 12 мм і менше) не перевищує 2.5 см і не перевищує 3 мм, якщо товстіша стінка більша ніж 12 мм. На основі аналізу літературних джерел вибрано множину двовимірних поліноміальних функцій, яка описує локалізовані двовимірні розподіли колових $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і осьових $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ залишкових термопластичних деформацій. В рамках класичної теорії оболонок 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 термопластичні деформації.

2. Використавши фундаментальний розв'язок визначального рівняння та теорему про згортку і задовольнивши в рамках теорії оболонок умови ідеального механічного контакту двох труб різної товщини в перерізі осі шва, побудовано розв'язок вихідного рівняння. На цій основі отримано вирази для обчислення залишкових напружень в довільній точці труби в зоні зварного шва, в які входять довільні числові параметри, за допомогою яких задаються різні розподіли локалізованих залишкових пластичних деформацій ϵ_{ll}^0 ($l = \alpha, \beta$).

3. Для відтворення деформацій ϵ_{ll}^0 у випадку конкретного зварного з'єднання побудовано функціонал, що виражає нев'язку між експериментальними і розрахунковими значеннями характеристик напруженого стану. Мінімізуючи цей функціонал знаходимо невідомі параметри і відповідно залишкові деформації, а потім за наведеними формулами обчислюємо залишкові напруження. При цьому враховується, що

за вимірами електромагнітним методом визначають усереднену в приповерхневому шарі різницю головних напружень, а ультразвуковим – різницю головних напружень в об'ємі по товщині труби.

4. На основі проведеного числового аналізу розв'язків прямої задачі оцінено вплив ширини зони залишкових термопластичних деформацій та їх градієнтів вздовж твірної і по товщині труб на напружений стан у зварному з'єднанні і встановлено що:

- зміна ширини зон термопластичних деформацій від 1.2 до 2 ширин зварного шва розширює межі дії розтягальних колових залишкових напружень і неістотно впливає на характер розподілу та рівні колових і осьових залишкових напружень на поверхнях труб;
- збільшення градієнтів термопластичних деформацій вздовж труб при фіксованих шириних зон їх локалізації може значно вплинути на рівні колових і осьових залишкових напружень на поверхнях труб;
- зростання перепаду термопластичних деформацій по товщині труб незначно впливає на рівень і розподіл колових залишкових напружень і може зумовити суттєве збільшення стискальних осьових залишкових напружень на поверхнях труб;
- рівень колових і осьових залишкових напружень в глибинних шарах труб може значно перевищувати їх рівень на поверхнях труб.

РОЗДІЛ 3
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ
НАПРУЖЕНЬ В РІЗНОТОВЩИННИХ ТРУБАХ, ЗВАРЕНИХ
КІЛЬЦЕВИМ ШВОМ З РОЗРОБЛЕННЯМ СКОСОМ
ТОВСТІШОЇ СТІНКИ

У розділі 2 відзначено, що у випадку зварювання різнотовщинних труб однакових діаметрів, коли різниця товщин стінок (максимальна з яких більша ніж 12 мм) перевищує 3 мм кільцеве зварне з'єднання виконується зі спеціальним розробленням товстої стінки труби. Одним із варіантів такого з'єднання зображено на рис. 3.1.

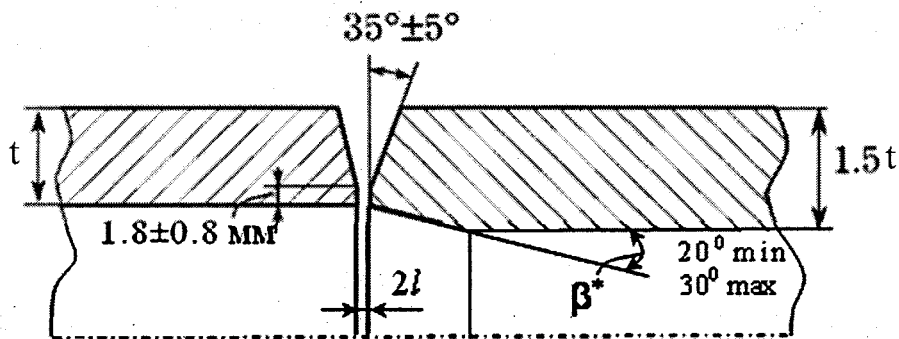


Рис. 3.1. Розробка торців за товщини стінки труб t до 16 мм

3.1. Побудова розрахункової моделі зварного з'єднання з розробленням скосом товстішої стінки

Для побудови розрахункової моделі зображеного на рис. 3.1 з'єднання різнотовщинних труб моделюватимемо його круговою циліндричною оболонкою, складеною в зоні скосу з частин різної товщини, тобто пологий скіс моделюватимемо східчатою формою. Один із варіантів такої моделі зображено на рис. 3.2. Тут зварені багатошаровим кільцевим швом різнотовщинні труби з обробленням торців товстої стінки труби, зображеним на рис. 3.1, моделюється круговою циліндричною оболонкою, складеною з частин завтовшки $2h_1$, $2h_2$ і завтовшки $2h_0$ в зоні скосу.

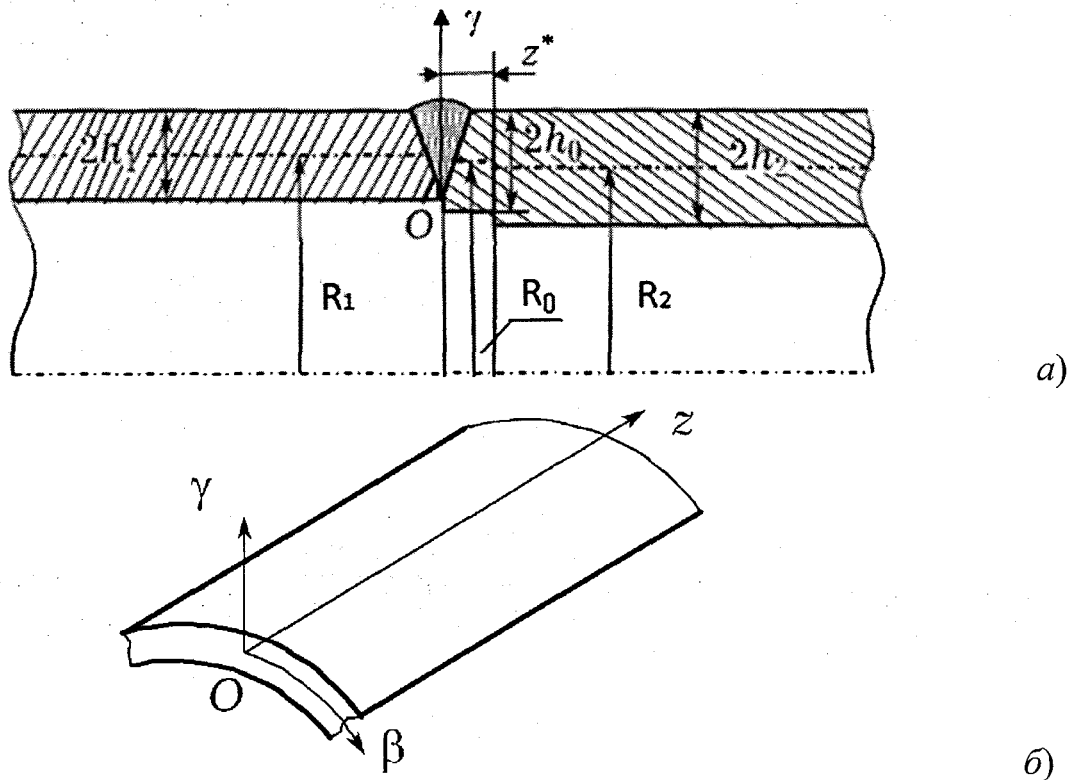


Рис. 3.2. Схема стикового зварного з'єднання різнотовщинних труб у вигляді замкнених колових циліндричних оболонок ((а) – осьовий переріз зварного з'єднання, (б) – триортогональна система координат)

Розподіл залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma)$, $e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma)$ апроксимуємо виразами (2.2), (2.4), (2.9)–(2.12). При цьому з умов неперервності цих деформацій за товщиною труб встановлюємо наступні зв'язки між параметрами m_{ij}

$$\begin{aligned} m_{12} &= y_0^2 m_1, & m_{22} &= y_0^2 m_2, & y_0 &= h_0/h_1, & z &\leq z^*, \\ m_{12} &= y_2^2 m_1, & m_{22} &= y_2^2 m_2, & y_2 &= h_2/h_1, & z &\geq z^*, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де z^* – координата, що відповідає положенню правого торця оболонки товщиною $2h_0$ (рис. 3.2).

Прогин серединної поверхні оболонки, викликаний залишковими деформаціями, подано у вигляді

$$W(\alpha) = \begin{cases} W_1(\alpha), & \alpha \leq 0, \\ W_0(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha^*, \\ W_2(\alpha), & \alpha \geq \alpha^*; \end{cases} \quad (3.2)$$

де $\alpha^* = z^*/R_1$, $z^* = l + 2(h_2 - h_1)\text{ctg}\beta^*$, $2l$ – ширина зазору, β^* – кут скосу (рис. 3.2).

В цьому випадку диференціальні рівняння для визначення функції $W_i(\alpha)$ мають вигляд (2.18), тільки індекс i приймає значення $i = 0, 1, 2$, а $y_i = h_i/h_1$.

Визначальні диференціальні рівняння для визначення безрозмірних прогинів

$$\bar{W}_i(\alpha) = \frac{1}{E_1 R_1} W_i(\alpha), \quad i = 0, 1, 2. \quad (3.3)$$

набувають вигляду (2.24).

Розв'язки ключових диференціальних рівнянь для визначення прогину різнотовщинних труб, зварених з обробленням скосом товстішої стінки, будемо аналогічно як у випадку, розгляненому у розділі 2.

Функції $\bar{W}_i(\alpha)$, які є розв'язками рівнянь (2.24), подано у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{W}_1(\alpha) &= A_{11} \omega_{11}(\alpha) + A_{21} \omega_{21}(\alpha) + \bar{W}_{01}(\alpha), \\ \bar{W}_0(\alpha) &= B_1 \omega_{10}(\alpha) + B_2 \omega_{20}(\alpha) + B_3 \omega_{30}(\alpha) + B_4 \omega_{40}(\alpha) + \bar{W}_{00}(\alpha), \\ \bar{W}_2(\alpha) &= A_{12} \omega_{12}(\alpha) + A_{22} \omega_{22}(\alpha) + \bar{W}_{02}(\alpha). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Тут позначено:

$$\begin{aligned} \omega_{10}(\alpha) &= \text{ch } \lambda_0 \cos \lambda_0 \alpha, & \omega_{20}(\alpha) &= \text{ch } \lambda_0 \sin \lambda_0 \alpha, \\ \omega_{30}(\alpha) &= \text{sh } \lambda_0 \cos \lambda_0 \alpha, & \omega_{40}(\alpha) &= \text{sh } \lambda_0 \sin \lambda_0 \alpha, \\ \omega_{11}(\alpha) &= e^{\lambda_1 \alpha} \cos \lambda_1 \alpha, & \omega_{21}(\alpha) &= e^{\lambda_1 \alpha} \sin \lambda_1 \alpha, \\ \omega_{12}(\alpha) &= e^{-\lambda_2 \alpha} \cos \lambda_2 \alpha, & \omega_{22}(\alpha) &= e^{-\lambda_2 \alpha} \sin \lambda_2 \alpha. \end{aligned}$$

Часткові розв'язки, що описують вирази функцій $\bar{W}_{0i}(\alpha)$, запишемо у вигляді аналогічному (2.26)

$$\bar{W}_{0i}(\alpha) = -\lambda_i \frac{R_i}{R_1} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{11}^{(i)}(\alpha) + \frac{y_i^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left[\mu m_1 F_{21}^{(i)}(\alpha) + k m_2 F_{22}^{(i)}(\alpha) \right] \right\}. \quad (3.5)$$

Тут, на відміну від виразу (2.26), фігурують додаткові параметри R_0, y_0^2, λ_0 , а також функції $F_{ij}^{(0)}(\alpha)$, які виражаються так:

$$\begin{aligned} F_{11}^{(0)}(\alpha) &= \int_0^{\alpha^*} \varphi_{12}(\xi) K_1^{(0)}(\xi - \alpha) d\xi, & F_{12}^{(0)}(\alpha) &= \int_0^{\alpha^*} \varphi_{22}(\xi) K_1^{(0)}(\xi - \alpha) d\xi, \\ F_{21}^{(0)}(\alpha) &= \int_0^{\alpha^*} \varphi_{12}(\xi) K_2^{(0)}(\xi - \alpha) d\xi, & F_{22}^{(0)}(\alpha) &= \int_0^{\alpha^*} \varphi_{22}(\xi) K_2^{(0)}(\xi - \alpha) d\xi, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де

$$K_j^{(0)}(x) = e^{-\lambda_0|x|} \left[\cos \lambda_0 x + (-1)^{j+1} \sin \lambda_0 |x| \right], \quad x = \xi - \alpha, \quad j = 1, 2;$$

$$\lambda_0^4 = 3R_0^2(1-\mu^2)/(4h_0^2).$$

Функції $F_{ij}^{(2)}(\alpha)$ у виразах (3.5) мають вигляд:

$$F_{1j}^{(2)}(\alpha) = \int_{\alpha^*}^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\xi) K_1^{(2)}(\xi - \alpha) d\xi, \quad F_{2j}^{(2)}(\alpha) = \int_0^{\alpha_{j2}} \varphi_{j2}(\xi) K_2^{(2)}(\xi - \alpha) d\xi. \quad (3.7)$$

Вісім сталих інтегрування A_{ij} ($i, j = 1, 2$), B_r ($r = \overline{1, 4}$), що входять у вирази (3.4), визначимо із умов ідеального механічного контакту в перерізах $\alpha = 0$ і $\alpha = \alpha^*$, тобто рівності переміщень W_i , кутів повороту θ_{1i} , моментів M_{1i} і поперечних сил Q_{1i} в цих перерізах:

$$W_1 = W_0, \quad \frac{dW_1}{d\alpha} = \frac{dW_0}{d\alpha},$$

$$\begin{aligned}
M_{11} &= M_{10}, & \frac{dM_{11}}{d\alpha} &= \frac{dM_{10}}{d\alpha}, & \alpha &= 0; \\
W_0 &= W_2, & \frac{dW_0}{d\alpha} &= \frac{dW_2}{d\alpha}, \\
M_{10} &= M_{12}, & \frac{dM_{10}}{d\alpha} &= \frac{dM_{12}}{d\alpha}, & \alpha &= \alpha^*.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Підставивши тепер вирази (3.5) в (3.4), а потім у формули для визначення моментів і співвідношення (3.8), отримаємо систему восьми лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення сталих A_{ij} , B_r , яку подано у вигляді:

$$\begin{aligned}
A_{11} - B_1 &= X_1, \\
A_{11} + A_{21} - y_3(B_2 + B_3) &= X_2, \\
A_{21} - y_4 B_4 &= X_3, \\
A_{21} - A_{11} - y_5(B_2 - B_3) &= X_4, \\
\omega_{10}^* B_1 + \omega_{20}^* B_2 + \omega_{30}^* B_3 + \omega_{40}^* B_4 - \omega_{12}^* A_{12} - \omega_{22}^* A_{22} &= X_5, \\
\xi_1 B_1 + \xi_2 B_2 + \xi_3 B_3 + \xi_4 B_4 - \xi_9 A_{12} - \xi_{10} A_{22} &= X_6, \\
\xi_5 B_1 + \xi_6 B_2 + \xi_7 B_3 + \xi_8 B_4 - \xi_{11} A_{12} - \xi_{12} A_{22} &= X_7, \\
-\xi_4 B_1 + \xi_3 B_2 - \xi_2 B_3 + \xi_1 B_4 - \xi_{13} A_{12} + \xi_{14} A_{22} &= X_8.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Тут коефіцієнти при невідомих описуються виразами:

$$\begin{aligned}
y_3 &= \frac{\lambda_0}{\lambda_1}, & y_4 &= y_0^2 \rho_0, & y_5 &= y_3 y_4, & y_0 &= \frac{h_0}{h_1}, \\
\omega_{ij}^* &= \omega_{ij}(\alpha^*), & \xi_1 &= \lambda_0(\omega_{30}^* - \omega_{20}^*), & \xi_2 &= \lambda_0(\omega_{40}^* + \omega_{10}^*), \\
\xi_3 &= \lambda_0(\omega_{10}^* - \omega_{40}^*), & \xi_4 &= \lambda_0(\omega_{20}^* + \omega_{30}^*), & \xi_5 &= -2\lambda_0^2 \omega_{40}^*, \\
\xi_6 &= 2\lambda_0^2 \omega_{30}^*, & \xi_7 &= -2\lambda_0^2 \omega_{20}^*, & \xi_8 &= 2\lambda_0^2 \omega_{10}^*, & \xi_9 &= \delta_1, \\
\xi_{10} &= \delta_2, & \xi_{11} &= \delta_3 h_2^3 / h_0^3, & \xi_{12} &= \delta_4 h_2^3 / h_0^3, & \xi_{13} &= \delta_2 \xi_0 h_2^2 / h_0^2, \\
\xi_{14} &= \delta_1 \xi_0 h_2^2 / h_0^2, & \xi_0 &= R_0 / R_2, & \delta_1 &= -\lambda_2(\omega_{12}^* + \omega_{22}^*), \\
\delta_2 &= \lambda_2(\omega_{12}^* - \omega_{22}^*), & \delta_3 &= 2\lambda_2^2 \omega_{22}^*, & \delta_4 &= -2\lambda_2^2 \omega_{12}^*.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Праві частини системи рівнянь (3.9) X_i виражаються так:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \bar{W}_{00}(0) - \bar{W}_{01}(0), \\
 X_2 &= \frac{1}{\lambda_1} \bar{W}_{00}^{(1)}(0) - \frac{1}{\lambda_1} \bar{W}_{01}^{(1)}(0), \\
 X_3 &= \frac{1}{2\lambda_1^2} \left[y_0^3 \bar{W}_{00}^{(2)}(0) - \bar{W}_{01}^{(2)}(0) \right] + \frac{R_1}{h_1 \lambda_1^2} (1 - y_0^4) (k m_2 + \mu m_1), \\
 X_4 &= \frac{1}{2\lambda_1^3} \left[y_0^3 \bar{W}_{00}^{(3)}(0) - \bar{W}_{01}^{(3)}(0) \right], \\
 X_5 &= \bar{W}_{02}(\alpha^*) - \bar{W}_{00}(\alpha^*), \\
 X_6 &= \bar{W}_{02}^{(1)}(\alpha^*) - \bar{W}_{00}(\alpha^*), \\
 X_7 &= \frac{h_2^3}{h_0^3} \bar{W}_{02}^{(2)}(\alpha^*) - \bar{W}_{00}^{(2)}(\alpha^*) + 2 \frac{R_1}{h_0} \left(1 - \frac{h_2^4}{h_0^4} \right) \times \\
 &\quad \times (k m_2 \Phi_{22}^* + \mu m_1 \Phi_{12}^*), \quad \Phi_{j2}^* = \begin{cases} \Phi_{j2}(\alpha^*), & \alpha^* < \alpha_{j2}, \\ 0, & \alpha^* \geq \alpha_{j2}, \end{cases} \quad j=1,2; \\
 X_8 &= \frac{1}{2\lambda_0^2} \left[\frac{h_2^3}{h_1^3} \bar{W}_{02}^{(3)}(\alpha^*) - \bar{W}_{00}^{(3)}(\alpha^*) \right] + \frac{R_1}{h_0 \lambda_0^2} \left(1 - \frac{h_2^4}{h_0^4} \right) \times \\
 &\quad \times (k m_2 \Phi_{22}^{1*} + \mu m_1 \Phi_{12}^{1*}), \\
 \Phi_{j2}^{1*} &= \frac{2\alpha^*}{\alpha_{j2}^2} \left[s_{j2} - 2(3 + 2s_{j2}) \frac{(\alpha^*)^2}{\alpha_{j2}^2} + 3(2 + s_{j2}) \frac{(\alpha^*)^4}{\alpha_{j2}^4} \right], \quad j=1,2.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Тут позначено

$$\begin{aligned}
 \bar{W}_{0i}^{(n)}(\alpha) &= \frac{d^n \bar{W}_{0i}}{d\alpha^n} = -\lambda_i \frac{R_i}{R_1} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{11,n}^{(i)}(\alpha) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{y_i^2}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left[\mu m_1 F_{21,n}^{(i)}(\alpha) + k m_2 F_{22,n}^{(i)}(\alpha) \right] \right\}. \\
 &\quad i=0,1,2; \quad n=1,2,3,
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$F_{pl,n}^{(i)}(\alpha) = \frac{d^n F_{pl}^{(i)}(\alpha)}{d\alpha^n}, \quad p, l = 1, 2.$$

Значення цих функцій в перерізах $\alpha = 0$ обчислюються як означені інтеграли:

$$\begin{aligned} F_{11,1}^{(1)}(0) &= 2\lambda_1 \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{11}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \sin \lambda_1 \xi d\xi, \\ F_{2j,1}^{(1)}(0) &= 2\lambda_1 \int_{-\alpha_{11}}^0 \varphi_{j1}(\xi) e^{-\lambda_1|\xi|} \cos \lambda_1 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi, \\ F_{11,1}^{(0)}(0) &= 2\lambda_0 \int_0^{\alpha^*} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_0|\xi|} \sin \lambda_0 \xi d\xi, \\ F_{2j,1}^{(0)}(0) &= 2\lambda_0 \int_0^{\alpha^*} \varphi_{j2}(\xi) e^{-\lambda_0|\xi|} \cos \lambda_0 \xi \operatorname{sgn} \xi d\xi, \quad j=1,2; \\ F_{11,2}^{(i)}(0) &= -2\lambda_i^2 F_{21}^{(i)}(0), \quad F_{2j,2}^{(i)}(0) = 2\lambda_i^2 F_{1j}^{(i)}(0) - 4\lambda_i, \\ F_{11,3}^{(i)}(0) &= -2\lambda_i^2 F_{21,1}^{(i)}(0), \quad F_{2j,3}^{(i)}(0) = 2\lambda_i^2 F_{1j,1}^{(i)}(0), \\ & i=0,1; \quad j=1,2. \end{aligned} \tag{3.13}$$

Вирази для обчислення функцій $F_{pl,n}^{(i)}$ в перерізах $\alpha = \alpha^*$ мають вигляд

$$\begin{aligned} F_{11,1}^{(0)}(\alpha^*) &= 2\lambda_0 \int_0^{\alpha^*} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_0|\xi-\alpha^*|} \sin \lambda_0 (\xi - \alpha^*) d\xi, \\ F_{2j,1}^{(0)}(\alpha^*) &= 2\lambda_0 \int_0^{\alpha^*} \varphi_{j2}(\xi) e^{-\lambda_0|\xi-\alpha^*|} \cos \lambda_0 (\xi - \alpha^*) \operatorname{sgn}(\xi - \alpha^*) d\xi, \\ F_{11,1}^{(2)}(\alpha^*) &= 2\lambda_2 \int_{\alpha^*}^{\alpha_{12}} \varphi_{12}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi-\alpha^*|} \sin \lambda_2 (\xi - \alpha^*) d\xi, \\ F_{2j,1}^{(2)}(\alpha^*) &= 2\lambda_2 \int_{\alpha^*}^{\alpha_{22}} \varphi_{j2}(\xi) e^{-\lambda_2|\xi-\alpha^*|} \cos \lambda_2 (\xi - \alpha^*) \operatorname{sgn}(\xi - \alpha^*) d\xi, \end{aligned} \tag{3.14}$$

$j=1,2;$

$$\begin{aligned}
F_{11,2}^{(i)}(\alpha^*) &= -2\lambda_i^2 F_{21}^{(i)}(\alpha^*), & F_{2j,2}^{(i)}(\alpha^*) &= 2\lambda_i^2 F_{1j}^{(i)}(\alpha^*) - 4\lambda_i \varphi_{j2}^{1*}, \\
F_{11,3}^{(i)}(\alpha^*) &= -2\lambda_i^2 F_{21,1}^{(i)}(\alpha^*), & F_{2j,3}^{(i)}(\alpha^*) &= 2\lambda_i^2 F_{1j,1}^{(i)}(\alpha^*) - 4\lambda_i \varphi_{j2}^{1*}, \\
i &= 0, 2; \quad j = 1, 2
\end{aligned}$$

Для побудови розв'язку систем алгебраїчних рівнянь застосовуємо розроблене програмне забезпечення, зокрема, в даній роботі використовується пакет Mathematica 6 та мова програмування Visual Fortran.

Визначивши сталі інтегрування A_{ij} , B_r , на основі співвідношень (2.9)–(2.12), (3.1)–(3.5) і формул (2.7) і (2.8) після проведення відповідних перетворень отримаємо вирази для розрахунку осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в трубах, які запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}
\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= E\mathbf{E}_1^* \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma), \quad \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) = E\mathbf{E}_1^* \hat{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma), \quad i = 0, 1, 2, \\
\sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= -\sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \frac{R_1}{R_i} \frac{\gamma}{h_i} \Omega_i(\alpha) + \frac{\lambda_i}{1-\mu^2} \frac{\gamma}{h_i} \left[\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{2} \times \right. \\
&\quad \times \left. \left(1 - \frac{4}{3} y_i^2 m_1 \right) F_{21}^{(i)}(\alpha) + y_i^2 \mu m_1 F_{11}^{(i)}(\alpha) + y_i^2 k m_2 F_{12}^{(i)}(\alpha) \right] + \\
&\quad + \frac{y_i^2}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h_i^2} \right) \left[\mu m_1 \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha) + k m_2 \varphi_{2i}(\alpha) S_{2i}^0(\alpha) \right], \\
\sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= \frac{R_1}{R_i} \bar{W}_i(\alpha) + \mu \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) + \left[1 - y_i^2 m_1 \left(1 - \frac{\gamma}{h_i} \right)^2 \right] \varphi_{1i}(\alpha) S_{1i}^0(\alpha), \quad (3.15)
\end{aligned}$$

Тут позначено

$$\begin{aligned}
\varphi_{10}(\alpha) &= \varphi_{12}(\alpha), \quad S_{10}^0(\alpha) = S_{12}^0(\alpha), \quad \varphi_{20}(\alpha) = \varphi_{22}(\alpha), \quad S_{20}^0(\alpha) = S_{22}^0(\alpha), \\
\Omega_0(\alpha) &= -B_1 \omega_{40}(\alpha) + B_2 \omega_{30}(\alpha) - B_3 \omega_{20}(\alpha) + B_4 \omega_{10}(\alpha), \\
\Omega_1(\alpha) &= -A_{11} \omega_{21}(\alpha) + A_{21} \omega_{11}(\alpha), \quad \Omega_2(\alpha) = A_{12} \omega_{22}(\alpha) - A_{22} \omega_{12}(\alpha). \quad (3.16)
\end{aligned}$$

У розрахункові формули для обчислення напружень (3.15) входять довільні параметри \mathbf{E}_1^* , k , α_{ij} , s_{ij} , m_i , такі ж, як і у формули (2.44) для обчис-

лення напружень в кільцевому зварному з'єднанні різнотовщинних труб, зварених без спеціальної розробки товстішої стінки труби. Для їх визначення використовується експериментальна інформація і функціонал (2.51).

3.2. Числовий аналіз впливу рівня кута скосу оброблення товстої стінки та ширини зони і градієнтів термопластичних деформацій на розподіл залишкових напружень

Для відтворення картини розподілу технологічних залишкових напружень у зварному з'єднанні різнотовщинних труб зі спеціальним розробленням товстішої стінки труби, аналогічно як і у випадку без такого розроблення, важливим є аналіз розподілу напружень на основі розв'язку прямої задачі. В даному розділі такий аналіз проведено для зварених багат шаровим кільцевим зварним швом труб діаметром 1020 мм і товщинами стінок $2h_1 = 10$ мм, $2h_2 = 14$ мм для заданих залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0$ і $e_{\alpha\alpha}^0$, які апроксимуються виразами (2.9)–(2.12). При цьому величини параметрів z_{ij} та s_{ij} наведені на рис. 3.3–3.11, а параметр $E_1^* = 8 \cdot 10^{-4}$. Матеріал труб – сталь 17Г1С ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$). Розрахунки проведені для двох значень кутів скосу β^* : мінімального – $\beta^* = 20^\circ$ ($z^* = 6,93$ мм) і максимального – $\beta^* = 30^\circ$ ($z^* = 10,99$ мм).

3.2.1. Вплив ширини зони залишкових термопластичних деформацій на рівень максимальних напружень біля зварного шва. На рис. 3.3 та 3.4. суцільними і штриховими кривими графічно зображено результати числового аналізу впливу ширини зон колових $e_{\beta\beta}^0$ і осьових $e_{\alpha\alpha}^0$ залишкових термопластичних деформацій, зміну яких вздовж труб графічно зображено суцільними кривими відповідно на рис. 2.2, 2.3, на розподіл і рівень колових залишкових $\sigma_{\beta\beta}$ для мінімального і максимального значень кутів скосу β^* .

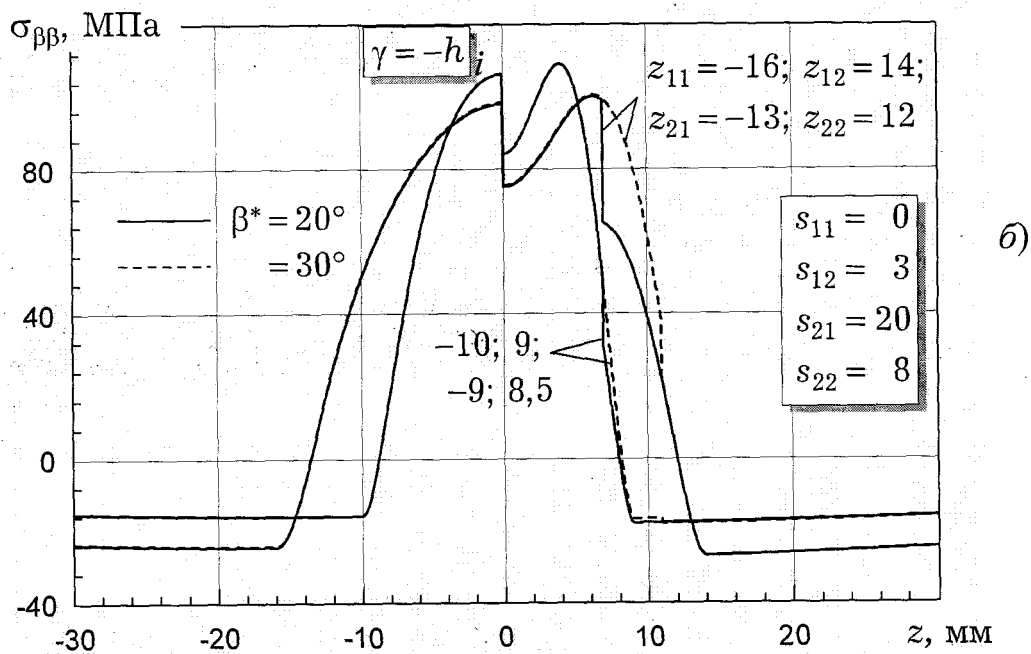
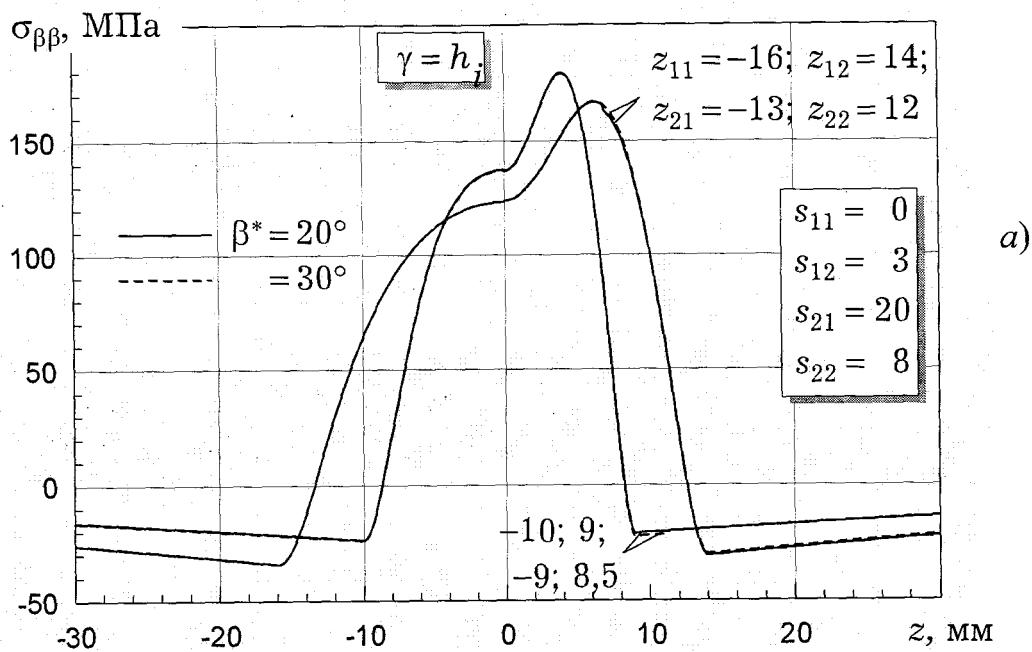


Рис. 3.3. Вплив ширини зон термопластичних деформацій (параметрів z_{ij}), розподілам яким відповідають вказані значення параметрів s_{ij} , на рівень і зміну вздовж труб колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) їхніх поверхнях (z_{ij} , мм)

Аналіз наведених графіків дозволяє зробити висновок, що зміна кута

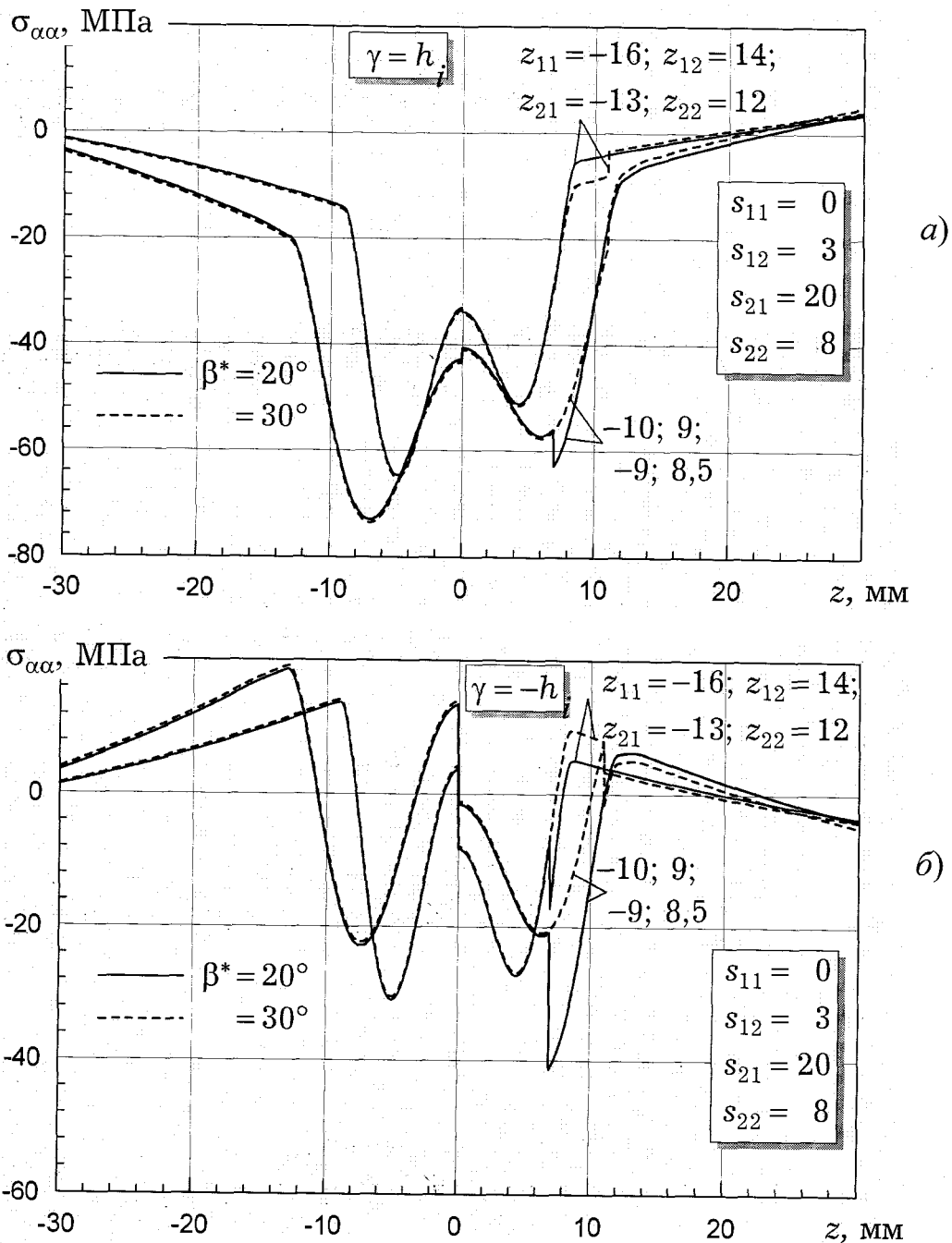


Рис. 3.4. Вплив ширини зон залишкових деформацій (зміна параметрів z_{ij}), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , на рівень і зміну осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

кососу в межах $20^\circ \leq \beta^* \leq 30^\circ$ для фіксованого розподілу залишкових термопластичних деформацій неістотно впливає на рівень колових залишкових на-

пружень на поверхнях труб, вона проявляється через зміну ширин зон залишкових деформацій. Зі збільшенням розмірів зон термопластичних деформацій рівень максимальних колових напружень дещо знижується.

Як видно з графіків, наведених на рис. 3.4, зі збільшенням зони термопластичних деформацій стискальні осьові напруження на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труб зменшується. Зміна кута скосу β^* незначно впливає на розподіл осьових залишкових напружень на зовнішніх поверхнях труб за фіксованого розподілу залишкових деформацій і зі збільшенням цього кута зумовлює зростання розтягальних напружень на внутрішній поверхні труби більшої товщини.

3.2.2. Розподіл залишкових напружень в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб при різних градієнтах залишкових деформацій вздовж труб за їх товщиною. Аналіз впливу зміни градієнтів термопластичних деформацій вздовж труб (зміна параметрів s_{ij}) показує (рис. 3.5), що за фіксованих ширин зон їх локалізації (фіксовані значення параметрів z_{ij}) зростання цих градієнтів зумовлює збільшення рівня колових залишкових деформацій. При цьому збільшення кута скосу β^* викликає зростання колових залишкових напружень на внутрішній поверхні товстішої труби.

Графіки, наведені на рис. 3.6, дозволяють зробити висновок, що збільшення градієнтів термопластичних деформацій вздовж труб викликає зменшення стискальних осьових залишкових напружень на поверхнях труб.

Зростання кута скосу β^* суттєво впливає на рівень осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні товстішої труби. При цьому стискальні максимальні напруження можуть переходити в розтягальні.

На основі наведених на рис. 3.7 графіків можна стверджувати, що зміна перепаду термопластичних деформацій по товщині труб в розглянутих межах (зміна параметрів m_i) і зміна кута скосу β^* незначно впливає на розподіл і рівень колових залишкових напружень на поверхнях труб.

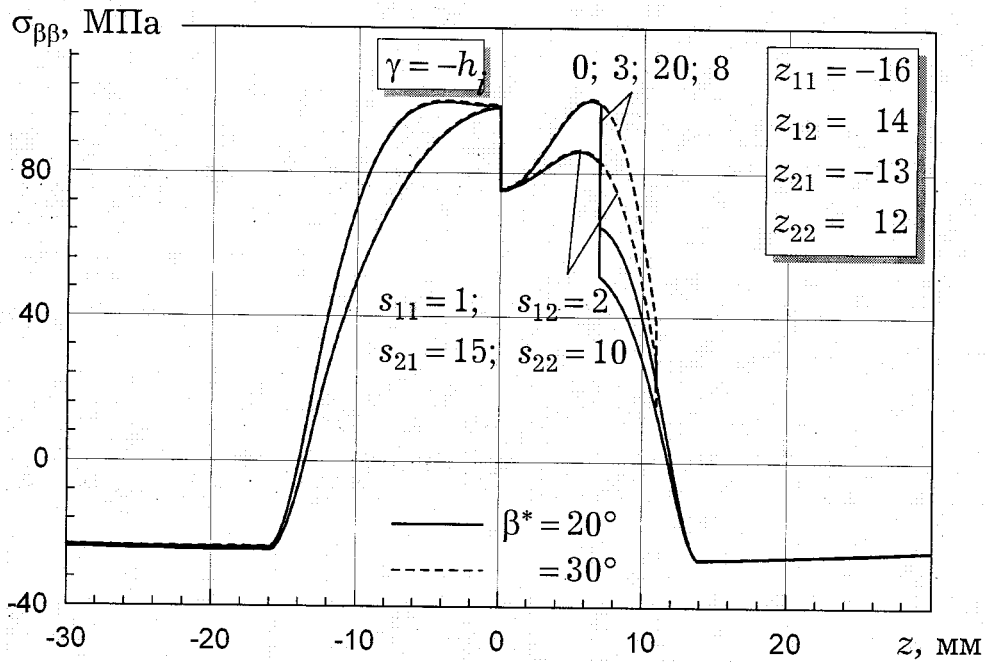
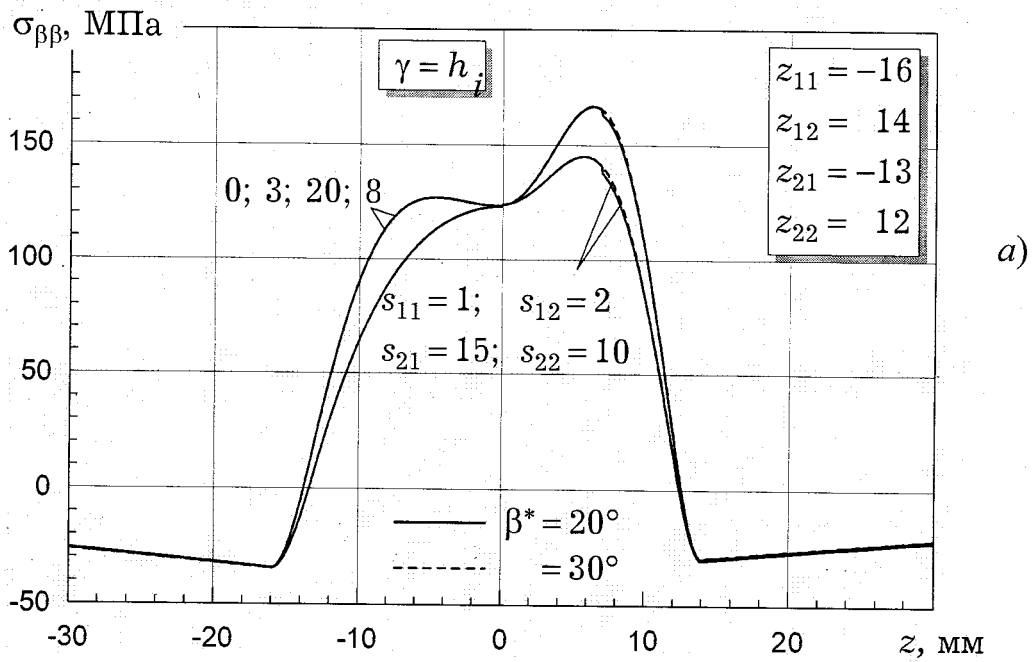


Рис. 3.5. Залежність рівня і розподілу колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій по довжині труб, ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів z_{ij} , мм

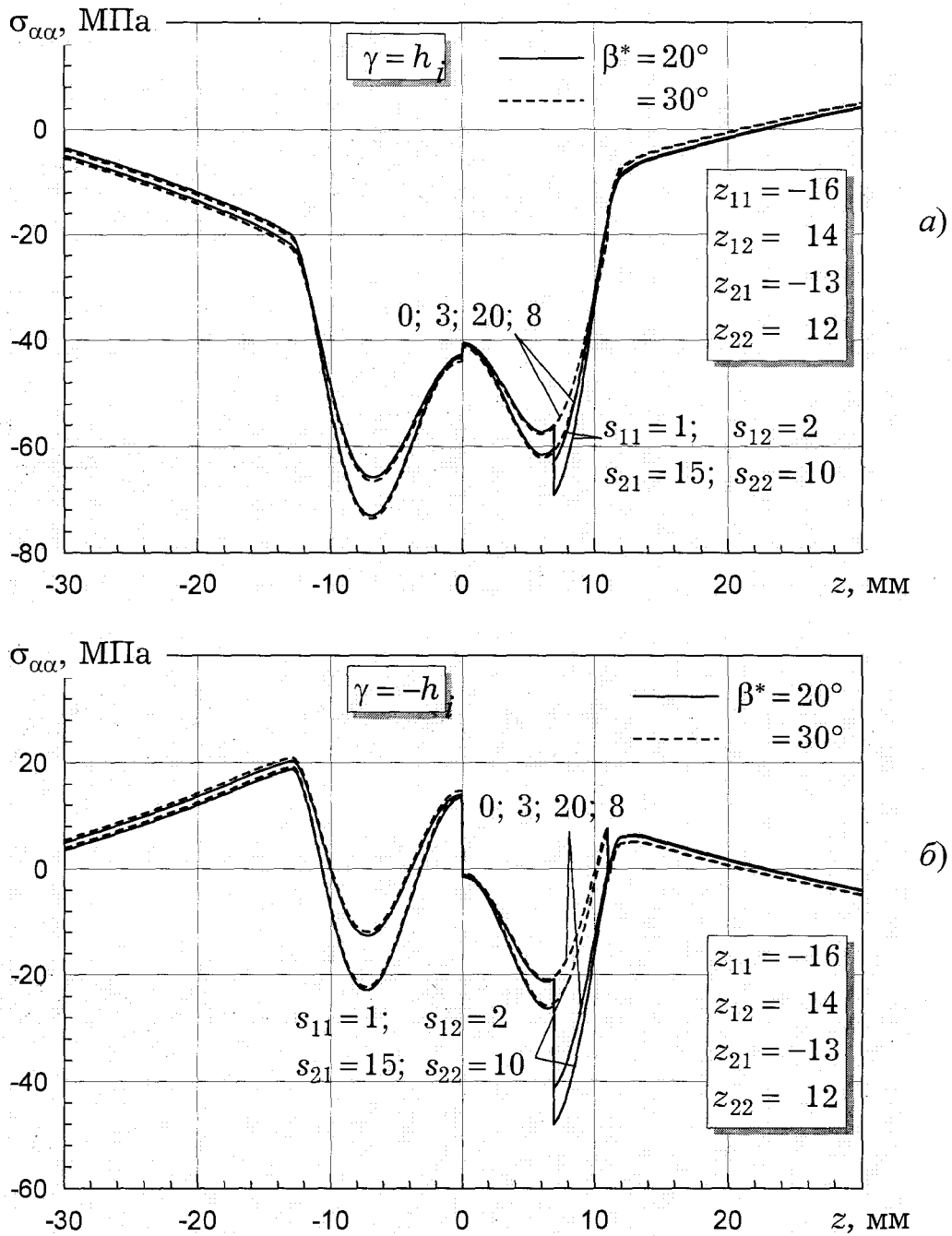


Рис. 3.6. Залежність рівня і розподілу осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб від різних градієнтів термопластичних деформацій по довжині труб, ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів z_{ij} , мм

Аналіз графічного матеріалу, наведеного на рис. 3.8, дозволяє зробити висновок, що зміна градієнту термопластичних залишкових дефор -

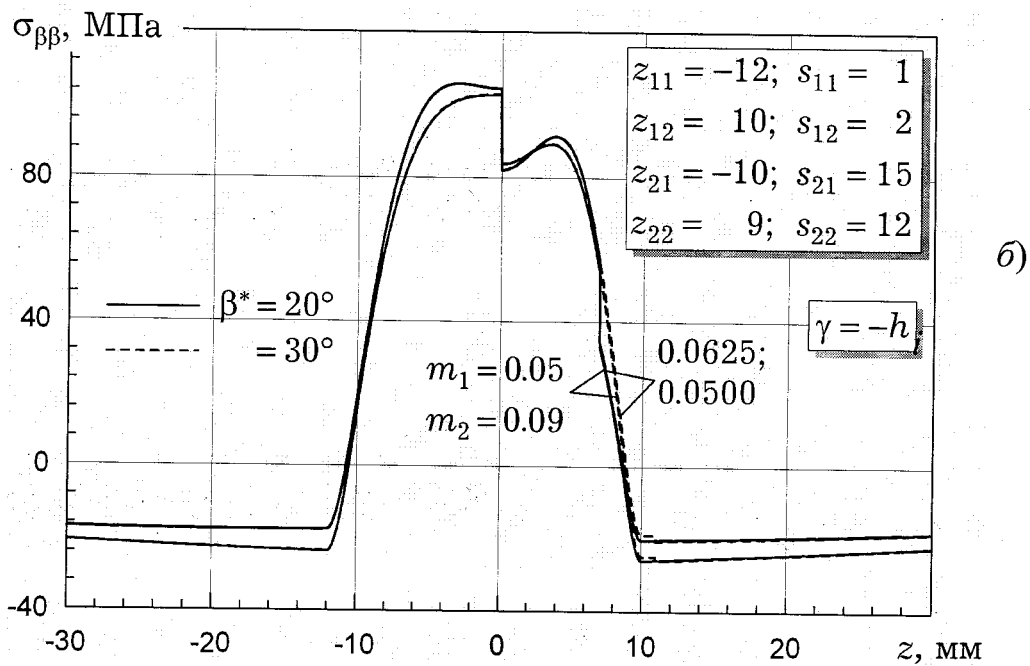
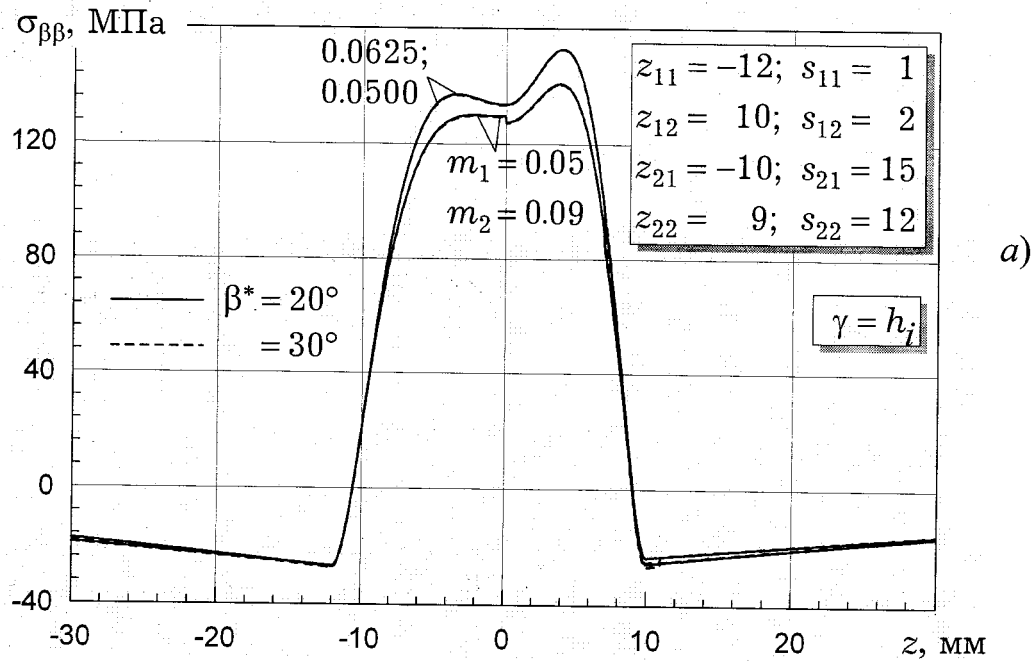


Рис. 3.7. Вплив градієнтів термопластичних деформацій по товщині (зміна параметрів m_i), розподіли і ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , z_{ij} , на рівень і розподіл колових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

мацій по товщині суттєво впливає на рівень і розподіл стискальних осьових залишкових напружень на поверхнях труб. Збільшення кута скосу β^*

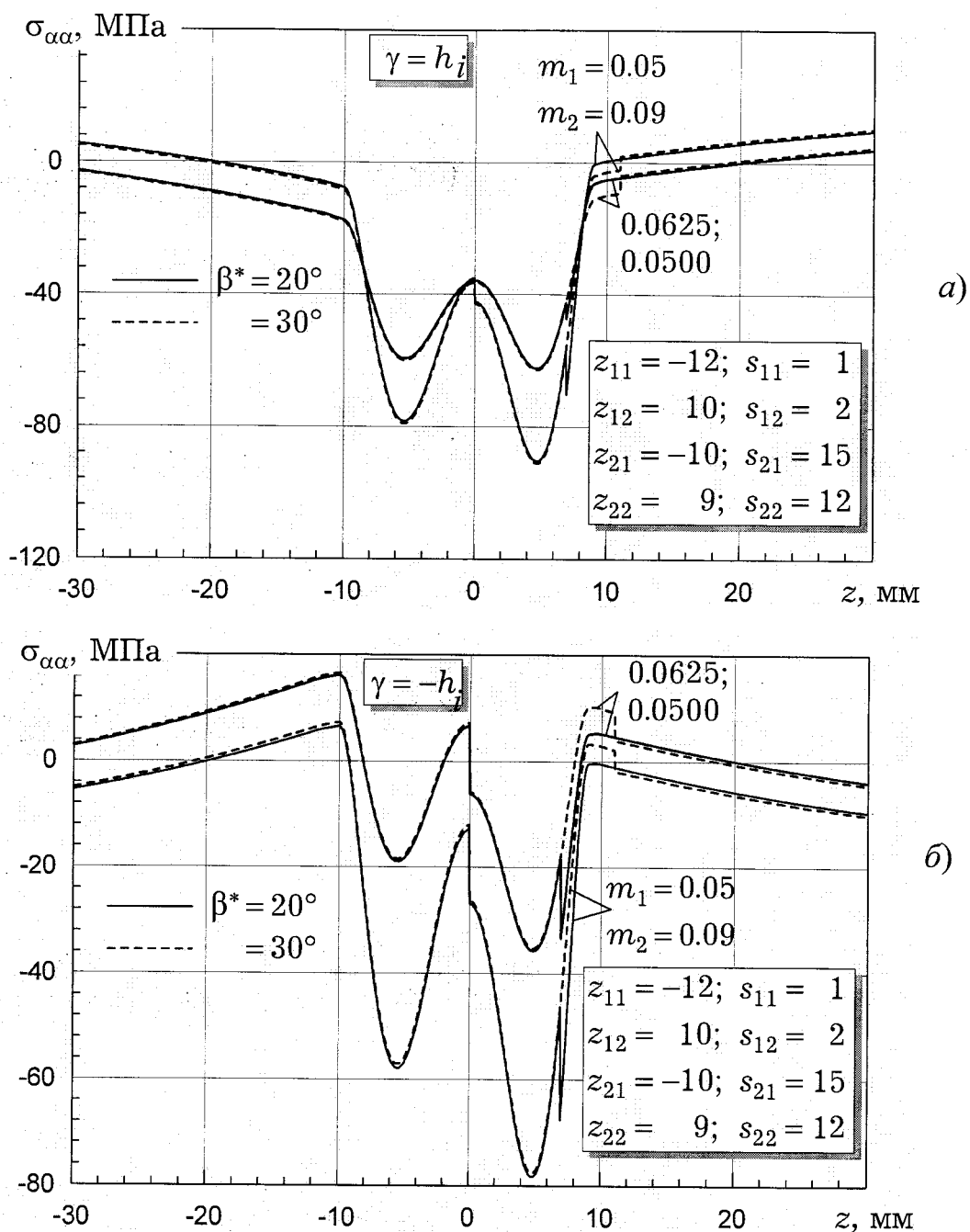


Рис. 3.8. Вплив градієнтів термопластичних деформацій по товщині (зміна параметрів m_i), розподіли і ширини зон яких характеризуються вказаними значеннями параметрів s_{ij} , z_{ij} , на рівень і розподіл осьових залишкових напружень на зовнішніх (а) і внутрішніх (б) поверхнях труб (z_{ij} , мм)

зумовлює деяке зростання максимальних розтягальних напружень на внутрішній поверхні товстішої стінки труби. Розподіл колових (а) і осьових (б) залишкових напружень по товщині труб в поперечних перерізах наведені на рис. 3.9.

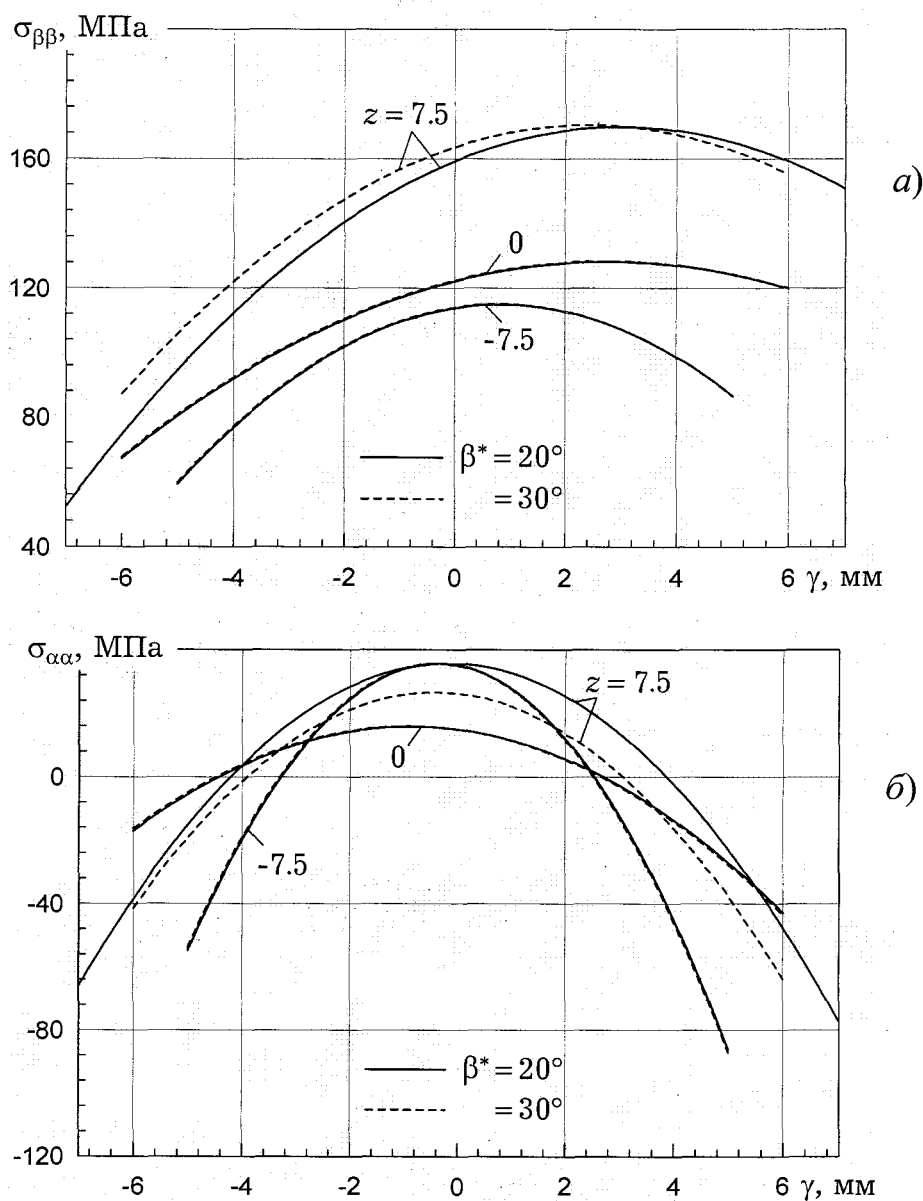


Рис. 3.9. Розподіл колових (а) і осьових (б) залишкових напружень по товщині труб в поперечних перерізах: на осі зварного шва ($z = 0$) і в зонах максимальних напружень ($z = -7.5$ мм, $z = 7.5$ мм). Параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$; $z_{11} = -16$ мм, $z_{12} = 14$ мм, $z_{21} = -13$ мм, $z_{22} = 12$ мм; $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$

Результати аналізу графічного матеріалу по дослідженню розподілу залишкових напружень по товщині труб на осі зварного шва і в зонах максимальних напружень (рис. 3.9) дозволяють зробити висновок, що рівні колових і осьових залишкових напружень в цих перерізах досягають найбільших значень в глибинних шарах труб. При цьому зі збільшенням кута скосу β^* рівень колових залишкових напружень в товстішій трубі збільшується, а осьових – зменшується.

На рис. 3.10, 3.11 графічно зображено просторовий розподіл колових

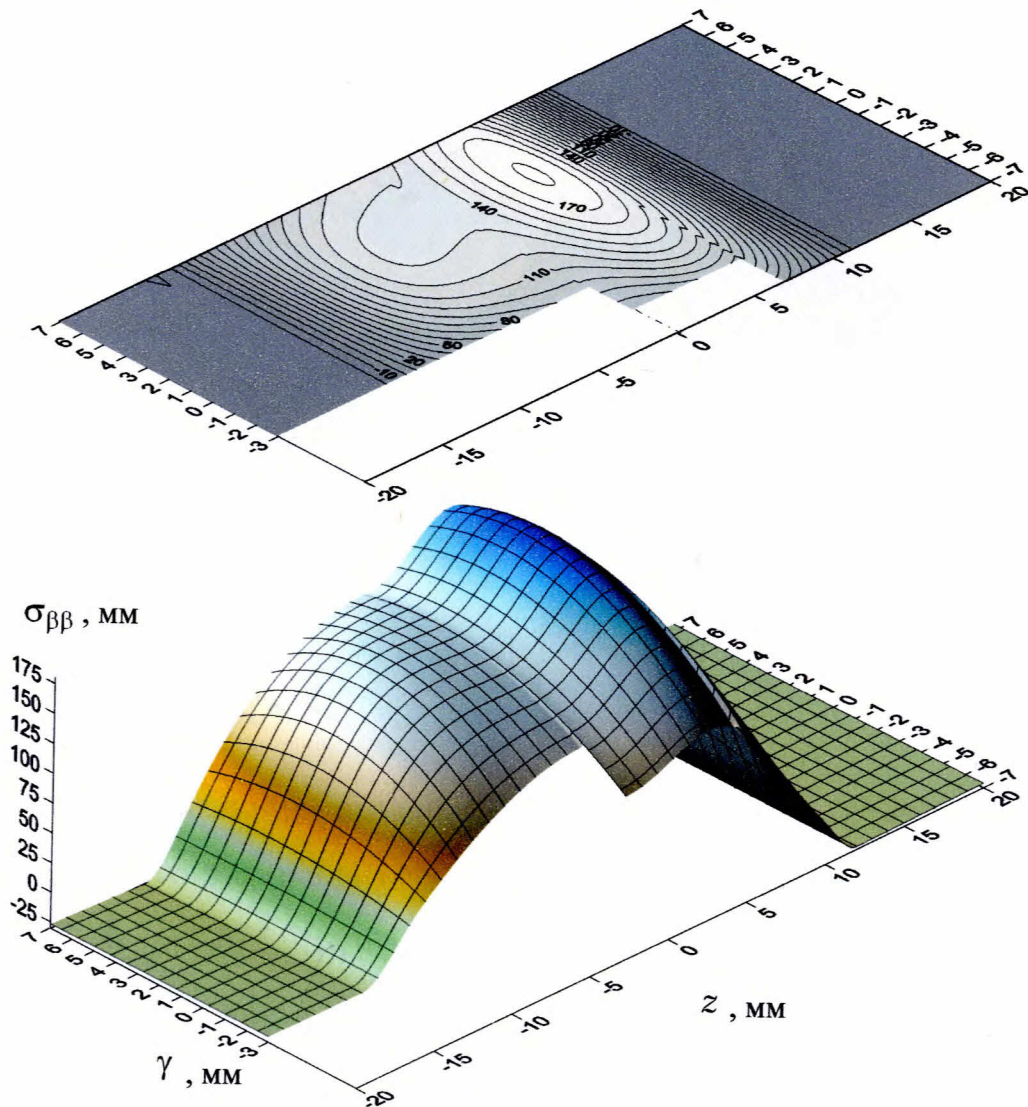


Рис. 3.10. Розподіл колових залишкових напружень в осьовому перерізі в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб (параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$; $z_{11} = -14$ мм, $z_{12} = 12$ мм, $z_{21} = -12$ мм, $z_{22} = 11$ мм; $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$, $\beta^* = 20^\circ$)

$\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень в осьовому перерізі кільцевого зварного з'єднання різнотовщинних труб для кута скосу стінки товстішої труби $\beta^* = 20^\circ$.

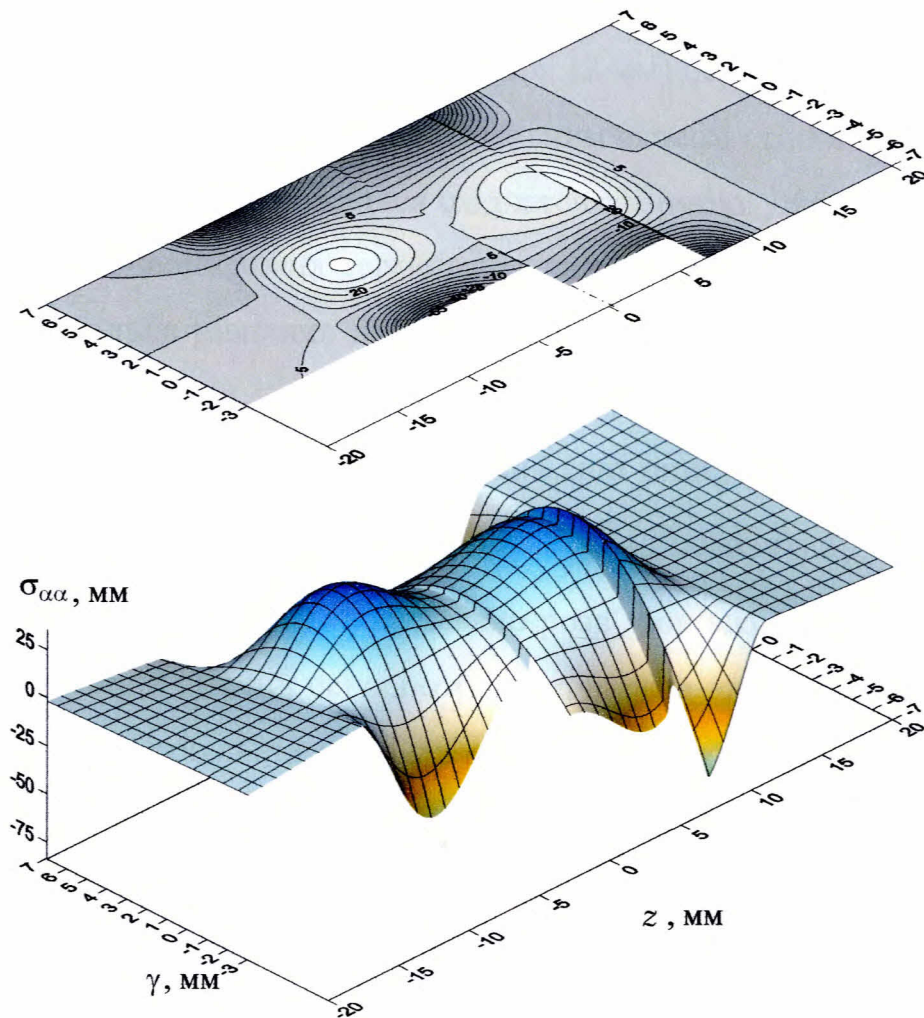


Рис. 3.11. Розподіл осьових залишкових напружень в осьовому перерізі в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб (параметри розрахунку: $m_1 = 0.0625$, $m_2 = 0.075$; $z_{11} = -14$ мм, $z_{12} = 12$ мм, $z_{21} = -12$ мм, $z_{22} = 11$ мм; $s_{11} = 0$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 20$, $s_{22} = 8$, $\beta^* = 20^\circ$)

Наведені на рис. 3.10, 3.11 графіки дозволяють проаналізувати розподіли колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень в осьових перерізах в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб з розробленням скосом товстішої стінки з внутрішньої поверхні труби.

Висновки до розділу 3

1. Запропонована математична модель, що описує зумовлений залишковими технологічними деформаціями напружений стан стикових кільцевих зварних з'єднань різновтовщинних труб у випадках, коли різниця між товщинами стінок (максимальна з яких більша ніж 12 мм) перевищує 3 мм. У таких випадках з'єднання виконується зі спеціальним скосом стінки товстішої труби, який в даній роботі моделюється східчатою формою. Для заданої множини локалізованих залишкових термопластичних деформацій одержано ключове диференціальне рівняння для визначення переміщення серединної поверхні W .

2. Для характерної множини функцій, що описує локалізовані в зоні зварного шва двовимірні розподіли колових $\epsilon_{\beta\beta}^0$ і осьових $\epsilon_{\alpha\alpha}^0$ залишкових термопластичних деформацій, побудовано розв'язок визначального диференціального рівняння і на цій основі отримано вирази для обчислення залишкових напружень в довільній точці в зоні кільцевого з'єднання різновтовщинних труб.

3. Проведено числовий аналіз розв'язків прямої задачі і оцінено вплив різних параметрів, що входять у вирази, для обчислення залишкових напружень на поверхнях труб та за їх товщиною. На основі параметричного аналізу встановлено що:

– зміна кута скосу β^* в межах від 20° до 30° за фіксованого розподілу залишкових термопластичних деформацій неістотно впливає на рівень та розподіл колових залишкових напружень на зовнішніх та внутрішніх і осьових – на зовнішніх поверхнях труб, але його збільшення зумовлює зростання розтягальних напружень на внутрішній поверхні товстішої труби. Збільшення розмірів зон термопластичних деформацій від 1.2 до 2 ширин зварного шва зумовлює незначне зниження рівня максимальних колових і осьових залишкових напружень на поверхнях труб;

- збільшення градієнтів залишкових деформацій вздовж труб зафіксованих зон їх локалізації зумовлює зростання рівня колових та викликає зменшення стикових осьових залишкових напружень на поверхнях труб. При цьому збільшення кута скосу зумовлює деяке підвищення рівня максимальних колових і суттєво впливає на рівень осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні товстішої труби;
- зміна перепаду термопластичних деформацій по товщині труб в розглянутих межах незначно впливає на рівень і розподіл колових і суттєво змінює рівень осьових залишкових напружень на поверхнях труб;
- рівень колових і осьових залишкових напружень досягає максимальних значень в глибинних шарах труб. При цьому зі збільшенням кута скосу рівень колових залишкових напружень в трубі з товстішою стінкою зростає, а осьових – спадає.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНОМУ З'ЄДНАННІ РІЗНОТОВЩИНИХ ТРУБ

4.1. Напруження в трубах різнотовщинного зварного з'єднання від внутрішнього тиску

При діагностуванні напруженого стану трубопроводів за допомогою неруйнівних методів вимірюють його характеристики, зумовлені сумарною дією зовнішнього навантаження та технологічних чинників. Для відокремлення складових, що характеризують залишкові напруження потрібно розраховувати напружений стан на даній ділянці трубопроводу, викликаний дією силового навантаження. Нижче для ділянки трубопроводу зі зварним з'єднанням різнотовщинних труб отримано розрахункові формули для обчислення напружень від внутрішнього тиску.

Розглянемо спочатку вільну від закріплень в осьовому напрямку ділянку трубопроводу зі зварним з'єднанням різнотовщинних труб (рис. 2.1).

У цьому випадку, використавши наведені в розділі 2 співвідношення, а також врахувавши дію на різнотовщинну оболонку внутрішнього тиску P , ключове рівняння для визначення функцій прогину $W_i(\alpha)$ можна подати у вигляді

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4 \right) W_i^P = \frac{R_i}{D_{1i}} P, \quad (4.1)$$

де параметри D_{1i} та λ_i^4 такі ж, як і у виразах (2.5), (2.7).

Введемо безрозмірний прогин оболонки так:

$$\bar{W}_i^P(\alpha) = \frac{1}{\varepsilon R_1} W_i^P(\alpha), \quad (4.2)$$

де $\varepsilon = P/E$.

Тоді рівняння (4.1), записане для визначення безрозмірних функцій $\bar{W}_i^P(\alpha)$ набуває вигляду

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4\lambda_i^4 \right) \bar{W}_i^P = \frac{3(1-\mu^2)R_1^3}{2h_i^3} \quad (4.3)$$

Загальні розв'язки цих рівнянь зобразимо у вигляді суми розв'язків однорідних рівнянь $\bar{W}_i^{P*}(\alpha)$ та їх частинних розв'язків \bar{W}_{oi}^P і подамо вирази для функцій $\bar{W}_i^P(\alpha)$ у вигляді

$$\bar{W}_i^P(\alpha) = \bar{W}_{i*}^P(\alpha) + \bar{W}_{oi}^P, \quad i = 1, 2 \quad (4.4)$$

де

$$\bar{W}_{oi*}^P(\alpha) = A_{1i}^P \omega_{1i}(\alpha) + A_{2i}^P \omega_{2i}(\alpha), \quad (4.5)$$

$$\bar{W}_{oi}^P = \frac{R_i}{R_1} \left(\frac{R_i}{2h_i} \right), \quad (4.6)$$

функції ω_{1i} , ω_{2i} такі ж, як у виразі (2.25).

Сталі інтегрування A_{ji}^P ($j, i = 1, 2$) визначаємо із умов ідеального механічного контакту (2.29), на основі яких отримуємо систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} A_{11}^P - A_{12}^P &= d_o^P, \\ A_{11}^P + A_{21}^P + g_1(A_{11}^P - A_{22}^P) &= 0, \\ A_{21}^P + g_2 A_{22}^P &= 0, \\ A_{21}^P - A_{11}^P - g_3(A_{12}^P + A_{22}^P) &= 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Тут

$$g_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad g_2 = Y_2^2 \rho_2, \quad g_3 = g_1 g_2,$$

$$d_o^P = \frac{1}{2R_1} \left(\frac{R_2^2}{h_2} - \frac{R_1^2}{h_1} \right). \quad (4.8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4,7), знаходимо

$$A_{11}^P = \frac{d_o^P}{g_o} [g_2 g_3 + g_1 (g_2 + 2g_3)], \quad A_{12}^P = -\frac{d_o^P}{g_o} (g_1 + 2g_2 + g_3),$$

$$A_{21}^P = \frac{d_o^P g_2}{g_o} (g_1 - g_3), \quad A_{22}^P = \frac{d_o^P}{g_o} (g_3 - g_1),$$

$$g_o = g_3 + g_2 (2 + g_3) + g_1 (1 + g_2 + 2g_3). \quad (4.9)$$

Тепер формули для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}^{P(i)}$ і колових $\sigma_{\beta\beta}^{P(i)}$ напружень від тиску P запишемо у вигляді

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{P(i)}(\alpha, \gamma_i) = -P \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} \frac{R_1}{R_i} \frac{\gamma_i}{n_i} \Omega_i^P(\alpha),$$

$$\sigma_{\beta\beta}^{P(i)}(\alpha, \gamma_i) = P \left[\frac{R_1}{R_i} \bar{W}_{i*}^P + \frac{R_i}{2h_i} \right] + \mu \sigma_{\alpha\alpha}^{P(i)}(\alpha, \gamma_i), \quad (4.10)$$

$$\Omega_1^P(\alpha) = -A_{11}^P \omega_{21}(\alpha) + A_{21}^P \omega_{11}(\alpha),$$

$$\Omega_2^P(\alpha) = A_{12}^P \omega_{22}(\alpha) + A_{22}^P \omega_{12}(\alpha). \quad (4.11)$$

У випадку зварного з'єднання різнотовщинних труб з розробленням скосом товстішої стінки (рис. 3.1), яке моделюється циліндричною оболонкою, складеною з частин завтовшки $2h_1$, $2h_2$ і завтовшки $2h_0$ в зоні скосу (рис. 3.2) прогин оболонки подано у вигляді (3.2).

Тоді диференціальні рівняння для визначення безрозмірних функцій $\bar{W}_i(\alpha)$ ($i=0,1,2$) можна записати у формі (4.3), а їх загальні розв'язки у вигляді (4.4), врахувавши при цьому, що індекс i приймає значення $i=0,1,2$, а функція $W_{0*}^P(\alpha)$ така:

$$\bar{W}_{0*}^P(\alpha) = B_1^P \omega_{10}(\alpha) + B_2^P \omega_{20}(\alpha) + B_3^P \omega_{30}(\alpha) + B_4^P \omega_{40}(\alpha). \quad (4.12)$$

Тут $\omega_{jo}(1,2,3,4)$ такі ж, як і у співвідношеннях (3.4), B_j сталі інтегрування.

Вісім сталих інтегрування $A_{ij}^P(i, j = 1, 2) B_j^P(j = 1, 2, 3, 4)$, що входять у вирази (4.5), (4.12), визначаємо із умов ідеального механічного контакту в перерізах $\alpha = 0$ і $\alpha = \alpha_*$ (3.8).

Вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}^P$ і колових $\sigma_{\beta\beta}^P$ напружень від тиску P зберігають структуру (4.10), тільки в даному випадку $i = 0, 1, 2$, а функція $\Omega_0^P(\alpha)$ обчислюється так:

$$\Omega_0^P(\alpha) = -B_1^P \omega_{40}(\alpha) + B_2^P \omega_{30}(\alpha) - B_3^P \omega_{20}(\alpha) + B_4^P \omega_{10}(\alpha). \quad (4.13)$$

Для ділянки трубопроводу зі зварним з'єднанням різнотовщинних труб (рис. 3.1), виготовлених зі сталі 17ГІС, з зовнішнім діаметром 1020 мм, товщин стінок $2h_1 = 10$ мм, $2h_2 = 14$ мм і проміжковою $2h_0 = 12$ мм під тиском P проведено числовий розрахунок.

На рис. 4.1 графічно зображено прогин стінок труб, зумовлений дією внутрішнього тиску $P = 4$ МПа.

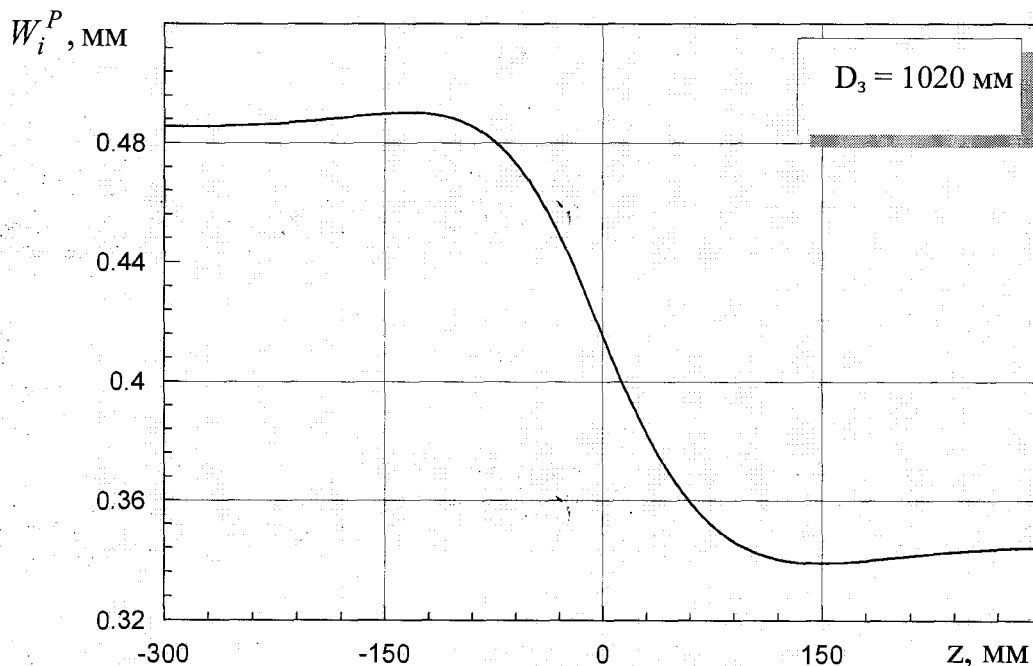


Рис. 4.1. Прогин стінок труб, викликаний дією внутрішнього тиску

Розподіл безрозмірних колових $\hat{\sigma}_{\beta\beta}^P = \sigma_{\beta\beta}^P / P$ і осьових $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^P = \sigma_{\alpha\alpha}^P / P$ напружень від тиску P на поверхнях труб графічно зображено на рис. 4.2, 4.3.

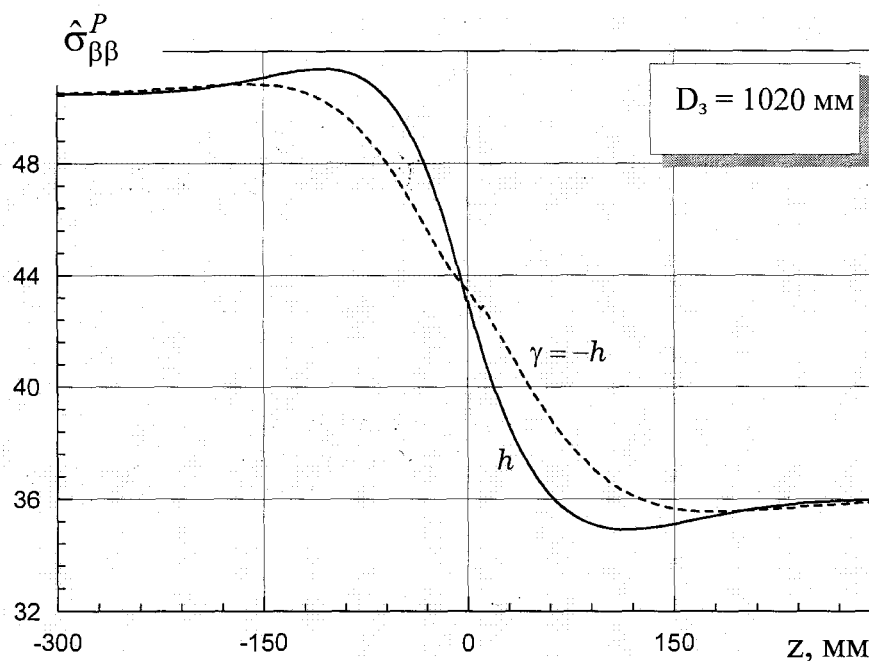


Рис. 4.2. Розподіл безрозмірних колових $\hat{\sigma}_{\beta\beta}^P$ напружень від тиску на зовнішніх і внутрішніх поверхнях труб

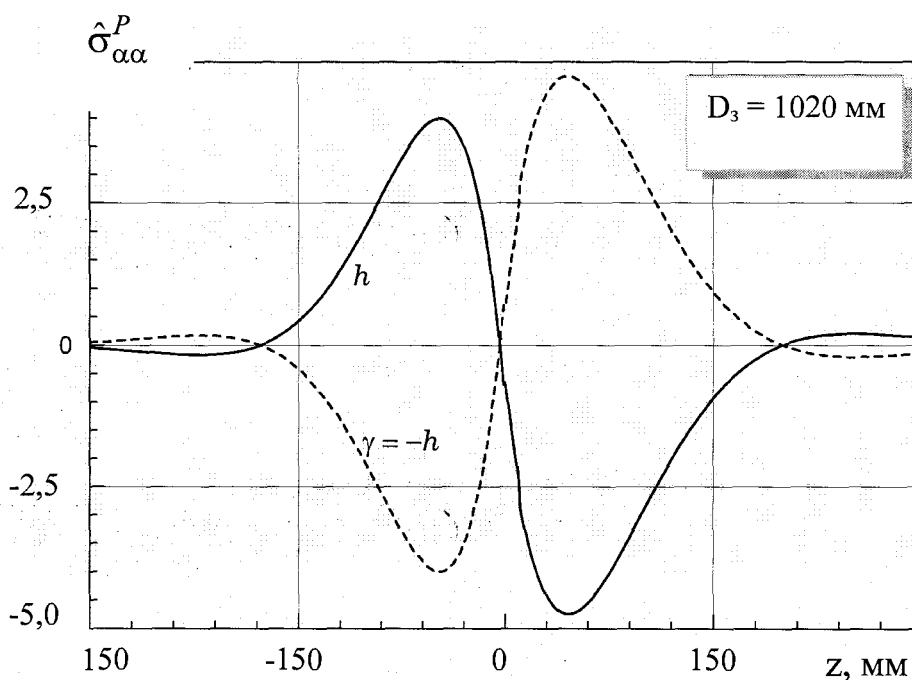


Рис. 4.3. Розподіл безрозмірних осьових $\hat{\sigma}_{\alpha\alpha}^P$ напружень від тиску на зовнішніх і внутрішніх поверхнях труб

Як видно з графіків колові напруження від внутрішнього тиску в зоні зварного з'єднання в стінці тоншої труби зменшуються, а в стінці товстішої труби зростають.

4.2. Експериментальне визначення напруженого стану зварних стиків різнотовщинних труб

Перевірку адекватності розроблених математичних моделей для визначення напруженого стану зварних стиків різнотовщинних труб проводили шляхом порівняння результатів теоретичних досліджень з результатами експериментальних даних. З цією метою розроблено і виготовлено експериментальне устаткування, яке дає можливість в лабораторних умовах якісно моделювати напружено-деформований стан (НДС) в зоні зварних різнотовщинних з'єднань.

4.2.1. Устаткування для моделювання НДС в зоні зварних різнотовщинних з'єднань. Визначення НДС в зоні зварних різнотовщинних з'єднань проводили на спеціально виготовленій котушці з зовнішнім діаметром 1020 мм і довжиною 780 мм (див. рис. 4.4) у вигляді звареної кільцевим швом двох циліндричних оболонок, розміри яких і форми розробок їх торців приведені на рис. 4.4.

Циліндричні оболонки 1 і 2 були виготовлені з аварійного запасу труб різних Лінійно-виробничих управлінь магістральних газопроводів.

Матеріал сталь 17Г1С, основні механічні характеристики і хімічний склад згідно сертифікатів на виготовлення приведені в таблицях 4.1 і 4.2.

Труби з зовнішнім діаметром 1020 мм з товщиною стінки (10,0 і 14,0) мм виготовлені згідно ТУ 14-3-1698-2000, з такими технічними характеристиками: допуск на відхилення в радіальному напрямку $\pm 3,0$ мм, допуск на відхилення по торцях $\pm 1,6$ мм, допуск на відхилення за товщиною стінки $+ 0,3 / - 5$ % від номінальної, тиск при гідровипробуваннях від 6,0 до

Таблиця 4.1.

Масова доля елементів сталі 17Г1С, %

№ оболонки	Номер плавки	C	Mn	Si	S	P	Al	C _{екв}
1	2116	0,18	1,37	0,5	0,025	0,02	0,008	0,46
2	3759	0,19	1,41	0,45	0,033	0,017	0,005	0,43

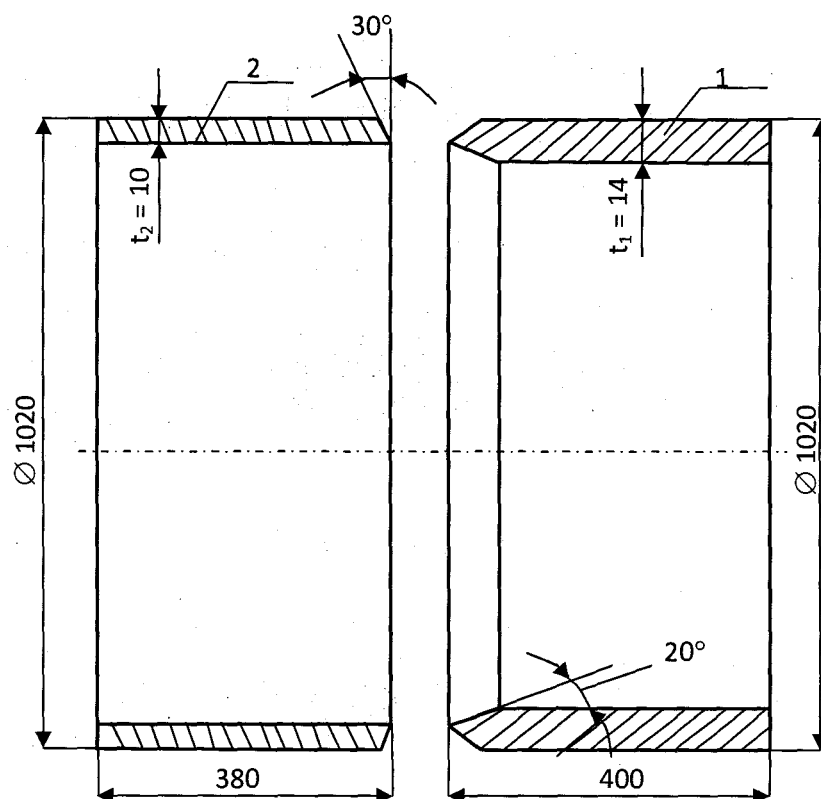


Рис. 4.4. Розміри і форми розробок торців циліндричних оболонок 1 і 2.

12,5 МПа і визначається за величиною нормативної границі плинності матеріалу

$$P_{\text{вирп}} = 2t_{\text{min}} \times R / D_{\text{вн}}, \quad (4.14)$$

де t_{min} - мінімальна товщина стінки труби в мм; R - розрахункове значення опору розтягу (стиску), яке приймаємо рівним 95 % від нормативної границі текучості, МПа; $D_{\text{вн}}$ - внутрішній діаметр труби, мм.

Зварювання циліндричних оболонок 1 і 2 дослідної котушки проводили за технологією, що застосовують в польових умовах при виконанні монтажного кільцевого шва без провороту. Здійснювали

Таблиця 4.2.

Основні механічні характеристики матеріалу циліндричних оболонок

№ оболонки	Границя міцності, МПа	Границя плинності, МПа	Відносне видовження, %	Ударна в'язкість основного металу, % КСV, Дж/см ²	Ударна в'язкість зварного з'єднання, КСV, Дж/см ²
1	560	390	25	29,4	29,4
2	570	405	23	59	50

багатошаровий монтажний шов електродами марки УОНІ – 13/55 Р за три проходи: 1-й корінь $I = 90 - 130$ А - діаметр електрода 3,2 мм; 2-й і 3-й корінь $I = 130 - 210$ А - діаметр електрода 4,0 мм. Отримані таким чином багатошарові монтажні зварні шви не піддавалися додатковій технологічній обробці. Контроль якості всіх багатошарових зварних з'єднань проводився зовнішнім оглядом, рентгенопросвічуванням та ультразвуковою дефектоскопією.

Крім цього була спроектована і змонтовано стенд для моделювання НДС в зоні різнотовщинних зварних з'єднань трубопроводів (рис. 4.5). Стенд виготовлено у вигляді горизонтального резервуара із обичайок різнотовщинних труб зовнішнім діаметром 1020 мм, зварених між собою багатошаровими кільцевими швами і привареними півсферичними днищами. Резервуар заповнено водою і за допомогою насосної станції в ньому створюється внутрішній тиск P заданого рівня.

Створення надлишкового тиску здійснюється за допомогою об'ємного насосного агрегату МП - 150. Величину тиску в резервуарі контролюють



Рис. 4.5. Установка для моделювання НДС в зоні різнотовщинних зварних з'єднань трубопроводів

зразковим манометром МО з класом точності 0,4. Зменшення тиску в резервуарі досягається за допомогою зворотнього переливання води у накопичувальний бачок. Насосна станція дозволяє досягати внутрішніх тисків в резервуарі до 15 МПа. Циліндричні котушки до експериментальної установки комплектували з аварійного запасу труб з різних марок поширених трубних сталей.

4.2.2. Методика визначення залишкових напружень в зоні зварних з'єднань з використанням електронної спекл-інтерферометрії. Визначення залишкових напружень в зоні зварного шва, які є суттєво неоднорідні як по поверхні, так і за товщиною з'єднання проводили з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії [94]. Цей метод

базується на здатності лазерного випромінювання створювати певну спекл-структуру при відбиванні від поверхні, що досліджується. Таким чином кожна точка поверхні об'єкту розсіює деяку кількість світла. За рахунок когерентності лазерний пучок розсіяний від однієї з точок поверхні досліджуваного об'єкту, інтерферує зі світлом, яке розсіяне будь-якою іншою точкою об'єкту і створює спекл-картину. При переміщенні, що відбувається за рахунок деформації будь-якої точки ділянки, що досліджується виникає зміна спекл-картини. За різницею двох спекл-картин можна отримати інтерференційну картину смуг та обрахувати зміну координати точки між двома станами.

Оптична схема спекл-інтерферометра зображена на рис. 4.6, де поверхня об'єкту, що досліджується освітлюється під одним і тим же кутом θ симетрично в двох напрямках 1, а спостереження відповідно в напрямку 2. Це дозволяє визначити компоненти вектора переміщень, які відображають деформації об'єкта 3 в його площині. Дослідження показали, що оптимальне значення кута θ рівне 57° [81].

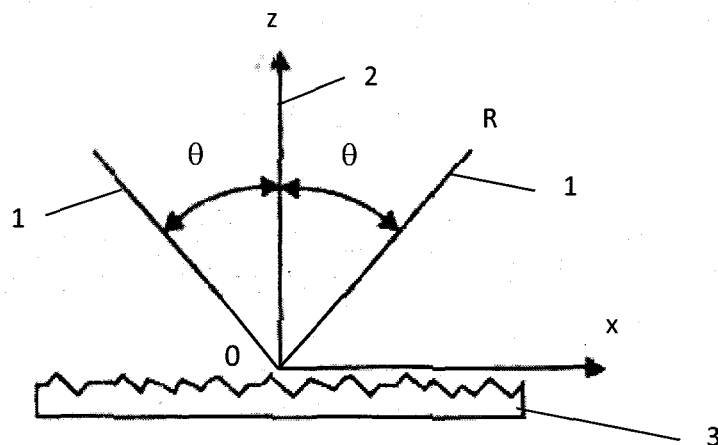


Рис. 4.6. Оптична схема спекл-інтерферометра: 1 і 2 – відповідно напрямки освітлення і спостереження; 3 – ділянка об'єкту, що досліджується

Величини переміщень U_r і U_0 , що виникають в результаті пружного розвантаження напружень, $\sigma_{\alpha\alpha}$, $\sigma_{\beta\beta}$, σ_{xy} від кута θ (рис. 4.7), на деякій

відстані від центра просвердленого ненаскрізного отвору, визначаються за формулами [81].

$$U_r(r, \theta) = \bar{A}(\sigma_{\alpha\alpha} + \sigma_{\beta\beta}) + \bar{B}[(\sigma_{\alpha\alpha} - \sigma_{\beta\beta}) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta], \quad (4.15)$$

$$U_\theta(r, \theta) = \bar{C}[(\sigma_{\alpha\alpha} - \sigma_{\beta\beta}) \sin 2\theta - 2\tau_{xy} \cos 2\theta], \quad (4.16)$$

де $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ – емпіричні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей матеріалу, відстані від центра отвору до точки вимірювання та його діаметра і не залежать від виду напруженого стану. Оскільки величини $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ не залежать від виду напруженого стану то їх значення обчислені для одновісного напруженого стану повинні бути дійсні і для двохвісного напруженого стану дослідного зразка. Це і було покладено в основу

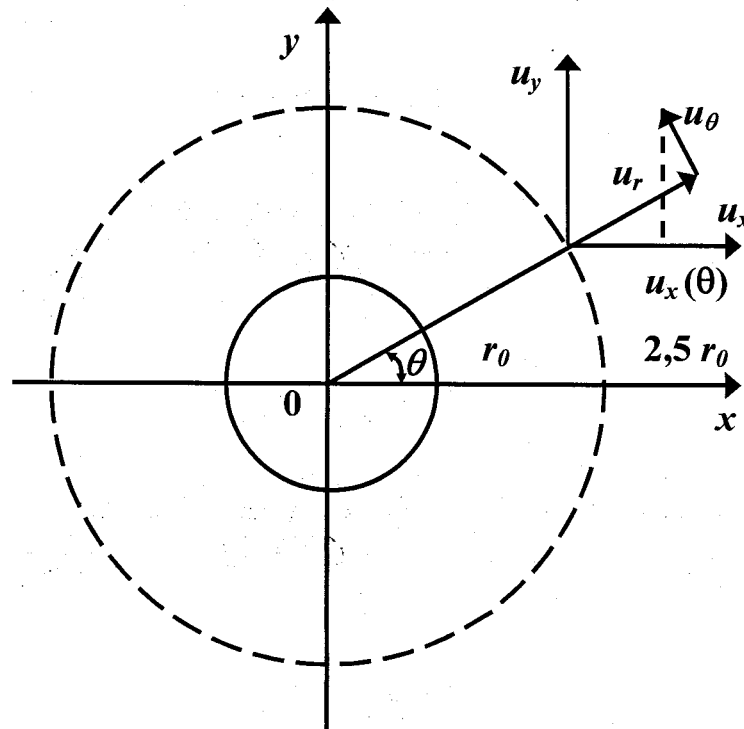


Рис. 4.7. Схема визначення складових вектора переміщень при пружньому розвантаженні залишкових напружень за допомогою просвердлювання отворів

експериментального визначення емпіричних коефіцієнтів \bar{A}, \bar{B} і \bar{C} . Також були визначені величини коефіцієнтів $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ на основі математичного

моделювання НДС в околі отвору, який висвердлений в напруженому матеріалі з використанням методу скінченних елементів [81, 95].

Отримані результати засвідчили, що величини емпіричних коефіцієнтів отримані за допомогою методу скінченних елементів добре узгоджуються із значенням цих коефіцієнтів, які були отримані експериментальним шляхом. Проведені експерименти показали, що відхилення величин напружень, які визначені за допомогою спекл-інтерферометричного методу, від розрахункових не перевищують 5 % границі плинності матеріалу досліджуваного зразка [94].

4.2.3. Визначення залишкових напружень в зоні різнотовщинних зварних з'єднань труб за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу. Спекл-інтерферометричний вимірювальний комплекс для визначення напружень в зоні різнотовщинних зварних з'єднань труб приведений на рис. 4.8 та 4.9, де 1 – спекл-інтерферометр; 2 – CCD - камера; 3 – лазер; 4 – блок живлення лазера; 5 – світловод; 6 – цифрова приставка «Dock-Station»; 7 – персональний комп'ютер «Note-book»; 8 – дрель «PROXXON» з підставкою для свердління; 9 – блок живлення до дрелі.

Малогабаритний спекл-інтерферометр 1 з оптичною системою, яка включає направляючі дзеркала, коліматор, півпрозоре ділильне дзеркало і дифузно-розсіюючу пластину, що формує опорний і предметний світлові пучки. Спекл-інтерферометр обладнаний опорно-юстувальним пристроєм у вигляді основи з системою отворів з різьбою і трьох гвинтів з конусною поверхнею, що дозволяє надійно встановлювати спекл-інтерферометр на плоску, циліндричну чи сферичну поверхні з різними радіусами кривини. Відбита світлова хвиля, яка характеризує вихідний напружено-деформований стан трубопроводу контролюється за допомогою CCD-камери 2 з роздільною здатністю 768 x 576 пікселів. За допомогою цифрової приставки «Dock-Station» 6 зафіксований CCD-камерою оптичний сигнал перетворюється в цифровий і вводиться в пам'ять персонального комп'ютера «Note-book» 7.

Світловий промінь створюється лазером 3 з довжиною хвилі $\lambda = 632$ нанометри і потужністю 10 міліВольт. Направлений промінь через світловод 5 подається на оптичну систему спекл-інтерферометра 1. Щоб збільшити точність виконання ненаскрізного отвору в тілі труби дрель 9 встановлюють на підставку 10 з опорно-юстувальним пристроєм. Для точного встановлення глибини свердління ненаскрізного отвору передбачено набір циліндричних шаблонів з різною висотою і спеціальний упорний стержень, який фіксує максимальну подачу свердла.

Визначення залишкових напружень в зоні кільцевого зварного шва на зовнішній поверхні дослідної котушки (див. рис. 4.10) проводили в наступній послідовності. Спекл-інтерферометр встановлювали на попередньо підготовленій і розміченій з певним кроком по обидві сторони від зварного кільцевого багат шарового шва ділянці труби (рис. 4.10). Відбита світлова хвиля, яка характеризує вихідний напружено-деформований стан контролюючої ділянки, за допомогою CCD-камери перетворювалась в цифровий сигнал і вводилась в пам'ять персонального комп'ютера. На відстані 65 мм від осі шва в сторону оболонки з товщиною стінки $2h_1 = 10$ мм просвердлювали ненаскрізний отвір діаметром $d = 2$ мм і глибиною $h^* = 2$ мм. Струменем стиснутого повітря звільняли отвір і контролюючу поверхню котушки від стружки і пороху. Після чого встановлювали спекл-інтерферометр у відповідності до положення, яке він займав у випадку вихідного стану, щодо розміщення відносно осі шва під час першої спроби. Після пружнього розвантаження напружень, яке обумовлене висвердлюванням ненаскрізного отвору, відбита світлова хвиля аналогічно опрацьовування двох спекл-картин, які були отримані до і після локального пружнього розвантаження залишкових напружень обумовленого висвердлюванням ненаскрізного отвору, в тілі труби на моніторі фіксувалась інтерференційна картина смуг в околі отвору. На основі отриманої



Рис. 4.8. Загальний вигляд спекл-інтерферометричного вимірювального комплексу

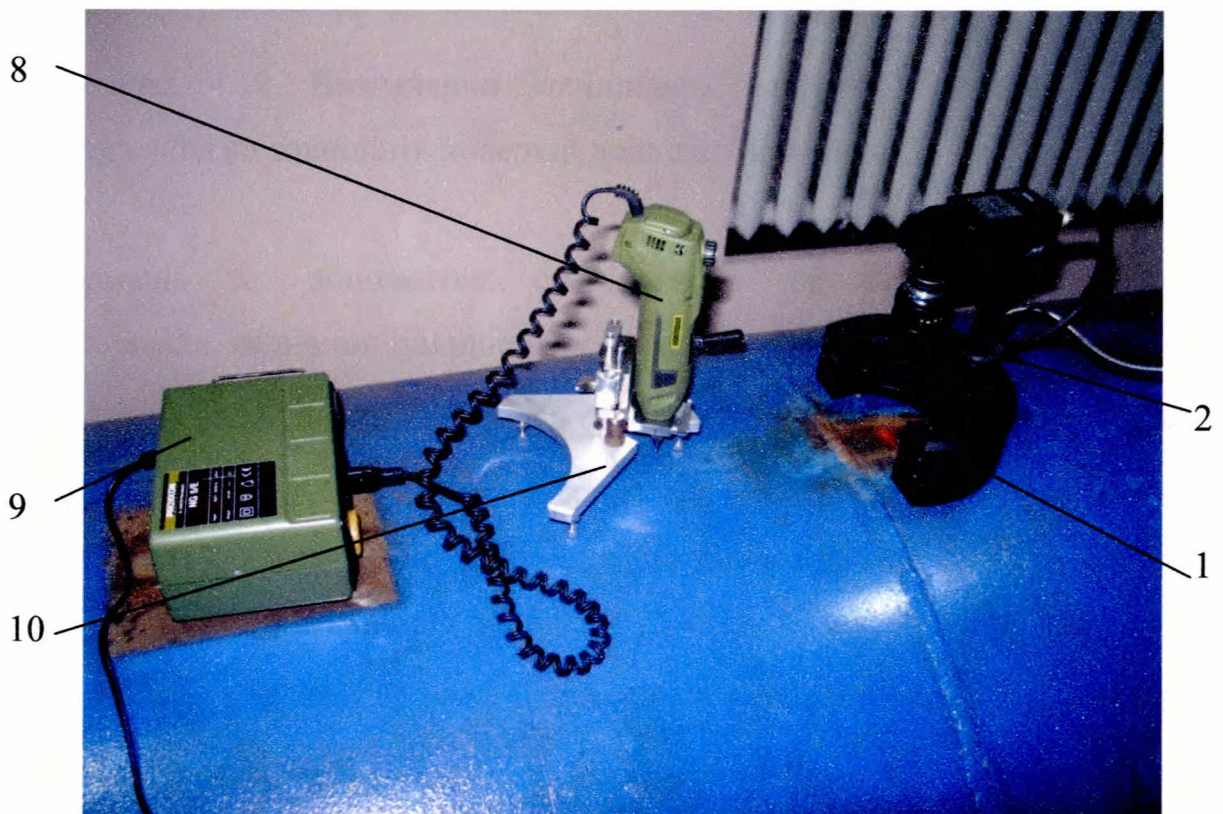


Рис. 4.9. Спекл-інтерферометр і дрель з підставкою для свердління



Рис. 4.10. Визначення залишкових напружень в зоні кільцевого зварного шва на зовнішній поверхні дослідної котушки

інформації за допомогою спеціального програмного забезпечення обчислювали величини залишкових напружень в контролюючій точці біля кільцевого зварного шва котушки в осьовому $\sigma_{\alpha\alpha}$ і коловому $\sigma_{\beta\beta}$ напрямках.

Згідно з програмою проведення експерименту аналогічно визначали осьові і кільцеві залишкові напруження в зоні вище вказаного зварного шва при наступних відстанях від осі шва: - 25 мм, - 15 мм, - 10 мм, + 10 мм, + 15 мм, + 25 мм, + 45 мм, + 65 мм. Отримані залежності осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в функції відстані від осі розглянутого шва показані на рис. 4.11.

В роботі також визначали вплив опресування на зміну залишкових напружень в зоні кільцевого різнотовщинного зварного з'єднання дослідного стенду (рис. 4.12). Перевіряли стикове зварне з'єднання з товщинами стінок труб, що з'єднується відповідно $2h_1 = 10$ мм і $2h_2 = 14$ мм. Матеріал сталь 17Г1С, основні механічні характеристики і хімічний склад згідно сертифікатів на виготовлення наведені в табл. 4.1 і 4.2.

Дослідження величин осьових і кільцевих залишкових технологічних напружень в зоні стикового різнотовщинного зварного шва проводили згідно вище описаної методики за допомогою спекл-інтерферометричного комплексу. Вимірювання проводили при внутрішньому тиску $P = 0$ до опресування резервуару дослідного стенду і після опресування. Під час опресування тиск в резервуарі досягав 6 МПа. Отримані залежності осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в функції відстані від осі розглянутого шва приведені на рис. 4.12 (до опресування резервуара) і рис. 4.13 (після опресування резервуара).

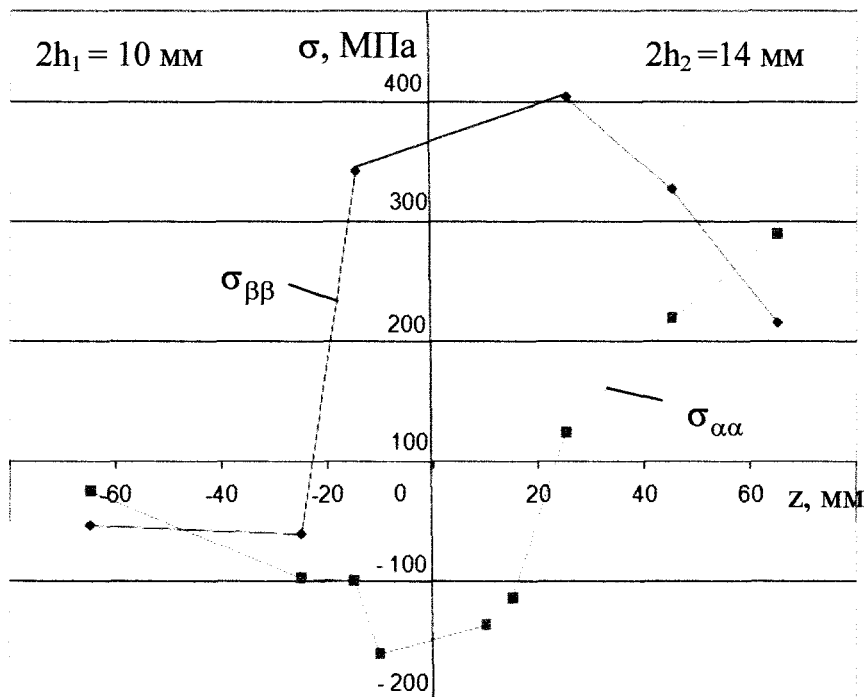


Рис. 4.11. Залежності осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в функції відстані від осі шва на зовнішній стороні дослідної котушки

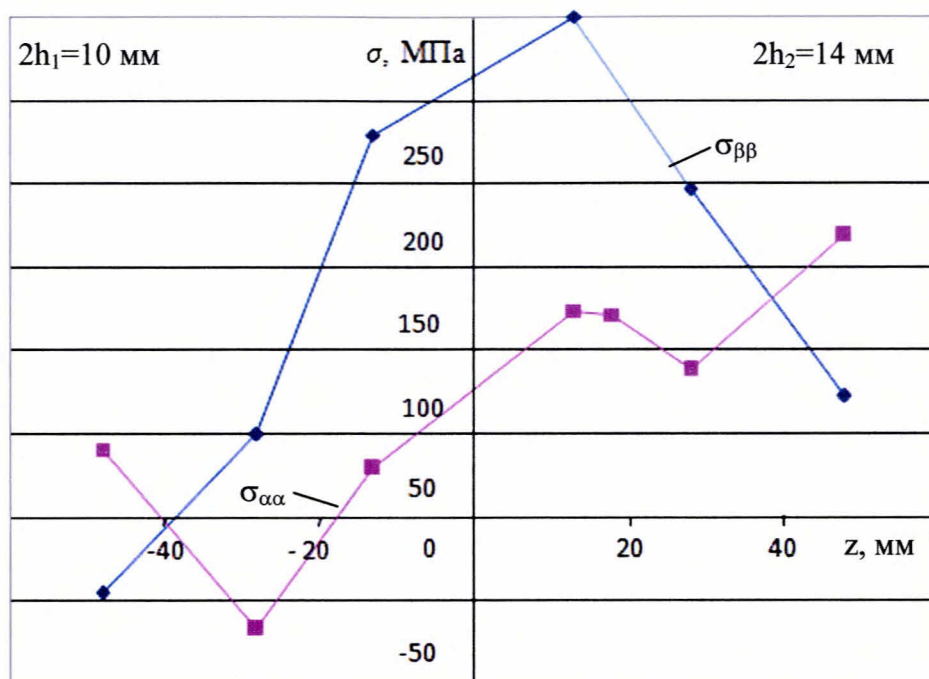


Рис. 4.12. Залежності осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в зоні різнотовщинного зварного з'єднання дослідного ственду до його опресування

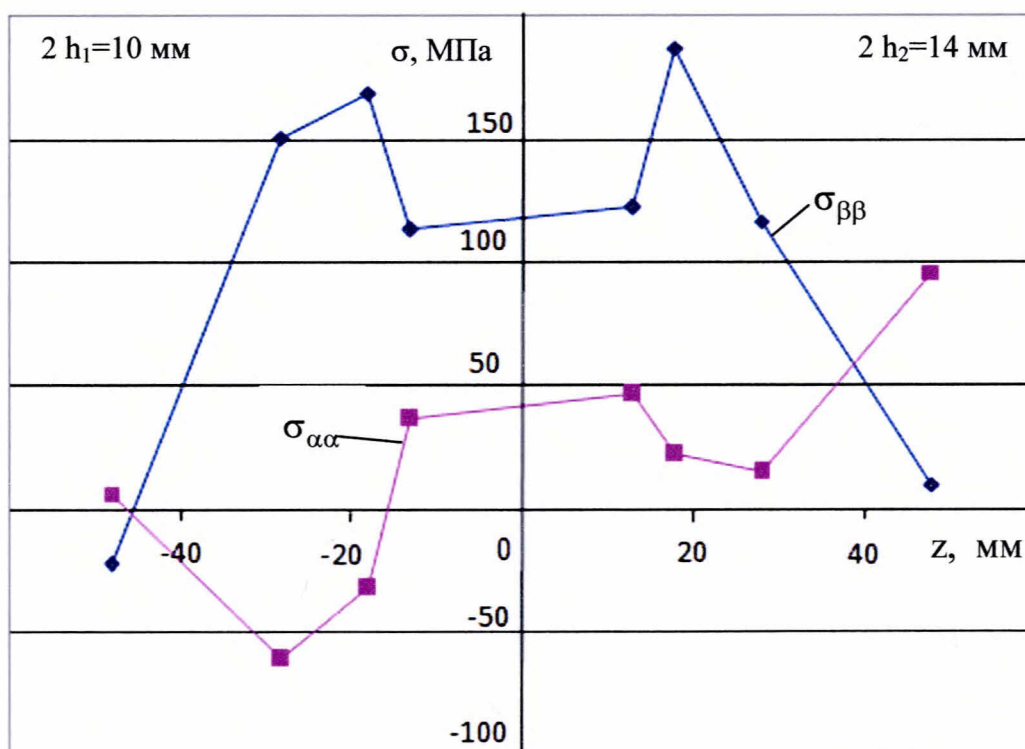


Рис. 4.13. Залежності осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ залишкових напружень в зоні різнотовщинного зварного з'єднання дослідного ственду після його опресування

4.2.4. Визначення усереднених характеристик залишкових напружень в зоні різновтовщинних зварних з'єднань труб електромагнітним методом. Для отримання експериментальних даних використовували вимірювальний прилад «MESTR - 411», який призначений для експлуатації у стаціонарних та польових умовах. Конструкція приладу «MESTR - 411» з чотирьохполюсним накладним електромагнітним перетворювачем трансформаторного типу запатентовано в Україні [105, 145]. Прилад «MESTR - 411» фіксує результати вимірювань за допомогою цифрової індексації трьох розрядів і вказує знак (+, -). Аналіз отриманих експериментальних даних проводили згідно методики вимірювань механічних напружень електромагнітним методом, яка затверджена комітетом з стандартизації ТК-78 [105]. Додатково враховувався вплив неоднорідності напружень по площі контакту давача з трубою та вплив структурних змін на магнітну проникність металу в зоні термічних перетворень. Тарування вимірювального тракту приладу «MESTR -411» проводили при двовісному НДС на експериментальній установці рис. 4.14. шляхом зміни внутрішнього тиску в резервуарі від 1 до 6 МПа.

В процесі навантаження для кожного приросту напружень визначали покази приладу «MESTR -411». За результатами вимірювань знаходили тарувальний коефіцієнт T , як середній приріст напружень на одиницю показів приладу:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta N_i}. \quad (4.17)$$

Тут ΔN_i – приріст показів приладу, що відповідає приросту напружень $\Delta\sigma_i$; n – число вимірювань при навантаженні.

Вимірювання проводили в наступній послідовності. На циліндричній поверхні резервуара дослідної установки встановлювали спеціальну підставку в якій розміщали давач трансформаторного типу і



Рис. 4.14. Тарування вимірювального тракту приладу «MESTR -411» на експериментальній установці

знімали покази приладу вздовж і перпендикулярно до осі кільцевого шва відповідно N_{1i} і N_{2i} ($i=1, n$). Далі східчасто збільшуючи навантаження змінюючи тиск P в резервуарі з кроком $\Delta P = 1 \text{ МПа}$ фіксували ці покази приладу. При цьому вимірювання проводили декілька разів і визначали їх середнє значення. Потім розраховували зміну магнітного потоку, викликаного напруженням за формулою

$$N_i = \frac{1}{2} [(N_{1i} - N_{2i}) - (N_{10} - N_{20})], \quad i = 1, n. \quad (4.18)$$

Тут N_{10}, N_{20} - початкові покази приладу, що враховують вплив текстури для даного трубопроводу із даної марки сталі. Для визначення початкових показів приладу доцільно використовувати аварійний запас труб, або частини труб, які вирізані під час ремонтних робіт.

В даній роботі для визначення тарувального коефіцієнта T використано циліндричну оболонку із сталі 17Г1С (рис. 4.14), яка була вирізана із аварійного запасу.

Результати тарування приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Визначення тарувального коефіцієнта

№ п/п	P , МПа	$\sigma_{\beta\beta} - \sigma_{\alpha\alpha}$ (МПа)	$\Delta\sigma_i$ (МПа)	N_i	ΔN_i (ΔA_i)	$T_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta N_i}$
1	1,0	17,96	-	18	-	-
2	2,0	35,92	17,96	32	14	1,283
3	3,0	53,88	17,96	49	17	1,056
4	4,0	71,84	17,96	65	16	1,123
5	5,0	89,80	17,96	80	15	1,197
6	6,0	107,76	17,96	96	16	1,123

Для даної сталі і встановленої чутливості приладу «MESTR-411» середнє значення тарувального коефіцієнта $T = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 T_i = 1,156$ МПа / на одиницю показів приладу.

Для урахування впливу структури металу труби на початкові покази вимірювань з аварійного запасу труб вирізали котушку і на ній почергово знімали покази приладу «MESTR-411» (рис. 4.15), коли давач розміщали перпендикулярно і паралельно до повздовжньої осі котушки відповідно N_{10} і N_{20} . Ці початкові значення показів приладу N_{10} і N_{20} використовували під час опрацювання експериментальних результатів згідно з виразом (4.18).

Визначення залишкових технологічних напружень в зоні



Рис. 4.15. Урахування впливу структури металу труби на початкові покази вимірювань приладу „MESTR - 411”

різновтовщинного зварного з'єднання резервуара дослідної установки проводили наступним чином. Спочатку на циліндричну поверхню труби

наносили п'ять однаково віддалених одна від одної прямих: перша – в напрямку верхньої твірної і чотири – паралельно першій прямій і симетрично відносно неї. Далі відмічали точки перетину цих ліній з колами перерізів, що симетрично розміщались на деякій відстані від кільцевого зварного шва. В зафіксованих таким чином точках проводили чотирикратно вимірювання і результати усереднювали.

Фрагмент вимірювання зміни магнітної проникності, яка викликана залишковими і експлуатаційними напруженнями в зоні стикового різнотовщинного колового зварного з'єднання дослідного стенду за допомогою приладу «MESTR - 411» показано на рис. 4.16.

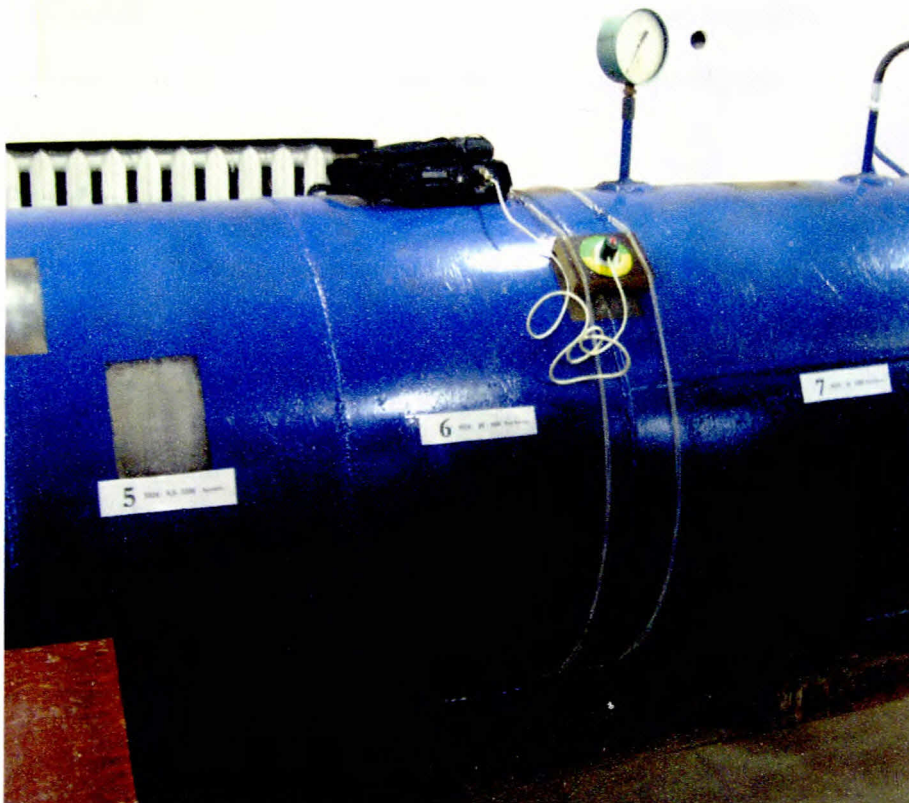


Рис. 4.16. Дослідження залишкових напружень в зварних з'єднаннях резервуара дослідного стенду

Результати обробки отриманих експериментальних даних наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результати обробки експериментальних вимірювань, проведених на дослідній установці

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. 4.4. наведені усереднені значення за чотирма вимірами.

4.2.5. Розв'язання оберненої задачі і обчислення залишкових напружень у різнотовщинному кільцевому зварному з'єднанні трубопроводу. На основі експериментальних даних, отриманих в п. 4.2.4 шляхом мінімізації функціоналу нев'язки g визначили параметри залишкових деформацій. Обчислено розподіл зумовлених ними напружень в зоні різнотовщинного зварного з'єднання труб з такими параметрами: $D_{\text{зов}} = 1020$ мм, $2h_1 = 10$ мм, $2h_0 = 12$ мм, $2h_2 = 14$ мм, $z_{11} = -48$ мм, $z_{12} = 50$ мм, $z_{21} = -30$ мм, $z_{22} = 65$ мм, $s_{11} = 2$, $s_{12} = 3$, $s_{21} = 1$, $s_{22} = 1$, $\mathbf{E}_1^* E = 3,6 \cdot 10^2$ ($\mathbf{E}_1^* = 1,8 \cdot 10^{-3}$, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа), $\mu = 0,3$, $z^* = 9,6$, $m_1 = 0,0625$, $m_2 = 0,075$, $k = 2$.

На рис. 4.17. наведені графічні залежності залишкових кільцевих напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$, які визначені експериментально з використанням методу спекл-інтерферометрії; усередненої за площею давача різниці головних

напружень σ_+^E , визначеної за допомогою електромагнітного методу і кільцеві напруження $\sigma_{\beta\beta}$, які отримані розрахунково-експериментальним методом.

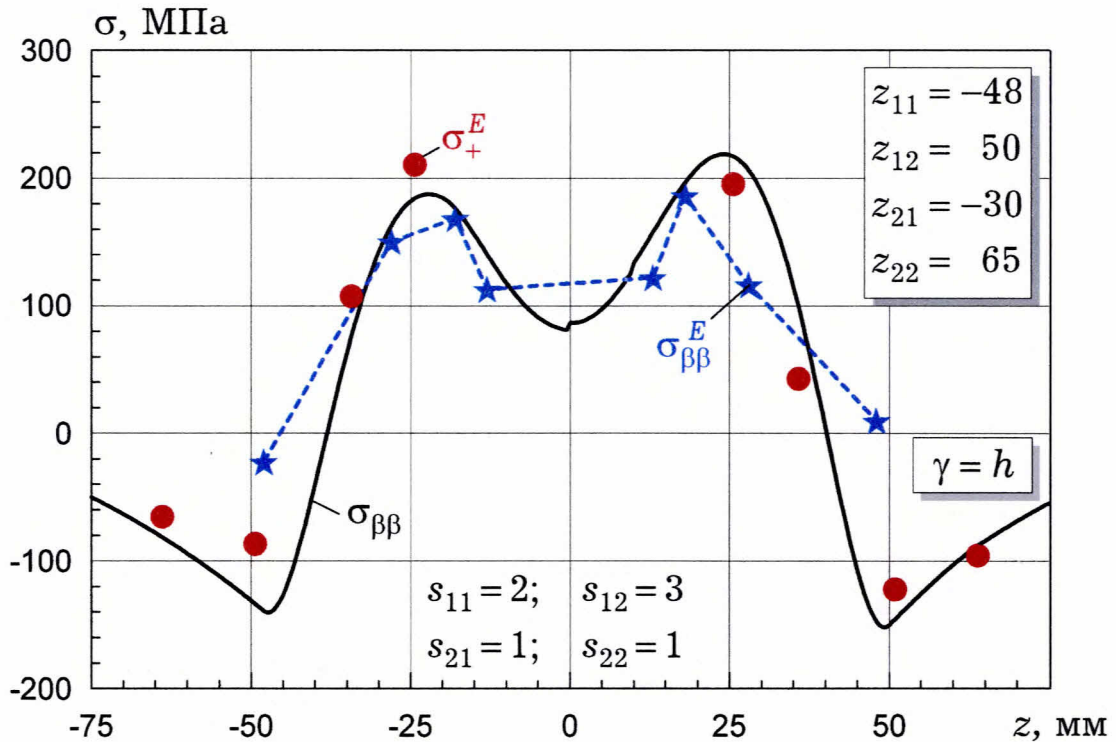


Рис. 4.17. Графічні залежності кільцевих напружень $\sigma_{\beta\beta}^E$ і усередненої різниці головних напружень σ_+^E , отримані експериментально і кільцеві напруження $\sigma_{\beta\beta}$, які отримані розрахунково-експериментальним методом (z_{ij} , мм)

Як видно із рис. 4.17 максимальні відхилення експериментальних результатів від теоретичних не перевищують 12 %. Отримані дані свідчать про задовільне якісне і кількісне узгодження теоретичних і експериментальних результатів.

На рис. 4.18. наведені криві розподілу колових залишкових напружень за товщиною труби в поперечних перерізах на осі шва ($z = 0$) і в зонах

максимальних напружень ($z = -25$ мм, $z = 25$ мм) для цього ж різнотовщинного зварного з'єднання дослідного стенду.

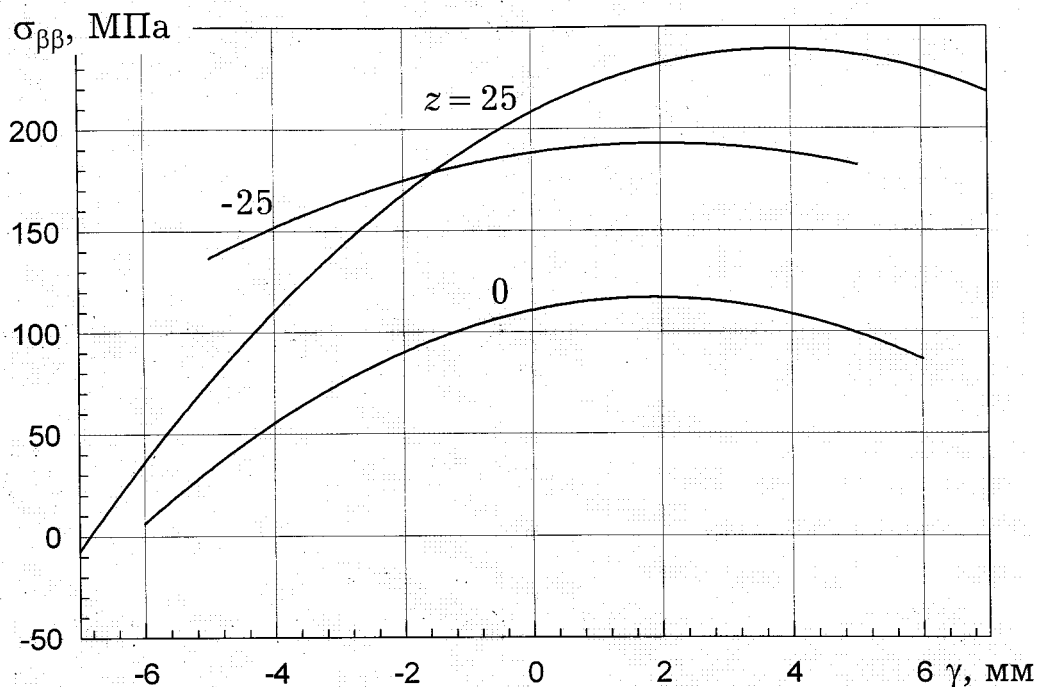


Рис. 4.18. Розподіл кільцевих залишкових напружень за товщиною труби в зоні різнотовщинного зварного з'єднання дослідного стенду

Як видно із графіків, наведених на рис. 4.18, колові напруження $\sigma_{\phi\phi}$ досягають максимальних значень в глибинних шарах стінки труби.

Таким чином запропонована методика визначення залишкових напружень, компактність вимірювального обладнання і оперативність комп'ютерної обробки отриманої інформації відкривають нові можливості для проведення діагностики зварних з'єднань магістральних трубопроводів тривалої експлуатації.

Висновки до розділу 4

1. Отримано формули для розрахунку прогинів і напружень в трубах різнотовщинного зварного з'єднання, викликаних дією внутрішнього тиску. Проведено числовий аналіз і побудовано графіки прогину та розподілу колових і осьових напружень від тиску на зовнішніх і внутрішніх поверхнях труб в зоні зварного з'єднання.
2. Наведено характеристики розробленого устаткування для експериментального визначення характеристик НДС в зоні зварних з'єднань різнотовщинних труб. Використавши метод електронної спекл-інтерферометрії, визначено залишкові напруження $\sigma_{\beta\beta}^E$ і $\sigma_{\alpha\alpha}^E$ на зовнішніх поверхнях зварного з'єднання труб з товщинами стінок 10 мм і 14 мм. Для цього ж з'єднання електромагнітним методом проведено вимірювання усередненої різниці головних напружень σ_+^E .
3. На основі експериментальних даних, шляхом мінімізації функціоналу нев'язки g визначено параметри залишкових деформацій і обчислено розподіл зумовлених ними напружень в зоні зварного з'єднання.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБ З ДЕФЕКТАМИ ТИПУ ТРІЩИН

Магістральні трубопроводи належать до споруд, які повинні задовольняти високі вимоги безпечної експлуатації, що забезпечуються відповідними заходами, передбачуваними при проектуванні і особливо в процесі їх експлуатації. Серед експлуатаційних заходів слід окремо виділити заходи, пов'язані з оцінкою залишкового ресурсу безпечної експлуатації трубопроводів.

Однією із характеристик особливостей зварних з'єднань з позиції міцності є залишкові напруження, які можуть відігравати значну роль в умовах крихкого руйнування, перемінних навантажень, корозійних руйнувань. Оскільки навіть високий відпуск зварної конструкції зазвичай залишає в зоні зварних з'єднань незрелаксовані напруження на рівні 50...120 МПа, то за експлуатаційних навантажень при оцінці ресурсу зварних з'єднань ними не можна нехтувати [75]. Нижче для оцінки впливу незрелаксованих залишкових напружень на статичну міцність зварного з'єднання різнотовщинних труб з дефектом типу тріщини використано діаграму оцінки руйнування (ДОР або FAD), яка ґрунтується на двопараметричному критерії R6 [92, 157, 168]. Такий підхід, зокрема, покладено в основу розробки відомчих будівельних норм України "Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами" [125].

5.1. Схематизація поверхневих дефектів суцільності матеріалу труби

Важливою в ідентифікації дефектів з точки зору використання її результатів при прогнозуванні ресурсу безпечної експлуатації є методика схематизації виявлених дефектів відповідними дефектами канонічної форми, які зручно описати математично. Нижче наведено правила схематизації для

поверхневих одиноких (невзаємодіючих) дефектів, виявлених тими чи іншими засобами контролю [74, 133].

При схематизації поверхневих дефектів розглядають наступні випадки:

1. Задана площа дефекта S_d (рис. 5.1). Дефект розглядається як півеліптична тріщина з півосями

$$a = 0,54\sqrt{S_d}, \quad c = 2,5a. \quad (5.1)$$

Мала піввісь a розташовується по нормалі до вільної поверхні (рис. 5.1), а піввісь c в площині, нормальній до дії розтягальних максимальних напружень.

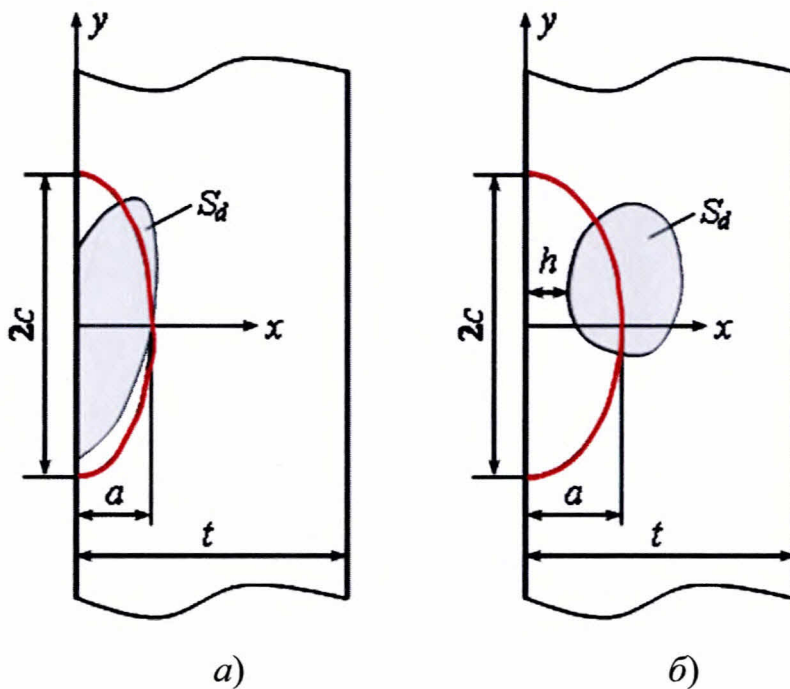


Рис. 5.1. Схема розташування поверхневих (а) і підповерхневих (б) дефектів з поверхневими півеліптичними тріщинами

При виборі розрахункової схеми до поверхневих дефектів відносять деякі приповерхневі, для яких мінімальна відстань h від контура дефекта до найближчої вільної поверхні (рис. 5.1б) задовольняє умову

$$0 < h < \frac{1}{9} \frac{\sqrt{S_d}}{2\pi}, \quad (5.2)$$

де a – розмір півосі півеліптичної тріщини, за допомогою якої описується дефект. Тоді

$$a = 0,54\sqrt{S_d + 1,4h\sqrt{S_d}}, \quad c = 2,5a. \quad (5.3)$$

2. Задані значення площі дефекту S_d і його протяжність вздовж вільної поверхні Δl (рис. 5.2). Дефект зображається півеліптичною тріщиною з півосями

$$c = \frac{\Delta l}{2}, \quad a = 1,45\frac{S_d}{\Delta l}. \quad (5.4)$$

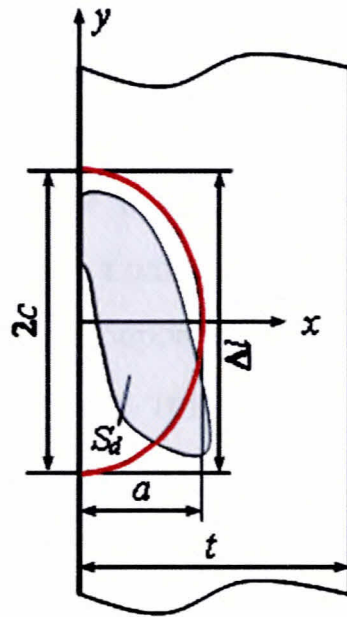


Рис. 5.2. Схематизація дефекта площею S_d півеліптичною тріщиною.

Якщо у вказаному випадку дефект підповерхневий, а величина $h < a/9$, то

$$a = 1,45\frac{S_d}{\Delta l} + 1,27h. \quad (5.5)$$

Для $a > 0,7t$ дефекти вважаються наскрізними.

Якщо $a > c$, то приймається

$$a = c = 0,85\sqrt{S_d}, \quad (5.6)$$

а у випадку коли задана і величина h , то

$$a = c = 0,85\sqrt{S_d + 0,8\Delta l h}. \quad (5.7)$$

В роботах [77, 133] наведено також схематизацію, крім одиноких, парних і групових дефектів різного типу.

5.2. Розрахунок на статичну міцність трубопроводу з дефектами в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб

5.2.1. Напруження в трубопроводах від зовнішнього навантаження і розрахункові характеристики матеріалу.

Для розрахунку на міцність трубопроводу потрібно визначити напруження в трубах, зумовлені дією функціональних та природно-кліматичних навантажень [110, 125]. При їх визначенні можуть бути використані програмні комплекси, аналітичні та чисельні методи розрахунку, але при цьому слід дотримуватись правила виділення розрахункових ділянок з однорідними умовами експлуатації, які є типовими для магістрального трубопроводу.

При обчисленні напружень у трубопроводі потрібно дотримуватись прийнятими в нормативних документах рекомендаціями і поняттями. Зокрема, номінальні колові (кільцеві напруження) σ_p від внутрішнього тиску обчислюються за формулою

$$\sigma_p = \frac{nPD_{\text{вн}}}{2\delta_n}, \quad (5.8)$$

де n – коефіцієнт надійності за навантаженням (внутрішній тиск), який згідно з СНиП 2.05.06–85 [134] дорівнює для газопроводів – 1,1; для нафтопроводів та нафтопродуктопроводів діаметром 700–1200 мм з проміжковими НПС – 1,15; а без проміжкових НПС та діаметром меншим ніж 700 мм – 1,1; для гідровипробовувань – 1; P – внутрішній тиск, МПа; $D_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр труби, м; δ_n – номінальна товщина стінки, м.

Максимальні і мінімальні осьові напруження σ_x^+ та σ_x^- зумовлені згинальними моментами M_y і M_z та поздовжньою осьовою силою N_x обчислюється за допомогою виразів:

$$\sigma_x^+ = \frac{1}{\pi D_{\text{вн}} \delta_{\text{н}}} \left[\frac{2}{D_{\text{вн}}} \sqrt{M_y^2 + M_z^2} + N_x \right], \quad (5.9)$$

$$\sigma_x^- = -\frac{1}{\pi D_{\text{вн}} \delta_{\text{н}}} \left[\frac{2}{D_{\text{вн}}} \sqrt{M_y^2 + M_z^2} + N_x \right], \quad (5.10)$$

де M_y – згинальний момент відносно осі y поперечного перерізу труби, МНм; M_z – згинальний момент відносно осі z поперечного перерізу труби, МНм; N_x – осьове зусилля в поздовжньому напрямку труби x , МН. При цьому слід враховувати для кожного виду навантаження (власна вага, внутрішній тиск, тиск ґрунту, снігове навантаження тощо), яке викликає силові фактори M_y , M_z і N_x , відповідні коефіцієнти надійності за навантаженням n .

Зокрема, для прямолінійних ділянок підземних та наземних в насипі трубопроводів за відсутності поздовжніх та поперечних переміщень трубопроводу ($M_y = M_z = 0$) поздовжні осьові напруження згідно з СНиП 2.05.06–85 [134] обчислюються за формулою:

$$\sigma_x^+ = \sigma_x^- = \sigma_x = -\alpha_T \Delta t E + \mu \frac{np D_{\text{вн}}}{2\delta_{\text{н}}}, \quad (5.11)$$

де α_T – коефіцієнт лінійного теплового розширення металу труб, град⁻¹; Δt – температурний перепад між температурою монтажу та температурою експлуатації; E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона.

При розрахунку на міцність трубопроводів для отримання неперервних розв'язків при переході від бездефектного матеріалу до матеріалу з дефектом рекомендовано використовувати єдину систему коефіцієнтів надійності, що впливає з умови рівності допустимих напружень для труби з дефектом нульових розмірів та бездефектної труби. Коефіцієнти умов роботи m , надій-

ності за матеріалом K_1 та надійності за призначенням K_H визначаються за СНиП 2.05.06–85 [134].

В розрахунках на міцність трубопроводів з дефектами використовується інтегральний коефіцієнт надійності

$$K = \frac{K_1 K_H}{m}. \quad (5.12)$$

Для визначення розрахункових характеристик матеріалу рекомендовано використовувати менше із двох значень (нормативне або фактичне) границі міцності σ_B , межі текучості σ_T та критичного значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{lc} . При цьому для трубопроводів тривалої експлуатації, перевага надається фактичним значенням механічних характеристик матеріалу.

Таким чином, розрахунковими характеристиками матеріалу є допустимі напруження R_1 , визначені за границею міцності матеріалу

$$R_1^* = \frac{\sigma_B}{K}, \quad (5.13)$$

допустимі напруження R_2 визначені за границею плинності матеріалу

$$R_2^* = \frac{\sigma_T}{K}, \quad (5.14)$$

та допустимий рівень критичного КІН K_{lc}^* , що обчислюється так:

$$K_{lc}^* = \frac{K_{lc}}{K}. \quad (5.15)$$

5.2.2. Критерій статичної міцності трубопроводу з дефектом типу тріщин. Для розрахунку коефіцієнтів запасу міцності ділянки трубопроводу з дефектами за статичного навантаження прийнято діаграму оцінки руйнування (ДОР), яка є граничною кривою, що визначає межу міцності між безпечним та небезпечним станами елементів конструкцій та споруд. ДОР ґрунтується на двопараметричному критерії R6, який виражає умову непорушення рівноваги тріщиноподібного дефекту у вигляді функції від двох параметрів [157, 168]

$$f(K_r, L_r) = 0, \quad (5.16)$$

де K_r характеризує міру наближення до крихкого руйнування в деякій точці в зоні тріщиноподібного дефекту, а L_r – міру наближення до в'язкого руйнування. Параметри K_r і L_r – комплексні і включають характеристики напружено-деформованого стану, форми і розміри дефекту, а також властивості матеріалу, що визначають опір матеріалу відповідно крихкому і в'язкому руйнуванню.

Існують різні подання функцій (5.16), обґрунтовані головним чином на узагальненні експериментальних даних. Зокрема, в роботах [157, 168] показано, що для багатьох конструкційних сталей експериментальні дані достатньо добре апроксимуються залежністю

$$\begin{cases} K_r(L_r) = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)], & L_r \leq L_r^{\max}, \\ K_r(L_r) = 0, & L_r > L_r^{\max}, \end{cases} \quad (5.17)$$

де $K_r = \frac{K_1}{K_{1c}}$; $L_r = \frac{P}{P_L(l, \sigma_T)} = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{\sigma_T}$; K_1 – коефіцієнт інтенсивності напружень на контурі тріщиноподібного дефекта; K_{1c} – опір матеріалу крихкому руйнуванню (критичне значення K_1); P – параметр, прикладеного номінального навантаження в зоні дефекта; $P_L(l, \sigma_T)$ – граничне значення P за розмірів де-

фекта l і номінальних напруженнях, відповідних σ_T – границі плинності матеріалу в цій зоні при якому виникає пластична нестійкість в зоні тріщини;

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{P}{P_L(l, \sigma_T)} \sigma_T, \quad L_r^{\text{max}} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T}. \quad (5.18)$$

Такий підхід заслуговує широкого застосування для зварних з'єднань [74, 160].

При цьому характерним є те, що залишкові зварювальні напруження не впливають на величину σ_{ref} , оскільки встигають майже повністю релаксуватися до появи пластичної нестійкості. Тому в роботі [157] рекомендують при розрахунку параметра L_r залишкові напруження не враховувати.

Для оцінки статичної міцності діючих магістральних трубопроводів з дефектами нормативними документами [125] рекомендовано ДОР будувати в координатах K_r та S_r , де $K_r = \frac{K_1}{K_{1c}^*}$; $S_r = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{R_2^*}$, а K_{1c}^* обчислюється за формулою (5.15).

Тоді, аналогічно (5.17), гранична крива статичної міцності в координатах K_r , S_r (рис. 5.3) описується виразом

$$\begin{cases} K_r(S_r) = (1 - 0,14S_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65S_r^6)], & S_r \leq S_r^{\text{max}}, \\ K_r(S_r) = 0, & S_r > S_r^{\text{max}}, \end{cases} \quad (5.19)$$

$$\text{де } S_r^{\text{max}} = \frac{R_2 + R_1}{2R_2} = \frac{\sigma_T + \sigma_B}{2\sigma_T}.$$

При цьому прийнято наступне означення напружень σ_{ref} : напруження σ_{ref} є уявною границею плинності жорстко-пластичного тіла, за якої тіло з дефектом знаходиться в граничному стані для заданої системи зовнішніх навантажень. На рис. 5.3 згідно з результатами досліджень, наведеними в [160], виділено також три зони, які описують різні механізми руйнування в залежності від того, в якій зоні в небезпечній області знаходиться оцінювана точка з координатами (K_r, S_r) :

- якщо точка належить зоні 1, то вид передбачуваного руйнування може бути пов'язаний з крихким;
- якщо точка належить зоні 3, то вид передбачуваного виходу з ладу є пластична нестійкість за обширної текучості з великими деформаціями;
- якщо точка належить зоні 2, то передбачуваним видом виходу з ладу є пружно-пластичне руйнування.

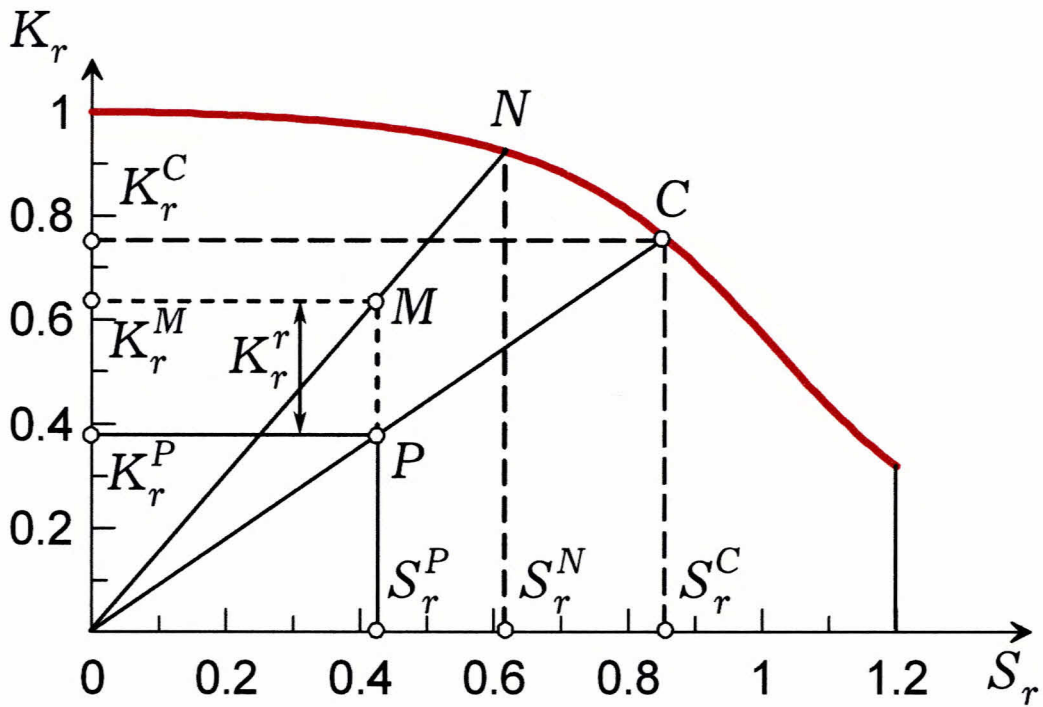


Рис. 5.3. Схематична діаграма оцінки руйнування за методикою R6

Використавши ДОР реальний коефіцієнт запасу міцності n можна визначити графічно або аналітично. Так, для розрахункової точки $P(S_r^P, K_r^P)$ коефіцієнт n визначається графічно через відношення відрізків

$$n = \frac{OC}{OP}. \quad (5.20)$$

Аналітично коефіцієнт запасу міцності n обчислюємо за формулою

$$n = \frac{S_r^C}{S_r^P}, \quad (5.21)$$

де S_r^C знаходимо із трансцендентного рівняння

$$\frac{K_r^P}{S_r^P} S_r^C = f(S_r^C), \quad (5.22)$$

$$f(y) = (1 - 0,14y^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65y^6)]. \quad (5.23)$$

Якщо дефект знаходиться в зоні зварного з'єднання, то врахувавши, що залишкові напруження в цій зоні не впливають на числове значення σ_{ref} , а відповідно і на величину S_r , вони зумовлять тільки зміну коефіцієнта інтенсивності напружень K_r , який подано у вигляді

$$K_r = K_r^P + K_r^r. \quad (5.24)$$

Тут K_r^P – коефіцієнт інтенсивності напружень, викликаний дією зовнішніх силових факторів, а K_r^r – залишковими напруженнями (відрізок PM на рис. 5.3).

Тоді для обчислення коефіцієнта запасу міцності з урахуванням залишкових напружень, який позначимо через n_r , отримаємо формулу

$$n_r = \frac{S_r^N}{S_r^P}, \quad (5.25)$$

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

$$\frac{K_r^P}{S_r^P} \left(1 + \frac{K_r^r}{K_r^P} \right) S_r^N = f(S_r^N). \quad (5.26)$$

Врахувавши формули (5.21), (5.25), запишемо вираз для обчислення відношення коефіцієнтів запасу міцності з урахуванням залишкових напружень n_r і без їх урахування n

$$\frac{n_r}{n} = \frac{S_r^N}{S_r^C}. \quad (5.27)$$

Цей вираз дозволяє проаналізувати вплив рівня залишкових напружень на n_r / n в залежності від різних значень параметра S_r .

Згідно з нормативними документами [125] в залежності від величини коефіцієнта запасу міцності ділянка трубопроводу з дефектом за критерієм статичної міцності вважається:

- працездатною, а дефект безумовно допустимим, якщо коефіцієнт запасу міцності $n_r \geq 1$;
- умовно непрацездатною, а дефект умовно недопустимим, якщо коефіцієнт запасу міцності задовольняє умову $1/k \leq n_r < 1$ (k – інтегральний коефіцієнт надійності);
- непрацездатною, а дефект безумовно недопустимим, якщо коефіцієнт запасу міцності $n_r < 1/k$.

При цьому у вказаних нормативних документах відзначено, що оцінка міцності магістральних трубопроводів може бути здійснена з використанням різних варіантів обчислення КІН та σ_{ref} , якщо методики розрахунків цих параметрів затверджені у відповідному порядку.

5.3. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень і напружень σ_{ref} в трубі з внутрішньою півеліптичною поверхневою тріщиною

5.3.1. Розрахунок коефіцієнтів інтенсивності напружень. Розглянемо ділянку магістрального трубопроводу, що містить зварне з'єднання різнотовщинних труб і знаходиться під дією внутрішнього тиску p та залишкових напружень. При цьому постулюємо наявність у стінці тоншої труби внутрішнього гострокінцевого приповерхневого дефекту, який можна змоделювати поздовжньою поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a і c (рис. 5.4).

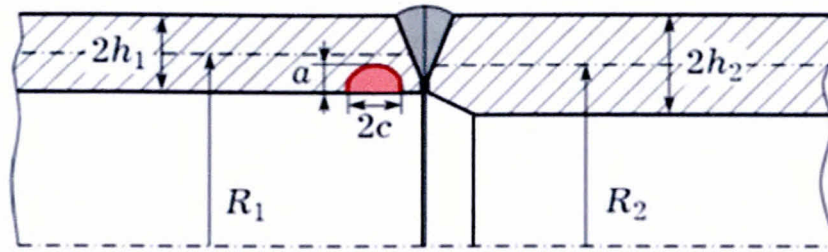


Рис. 5.4. Зварне з'єднання різнотовщинних труб з поздовжньою поверхневою тріщиною у внутрішній стінці тоншої труби

Використавши формули (5.21)–(5.27), обчислимо коефіцієнт запасу міцності такої ділянки трубопроводу і оцінемо вплив залишкових напружень на його величину.

Для розрахунку КІН і напружень σ_{ref} використаємо практичні рекомендації Американського інституту нафти [160]. Введемо такі позначення (рис. 5.5).

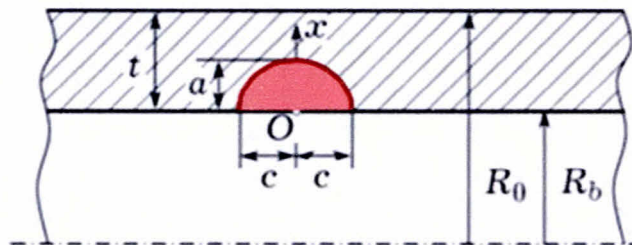


Рис. 5.5. Стінка труби з внутрішньою поздовжньою півеліптичною тріщиною

Положення довільної точки на контурі тріщини задається через кут $0 \leq \varphi \leq \pi$ (рис. 5.5). Якщо кут $\varphi = 0$ і $\varphi = \pi$, точки на контурі тріщини знаходяться на поверхні, а якщо $\varphi = \pi/2$, точка знаходиться на контурі тріщини, що відповідає максимальній її глибині.

У випадку, коли нормальні до берегів тріщини колові напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ задані поліноміальним многочленом

$$\sigma_{\beta\beta}(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4, \quad (5.28)$$

де x – координата вздовж нормалі до внутрішньої труби стінки, а t – її товщина (рис. 5.5), коефіцієнт інтенсивності напружень нормального відриву K_1 обчислюють за формулою

$$K_1 = \left[G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t}\right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (5.29)$$

Тут G_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) – коефіцієнти впливу,

$$Q = 1,0 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65}, \quad \frac{a}{c} \leq 1;$$

$$Q = 1,0 + 1,464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1,65}, \quad \frac{a}{c} > 1. \quad (5.30)$$

Коефіцієнт впливу G_0 і G_1 у випадку поздовжньої тріщини обчислюються за допомогою виразів

$$G_0 = A_{00} + A_{10} \beta + A_{20} \beta^2 + A_{30} \beta^3 + A_{40} \beta^4 + A_{50} \beta^5 + A_{60} \beta^6,$$

$$G_1 = A_{01} + A_{11} \beta + A_{21} \beta^2 + A_{31} \beta^3 + A_{41} \beta^4 + A_{51} \beta^5 + A_{61} \beta^6, \quad (5.31)$$

де $\beta = 2\varphi/\pi$ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$), A_{ij} – параметри, які отримані на основі апроксимації розв'язків задачі методом скінченних елементів і для широкого діапазону зміни геометрії труби розмірів тріщини:

$$0,2 \leq \frac{a}{t} \leq 0,8; \quad 1,0 \leq \frac{c}{a} \leq 32,0; \quad 5 \leq \frac{R_b}{t} \leq 1000 \quad (5.32)$$

Їхні числові значення дані у вигляді таблиць [160].

Як видно з виразів (5.31)

$$G_0 = A_{00}, \quad G_1 = A_{01}, \quad \text{якщо } \varphi = 0;$$

$$G_0 = \sum_{n=0}^6 A_{n0}, \quad G_1 = \sum_{n=0}^6 A_{n1}, \quad \text{якщо } \varphi = \frac{\pi}{2}. \quad (5.33)$$

Коефіцієнти впливу G_2 , G_3 , G_4 в точках на контурі тріщини, що задаються кутами $\varphi = 0$, $\varphi = \pi/2$ виражаються через G_0 , G_1 і коефіцієнти вагових функцій M_i , N_i ($i = 1, 2, 3$) за формулами:

якщо $\varphi = \pi/2$

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{16}{15} + \frac{1}{3} M_1 + \frac{16}{105} M_2 + \frac{1}{12} M_3 \right), \quad (5.34)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{32}{35} + \frac{1}{4} M_1 + \frac{32}{315} M_2 + \frac{1}{20} M_3 \right), \quad (5.35)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{256}{315} + \frac{1}{5} M_1 + \frac{256}{3465} M_2 + \frac{1}{30} M_3 \right), \quad (5.36)$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}, \quad M_2 = 3, \quad (5.37)$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}; \quad (5.38)$$

якщо $\varphi = 0$

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{5} + \frac{2}{3} N_1 + \frac{4}{7} N_2 + \frac{1}{2} N_3 \right), \quad (5.39)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{7} + \frac{1}{2} N_1 + \frac{4}{9} N_2 + \frac{2}{5} N_3 \right), \quad (5.40)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{9} + \frac{2}{5} N_1 + \frac{4}{11} N_2 + \frac{1}{3} N_3 \right), \quad (5.41)$$

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8; \quad (5.42)$$

$$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15; \quad (5.43)$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8. \quad (5.44)$$

Використавши наведені в [160] таблиці для параметрів A_{ij} в даній роботі побудовано аналітичні таблиці для числових значень коефіцієнтів впливу G_0 і G_1 при $\varphi = 0$ і $\varphi = \pi/2$. На цій основі розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє обчислити коефіцієнти впливу G_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) для довільних геометричних параметрів труби та розмірів тріщин, що змінюються в межах (5.32), зокрема, і для тих їх значень, які не наведені в таблицях [160]. Апроксимацію функції, заданих таблично здійснено на базі триваріантної квадратичної інтерполяції.

5.3.2. Розрахунок напружень σ_{ref} . Широке застосування двопараметричного критерію (5.27) і ДОР для оцінки допустимості виявлених в процесі технічної діагностики дефектів вимагає поряд з розрахунком характеристики крихкого руйнування – коефіцієнта інтенсивності напружень також стандартних підходів до розрахунку характеристики пластичної нестійкості в зоні тріщиноподібного дефекту, що розглядається – напруження σ_{ref} . Для їх обчислення використаємо рекомендації із основних відомих робіт, зокрема [160].

У випадку, коли циліндрична труба з поверхневою півеліптичною тріщиною (рис. 5.5) знаходиться під дією внутрішнього тиску P напруження σ_{ref} обчислюється за формулою

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + \left[(g\sigma_b)^2 + 9(M_s\sigma_m)^2 \right]^{0,5}}{3}. \quad (5.45)$$

Тут

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0,75} \alpha^3; \quad \alpha = \frac{a/t}{1 + t/c};$$

$$M_s = \frac{1}{1 - 0,85a/t} \left[1 - 0,85 \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t} \right) \right];$$

$$M_t = \left(\frac{1,02 + 0,4411\lambda^2 + 0,006124\lambda^4}{1,0 + 0,02642\lambda^2 + 1,533 \cdot 10^{-6}\lambda^4} \right)^{0,5};$$

$$\lambda = \frac{1,818c}{\sqrt{R_b t}}; \quad \sigma_m = \frac{P R_b}{t};$$

$$\sigma_b = \frac{P R_0^2}{R_0^2 - R_b^2} \left[\frac{t}{R_b} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_b} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{R_b} \right)^3 - 2 \left(\frac{t}{R_b} \right)^4 \right]; \quad (5.46)$$

R_b, R_0 – внутрішній і зовнішній радіуси труби.

5.4. Розрахунок коефіцієнтів запасу міцності і оцінка впливу на їх величину залишкових напружень в різнотовщинному зварному з'єднанні з поверхневою тріщиною в стінці тоншої труби

Для зварного з'єднання різнотовщинних труб (рис. 5.4), виготовлених зі сталі 17Г1С труб діаметром 1020 мм, товщинами стінок $2h_1 = 10$ мм, $2h_2 = 14$ мм і проміжковою $2h_0 = 12$ мм проведено числовий аналіз задачі і обчислено коефіцієнти запасу міцності n і n_r .

Розрахунок виконано у випадку, коли трубопровід знаходиться під дією внутрішнього тиску $P = 4$ МПа для різних геометричних розмірів півеліптичної тріщини, центр якої розташований на відстані 15 мм від осі зварного шва. Значення усереднених по довжині тріщини напружень зумовлених дією внутрішнього тиску на внутрішній поверхні труби згідно з наведеними на рис. 4.2. графіками прийнято 175 МПа. Рівень усереднених по довжині тріщини колових залишкових напружень на основі даних, зображених на рис. 4.17 прийнято 95 МПа, а їх розподіл по товщині труби (рис. 3.9) апроксимовано поліномом (5.28). Згідно з нормативними документами [125] для даної марки сталі $K_{1c}^* = 61 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, $R_2 = 223 \text{ МПа}$, $K = 1,63$.

На рис. 5.6 графічно зображено залежність коефіцієнтів запасу міцності зварного з'єднання з дефектом від відносної глибини тріщини a/t у випадках, коли $c = a$ і $c = 2a$.

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 можна вважати працездатною. Ура -

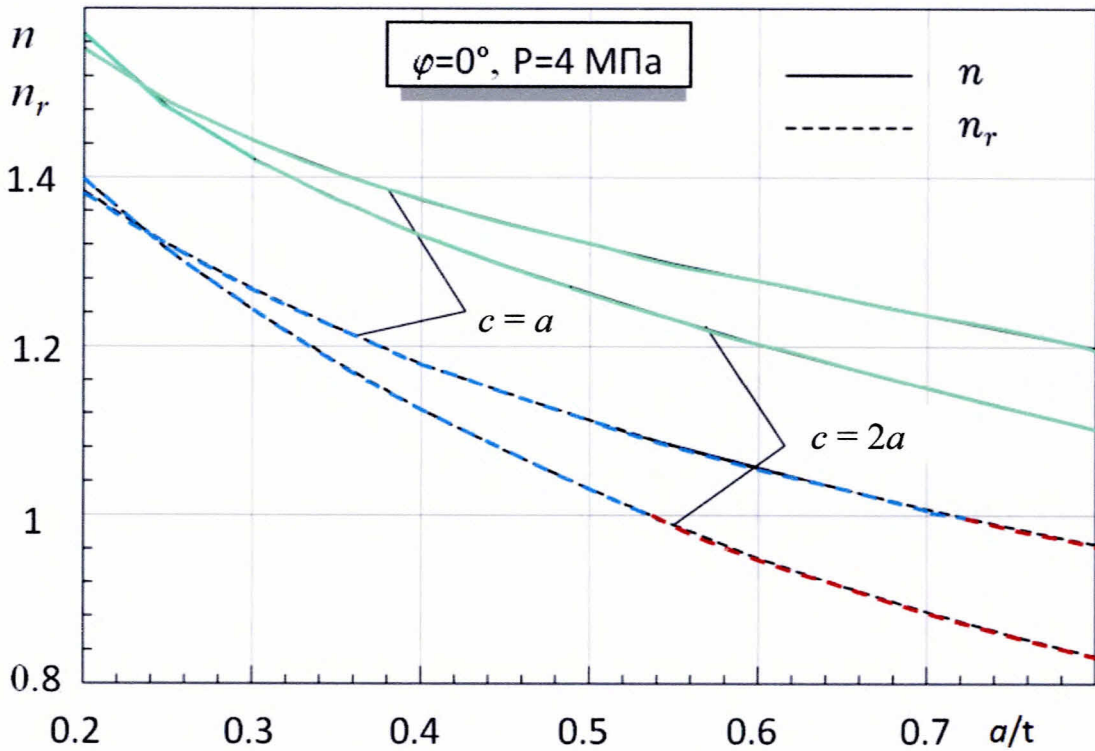


Рис. 5.6. Залежність коефіцієнтів запасу міцності n і n_r від відносної глибини тріщини a/t

хування дії залишкових напружень для цих же геометричних параметрів і навантажень показує, що коли $c=2a$, $a/t \geq 0,55$ коефіцієнт запасу міцності $n_r < 1$ і дана ділянка трубопроводу втрачає безумовну працездатність.

Висновки до розділу 5

1. Наведено деякі правила схематизації виявлених характерних дефектів матеріалу труби відповідними дефектами канонічної форми, які зручно описати математично при прогнозуванні ресурсу безпечної експлуатації трубопроводів.

2. Для оцінки міцності ділянки трубопроводу зі зварним з'єднанням різнотовщинних труб з дефектами базовою прийнято діаграму оцінки руйнування (ДОР), яка є граничною кривою, що визначає межу міцності між безпечним та небезпечним станами елементів конструкцій і споруд, і ґрунтується на двопараметричному критерії R_6 . Цей критерій виражає умову непорушення рівноваги тріщиноподібного дефекту у вигляді функцій двох параметрів, один з яких характеризує міру наближення до крихкого руйнування в деякій точці в зоні дефекту, а другий – міру наближення до в'язкого руйнування.

3. Для зварного з'єднання різнотовщинних труб під внутрішнім тиском з внутрішньою поздовжньою півеліптичною тріщиною у стінці тоншої труби біля шва обчислено коефіцієнти запасу міцності n і n_r . Встановлено, що розтягальні колові залишкові напруження можуть суттєво вплинути на рівень цих коефіцієнтів, Так у розглянутому випадку для заданих геометричних розмірів труби і дефекту та величини внутрішнього тиску показано що:

- за умови відсутності дії залишкових напружень для ділянки трубопроводу з тріщиною з геометричними параметрами $c = 2a$, $0,2 \leq a/t \leq 0,8$, де a – її глибина, t – товщина стінки труби, коефіцієнт запасу міцності $n > 1$ і що цю ділянку можна вважати працездатною;
- урахування дії залишкових напружень на рівні, що знаходиться в межах значень незрелаксованих напружень після опресування або високого відпуску, зменшує коефіцієнт запасу міцності і для $a/t \geq 0,55$ значення $n_r < 1$, тобто 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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 різнотовщинних 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_+^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_r , 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 незрелаксованих 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абен Х.К. Интегральная фотоупругость / Х.К. Абен. – Таллин: Валгус, 1975. – 218 с.
2. Айбиндер А.Б. Прочностные критерии в американских нормах проектирования нефтегазопроводов и их сопоставление с критериями российских норм СНиП 2.05.06-85 / А.Б. Айбиндер // Газовая промышленность. – 1994. – № 2. – С. 31 – 34.
3. Айбиндер А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость.: Справ. пособие / А.Б. Айбиндер, А.Г. Камерштейн. – М.: Недра, 1982. – 343 с.
4. Александров А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого твердого тела / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
5. Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів / В.Д. Макаренко, В.Ю. Чернов, Є.І. Крижанівський, М.М. Прохоров // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 47 – 50.
6. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – Киев: Наук. думка, 1992. – 184 с.
7. Аскарлов Р.М. Напряженно-деформированное состояние газопроводов, пораженных КРН / Р.М. Аскарлов // Газовая промышленность. – 2003. – № 4. – С. 53 – 56.
8. Бабин Л.А. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
9. Бакаев В.В. Технологии и оборудование компании «Розен» для диагностики объектов нефтегазовой отрасли / В.В. Бакаев // Надёжность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы 3 научн.-техн. конф. – Минск. – 2000. – С. 120 – 123.

10. Банахевич Ю.В. Визначення залишкових напружень в околі кільцевого зварного з'єднання труб з урахуванням структурних змін в зоні термічного впливу / Ю.В. Банахевич, В.А. Осадчук, А.Р. Дзюбик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1. (6). – С. 77 – 81.
11. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
12. Березин В.Л. Сварка трубопроводов и конструкций / В.Л. Березин, А.Ф. Суворов. – М.: Недра, 1983. – 320 с.
13. Білобран Б.С. Напружено-деформований стан трубопроводу при його підсадці / Б.С. Білобран, Л. С. Шлапак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1. (6). – С. 107 – 110.
14. Бобренко В. М. Акустическая тензометрия / В.М. Бобренко, М.С. Вангели, А.Н. Куценко. – Кишинев: Штиница, 1991. – 203 с.
15. Бондаренко Ю.К. Мониторинг процесса измерений при НК и ТД для оценки соответствия (сертификации) сварных конструкций после длительной эксплуатации / Ю.К. Бондаренко, М.Л. Радченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 4. – С. 44 – 50.
16. Бородавкин П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
17. Велиюлин И.И. Совершенствование методов ремонта газопроводов / И.И. Велиюлин. – М. – 1997. – 223 с.
18. Верлань А.Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А.Ф. Верлань, В.С. Сизиков. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.
19. Винокуров В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
20. Вплив анізотропії трубних сталей на оцінювання напруженого стану трубопроводу ультразвуковим методом / Л.С. Шлапак, В.М. Коваль,

- А.П. Олійник та ін. // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 3. – С. 41 – 43.
21. Вплив наводнювання та попереднього пластичного деформування на тріщиностійкість трубопроводів / Ю.Д. Петрина, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина, І.М. Стоцький // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2003. – № 2(7). – С. 102 – 105.
 22. Галузева система діагностичного обслуговування обладнання магістральних газопроводів та АГНКС: СОУ 60.3-30019801-006.2004. – К.: ДК “Укртрансгаз”, 2004. – 178 с. – (Стандарт організації України).
 23. Гатовский К. М. Определение сварочных деформаций и напряжений с учетом структурных превращений металла / К.М. Гатовский // Сварочное производство. – 1973. – №11. – С. 3 – 6.
 24. Говдяк Р.М. Трубопровідне транспортування природного газу в ХХІ ст. Проблеми і перспективи розвитку / Р.М. Говдяк // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 2. – С. 29 – 32.
 25. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів / М.І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 2. – С. 56 – 57.
 26. Грудз В.Я. Вплив антикорозійного покриття внутрішньої поверхні на міцність трубопроводу / В.Я. Грудз, І.Й. Попадюк, О.Т. Мартинюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 2004. – № 2 (11). – С. 25 – 27.
 27. Гузь А. Н. Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт // Прикл. механика. – 2000. – 36, № 9. – С. 3 – 34.
 28. Гузь А.Н. Введение в акустоупругость / А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт, О.И. Гуца. – К.: Наук. думка, 1977. – 152 с.
 29. Гумеров А.Г. Разработка методов повышения ресурса длительно эксплуатирующихся нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Гумеров, А.В. Росляков. – М.: ВНИИОНГ, 1991. – 83 с.

30. Гуца О.И. Усовершенствование импульсного метода измерения скорости ультразвука / О.И. Гуца, В.К. Лебедев // Заводская лаборатория – 1967. – № 7. – С. 10 – 14.
31. Дарчук О.І. Моделювання впливу залишкових напружень на швидкість росту втомних тріщин у зварних з'єднаннях / О.І. Дарчук, А.В. Драгілев // Машинознавство. – 2005. – № 3(93). – С. 7 – 12.
32. Диагностика стальных конструкций методом магнитной памяти / А.А. Дубов, В.И. Загребельный, А.П. Мозговой, А.Н. Рудаков // Сварные конструкции: тезисы доповідей міжнародної конференції. – Київ. – 2000. – С. 11 – 15.
33. Досвід дослідження напружено-деформованого стану газопроводів акустичними та магнітними методами / Й.В. Перун, Л.С. Шлапак, В.В. Розгонюк, Ю.В. Банахевич // Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики та неруйнівного контролю нафтогазового, хімічного та енергетичного обладнання. Сучасний підхід до підготовки фахівців з НК і ТД: матеріали наук.-тех. конф. – Івано-Франківськ. – 1996. – С. 33 – 37.
34. Драгілев А.В. Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в магістральних трубопроводах біля монтажних швів / А.В. Драгілев, В.А. Осадчук // Всеукр. щоквартальний наук.-техн. журн. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1(14). – С. 24 – 29.
35. Евсиев Т.С. О влиянии фактора времени в развитии повреждаемости магистральных газопроводов / Т.С. Евсиев // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 94 – 110.
36. Забезпечення експлуатаційної надійності магістральних газопроводів / О.М. Карпаш, Я.М. Зінчак, П.Я. Криничний та інші // Повышение

- эксплуатационной надежности линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы ДК “Укртрансгаз: тезисы докладов научно-технического семинара. – Киев. – 2002. – С. 38 – 39.
37. 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.
38. Іванчук О. Визначення напружень у трубопроводах при зміні їхньої геометричної форми / О. Іванчук, С. Сидоренко // 7-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей. – Львів: КІНПАТРІ, 2005. – С. 47.
39. 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.
40. Іванчук О. Залишкові напруження в зоні стикового зварного з'єднання двох різнотовщинних циліндричних оболонок / О. Іванчук, В. Осадчук // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2006. – Т. 2. – С. 183–186.
41. Іванчук О.О. Математична модель розрахунково-експериментального діагностування напруженого стану різнотовщинних кільцевих зварних з'єднань магистральних трубопроводів / О.О. Іванчук, В.А. Осадчук // Науково-технічний журнал “Методи та прилади контролю якості”. – Івано-Франківськ, 2005. – №15. – С. 97 – 100.
42. Іванчук О. Розрахунково-експериментальне визначення напруженого стану кільцевих зварних з'єднань різнотовщинних труб / О. Іванчук // Машинознавство. – 2006. – № 9-10. – С. 22 – 26.

43. Игнатъева В.С. Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва / В.С. Игнатъева, Р.Р. Кулахметъев, В.В. Ларионов // Автомат. сварка. – 1985. – № 1. – С. 1 – 4.
44. Игнатъева В.С. Распределение собственных напряжений в пластинах, сваренных в стык за один проход / В.С. Игнатъева // Сварочное производство. – 1956. – №3. – С. 12 – 17.
45. Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О.В. Махненко и др. // Автоматическая сварка. – 2000. – № 5 – С. 3 – 8.
46. Исследование металла труб газопроводов после длительной эксплуатации с использованием метода акустической эмиссии / В.А. Кобзев, Я.С. Марчук, М.П. Андришин, Е.А. Игуменцев // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 4. – С. 3 – 5.
47. Капцов И.И. Восстановительные работы на МГ: пути повышения эффективности / И.И. Капцов, В.Н. Гончаров, В.Н. Гончар // Газовая промышленность. – 1990. – №4. – С. 28 – 30.
48. Карета Н.Л. Рентгеновское измерение остаточных напряжений первого рода в околошовной зоне закаливающихся сталей / Н.Л. Карета, А.М. Макара // Автоматическая сварка. – 1960. – № 1. – С. 3 – 9.
49. Карпаш О.М. Технологія та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання промисловості / О.М. Карпаш, Я.М. Зінчак, М.О. Карпаш // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 8 – 11.
50. Касаткин Б.С. Напряжения и деформации при сварке / Б.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертов. – К.: Вища школа, – 1987. – 246 с.
51. Касаткин Б.С. Оценка некоторых методов определения остаточных напряжений в сварных соединениях конструкционных сталей для

- диагностики (обзор) / Б.С. Касаткин // Техническая диагностика. – 2005. – № 4. – С. 13 – 18.
52. Кир'ян В.І. До продовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів, які відпрацювали свій нормативний строк / В.І. Кир'ян // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр, – 1998. – В. 3. – С. 608 – 614.
53. Кир'ян В. І. Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій / В.І. Кир'ян, В.А. Осадчук, М.М. Николишин. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 320 с.
54. Кир'ян В.І. Подовження ресурсу металевих погонних будов залізничних мостів з втомними пошкодженнями / В.І. Кир'ян, В.В. Книш, О.З. Кузменко // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, 2006. – С. 358 – 360.
55. Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу / М.П. Ковалко. – Київ: Українські енциклопедичні знання, – 2001. – 288 с.
56. Контроль напруженого стану в зварних з'єднаннях різнотовщинних труб магістральних трубопроводів / О.О. Іванчук, В.А. Осадчук, А.О. Кичма, Ю.В. Банахевич // Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості: матеріали V науково-практична конференція з НК Шарм ель Шейх, Єгипет, 22-29 квітня 2007. – С. 38 – 41.
57. Контроль напружено-деформованого состояния газопроводов / А.А. Дубов, Е.А. Демин, А.И. Минаев, О.И. Стеклов // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 58 – 61.
58. Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій / В.І. Похмурський, Р.К. Мелехов, Г.М. Круцан, В.Г. Здановський. – К.: Наукова думка, 1995. – 260 с.

59. Красовский А.Я. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / А.Я. Красовский, В.Н. Красико. – Киев: Наукова думка, 1990. – 173 с.
60. Крижанівський Є.І. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 5. – С. 33 – 38.
61. Крижанівський Є.І. Низькочастотна корозійна втома сталі морських трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. випуск № 3. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – т. 2. – С. 794 – 797.
62. Кузьминов С.А. Сварные деформации судовых корпусных конструкций / С.А. Кузьминов. – Л.: Судостроение, 1974. – 286 с.
63. Лінчевський М.П. Вибір та атестація технологічних процесів зварювання / М.П. Лінчевський, В.О. Саркісов, М.Г. Лерман // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №4. – С. 40 – 41.
64. Лобанов Л. М. Компьютерная система для определения остаточных напряжений методом отверстий в сочетании с голографической интерферометрией / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.Д. Кротенко // Сварные конструкции: тезисы доповідей міжнар. конф. – К. – 2000. – С. 5 – 9.
65. Магнитооптическая дефектоскопия приповерхностных слоев ферромагнитных изделий / Ю.С. Агалиди, С.В. Левый, В.А. Троицкий, Ю.Н. Посыпайко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 4. – С. 16 – 20.
66. Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: Издательство Центр «ЕЛИМА», 2004. – 1096 с.

67. Максимов Н.Н. Прибор для исследования остаточных напряжений в металлических конструкциях / Н.Н. Максимов, В.В. Попов // Сб. науч. сообщений. – М.: ВНИИСТ, 1960. – Вып. 2. – 164 с.
68. Максимович В.Н. Численно-аналитические решения задачи термопластичности для локального нагрева пологих оболочек / В.Н. Максимович, Л.В. Хомляк // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – № 5. – С. 126 – 132.
69. Математическая модель для определения взаимных, продольных смещений элементов конструкций при сварке / Л.М. Лобанов, Н.А. Санченко, В.И. Павловский, Н.А. Пашин // Автоматическая сварка. – 1998. – № 3 (540). – С. 5 – 9.
70. Махненко В.И. Влияние остаточных напряжений на распространение усталостных трещин в элементах сварных конструкций / В.И. Махненко // Автоматическая сварка. – 1978. – № 4. – С. 1 – 3.
71. Махненко О.В. Математическое моделирование многопроходной дуговой сварки кольцевых швов толстостенных оболочек / О.В. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: сборник трудов международной конф. – Киев. – 2002. – С. 231 – 234.
72. Махненко О.В. Неосесимметричное распределение напряжений и остаточных деформаций при сварке тонкостенных цилиндрических оболочек / О.В. Махненко, Е.А. Великоиваненко, А.В. Мусяченко // Автоматическая сварка. – 1993. – № 4. – С. 3 – 8.
73. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В.И. Махненко. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.

74. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – К.: ДНВП Видавництво "Наук. думка", 2006. – 618 с.
75. Махненко В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации / В.И. Махненко // Сб. основных публикаций сотрудников отдела «Математических методов исследования физико-химических процессов при сварке и спецэлектрометаллургии» Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. – Киев. – 2004. – С. 3 – 12.
76. Махненко В.И. Сопротивление циклическим нагрузкам сварных соединений, имеющих швы с неполным проплавлением / В.И. Махненко, В.Е. Починок // Автоматическая сварка. – 1984. – № 10. – С. 33 – 40.
77. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
78. Махутов Н.А. Подход к определению остаточного ресурса труб по критериям прочности и трещиностойкости / Н.А. Махутов // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 178 – 196.
79. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т. Т.1: Методология / Ю.М. Мацевитый. – К.: Наук. думка, 2002. – 408 с.
80. Медведев В.Н. О причинах аварийности труб магистральных газопроводов / В.Н. Медведев, В.В. Кузнецов, В.Д. Шапиро // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 110 – 122.

81. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, В.В. Савицкий, Г.И. Ткачук // Автоматическая сварка. – 2006. – № 1. – С. 25 – 30.
82. Методика оцінки технічного стану металу діючого газопроводу з тривалим строком експлуатації (більше 10 років) та залишкового ресурсу його безпечної роботи. Київ. – УкрНДГаз, 2001. – 106 с.
83. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении: РД 50-345-82. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
84. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідник / Під ред. В.В. Панасюка. Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г, В. Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.
85. Недосека А.Я. Аналитическое фундаментальное решение пространственной задачи термопластичности для слоя из неизотермического материала / А.Я. Недосека, О.И. Бойчук // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – №3. – С. 3 – 16.
86. Недосека А.Я. Влияние деформаций по толщине на остаточное напряжение в пластине со сварной точкой / А.Я. Недосека // Автоматическая сварка. – 1973. – № 7. – С. 30 – 34.
87. Недосека А.Я. Об объемности напряженного состояния при сварке тонких листов / А.Я. Недосека, О.И. Бойчук // Автоматическая сварка. – 1981. – № 4. – С. 23 – 26.
88. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А.Я. Недосека. – К.: Индпром, 1998. – 640 с.
89. Николаев Г. А. Сварные конструкции / Г.А. Николаев – М.: Машгиз, 1962. – 552 с.

90. Николаев Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
91. Обґрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском / В.С. Бут, Ю.Я. Грецький, В.В. Розгонюк, В.М. Коломеев // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 4. – С. 33 – 39.
92. О двухкритериальном подходе к оценке предельной несущей способности тела с трещиной / А.Я. Красовский, Н.А. Махутов, И.В. Орыняк, В.М. Тороп // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1992. № 4-5. – С. 92 – 100.
93. Окерблом Н.О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке / Н.О. Окерблом – М. – Л. ГНТИМЛ: Машгиз, 1955. – 214 с.
94. Оперативний контроль качества и напряженного состояния сварных конструкций методами электронной широгографии и спекл-интерферометрии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, В.В. Савицкий и др. // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С. 39 – 44.
95. Определение остаточных напряжений в элементах конструкций на основе применения электронной спекл-интерферометрии и метода конечных элементов / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, В.В. Савицкий, Г.И. Ткачук // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 4. – С. 15 – 19.
96. Оптимізація товщини композитних бандажів при ремонті трубопроводів з дефектами / Б.В. Копей, В.Б. Копей, А.В. Максимчук та ін. // Науковий вісник Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 2 (16). – С. 101 – 107.
97. Орыняк І.В. Використання категоризації напружень і деформаційних критеріїв при оцінці міцності магістральних трубопроводів / І.В.

- Ориняк, М.В. Бородій, А.В. Богдан // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 4. – С. 6 – 16.
98. Ориняк І.В. Ресурс, довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні / І.В. Ориняк, В.В. Розгонюк, В.М. Тороп // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 54 – 57.
99. Осадчук В.А. Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич, О.О. Іванчук // Міжнародний науково-технічний журнал “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. – 2006 р. – Том 42. – № 2. – С. 99 – 105.
100. Осадчук В.А. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на міцність трубопроводу з дефектами в зоні кільцевих зварних з’єднань різнотовщинних труб / В.А. Осадчук, Ю.В. Пороховський, О.О. Іванчук // Сучасні проблеми механіки та математики – т. 1. – Львів, 2008. – С. 33 – 36.
101. 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.
102. Осадчук В. А. Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом / В. А. Осадчук // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2003. – 46, № 1. – С. 88 – 104.
103. Осадчук В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках / В. Осадчук, М. Большаков, В. Палаш // Машинознавство. – 1997. – №1. – С. 5 – 9.
104. Осадчук В. Розрахунково-експериментальне визначення залишкових напружень у зварному з’єднанні трубопроводу з використанням

- інформації, отриманої методом голографічної інтерферометрії / В. Осадчук, О. Іванчук // матеріали всеукраїнської наукової конференції: сучасні проблеми механіки. – Львів, 2-5 листопада 2004. – С. 24 – 25.
105. Особенности измерения механических напряжений электромагнитным методом в трубопроводах и сосудах давления газового и нефтяного комплекса (методические материалы) / А.Я. Недосека, С.К. Фомичев, С.Н. Минаков и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – №1, 1996. – С. 55 – 66.
106. Панасюк В.В. Механіка втомного руйнування матеріалів і довговічність зварних конструкцій: деякі досягнення та перспективи / В.В. Панасюк, О.Є. Андрейків // Сварка и родственные технологии – в XXI век: сборник трудов междунар. конф. – Киев: НАН Украины, ин-т. ИЭС им. Е.О. Патона. – 1998. – С. 203 – 216.
107. Патон Б.Е. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций (состояние вопроса и перспективы развития) / Б.Е. Патон, А.Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 1. – С. 3 – 17.
108. Патон Б.Е. Диагностика сварных конструкций и обеспечение безопасности окружающей среды / Б.Е. Патон, А.Я. Недосека // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: праці міжнар. конф. – Том 3. – Випуск 2. – Львів: Каменяр, 1999. – С. 38 – 52.
109. Перун Й.В. Магистральные трубопроводы в горных условиях / Й.В. Перун. – М.: Недра, 1987. – 175 с.
110. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, П.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова Думка, 1975. – 704 с.
111. Підстригач Я.С. Температурні напруження в оболонках / Я.С. Підстригач, С.Я. Ярема. – Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. – 212 с.

112. Подстригач Я.С. Исследование напряженного состояния цилиндрических оболочек, обусловленного заданным тензором несовместных деформаций и его приложения к определению сварочных напряжений / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук // Физ. – хим. механика материалов. – 1968. – 4, № 2. – С. 218 – 224.
113. Подстригач Я. С. Приближенный расчет остаточных сварочных напряжений в цилиндрических оболочках / Я.С. Подстригач, В.А. Осадчук, Л.П. Карасев // Проблемы прочности. – 1975. – № 7. – С. 8 – 13.
114. Про трубопровідний транспорт. Голос України, 1996. – № 108 – С. 6 – 7. (Закон України).
115. Проблемы определения ресурса сварных конструкций (обзор) / Ю.К. Бондаренко, Я.М. Фурман, А.Ю. Бондаренко, О.В. Ковальчук // Техническая диагностика. – 2005. – № 1. – С. 3 – 9.
116. Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – 220 с.
117. Прохоренко В.М. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 2. Нагрев мощным движущимся линейным источником / В.М. Прохоренко, А.С. Карпенко, Д.В. Прохоренко // Технологические системы. – 2005. – № 5-6 (31-32). – С. 46 – 49.
118. Прохоренко В.М. Расчет функции усадки при сварке одномерных конструкций. Сообщение 1. Нагрев мощным быстродвижущимся линейным источником / В.М. Прохоренко, А.С. Карпенко, Д.В. Прохоренко // Технологические системы. – 2005. – № 4 (30). – С. 49 – 55.
119. Прохоренко О.В. Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 1. Конструкції першого типу / О.В. Прохоренко // Технологические системы. – 2006. – № 2 (34). – С. 55 – 59.

120. Прохоренко О.В. Розрахунок технологічних параметрів теплової правки залишкового прогину одномірних зварних конструкцій. Повідомлення 2. Конструкції другого типу / О.В. Прохоренко // Технологические системы. – 2006. – № 3 (35). – С. 78 – 86.
121. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. / Под редакцией В.И. Труфякова – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.
122. Радченко С.А. Численная процедура расчета напряженно-деформированного состояния трубопроводов при больших перемещениях / С.А. Радченко, И.В. Орыняк, А.В. Богдан // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона. – 2006. – С. 319-324.
123. Разработка уточненной методики неразрушающего контроля напряжений магнитоупругим методом / А.Я. Недосека, А.А. Грузд, О.И. Бойчук и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 4. – С. 19 – 22.
124. Розгонюк В. В. Про створення централізованої системи технічного нагляду і діагностування лінійної частини магістральних газопроводів України / В.В. Розгонюк, Л.С. Шлапак, В.М. Коваль // Нафтова і газова промисловість. – 1998. – № 5. – С. 38 – 41.
125. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами: ВБН В.2.3–00018201.04–2000. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с. – (Відомчі будівельні норми України).
126. Руйнування магістральних газопроводів у рівнинних умовах їх експлуатації / Я.С. Марчук, І.Ф. Сіренко, Л.Й. Бойко, В.І. Матяш // Інформаційний огляд ДК “Укртрансгаз”. – 2004. – № 3 (27). – С. 21 – 22.
127. Сагарадзе В.В. Структурные аспекты коррозионного растрескивания под напряжением сталей магистральных газопроводов / В.В. Сагарадзе, Ю.И. Филиппов, А.Ф. Матвиенко // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического

- семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 148 – 164.
128. Сварные строительные конструкции: в 3-х т. / Под ред. Л.М. Лобанова. – К.: Наукова думка, 1993. – т. 1: Основы проектирования конструкций / Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков и др. – 416 с.
129. Сварные строительные конструкции: в 3-х т. / Под ред. Л.М. Лобанова. – К.: Наукова думка, 1997 – т. 2: Типы конструкций / В.Н. Шимановский, Э.Ф. Гарф, В.А. Пермяков и др. – 680 с.
130. Середюк М.Д. Визначення пропускної здатності складних газотранспортних систем / М.Д. Середюк, Д.В. Лісафін // Науковий вісник Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – № 3 (9). – С. 69 – 78.
131. Сметанин Ф.Е. Остаточный ресурс металла труб газопроводов, введенных в эксплуатацию в 60-е годы / Ф.Е. Сметанин, В.В. Кудрявцев, М.В. Демаков // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 122 – 132.
132. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность: ГОСТ 14248–89. – М.: 1989. – 77 с.
133. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. – т. 1, 2. – 1013 с.
134. Строительные нормы и правила: Нормы проектирования магистральных трубопроводов: СНиП–2.05.06-85. – М.: Стройиздат, 1985. – 62 с.
135. Талыпов Г.В. Сварочные деформации и напряжения / Г.В. Талыпов – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 278 с.
136. Термопластичность деталей машин / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шора –М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

137. Технологія ремонту повітряних переходів трубопроводів в опорних перерізах композитними матеріалами / Л.С. Шлапак, В.М. Беккер, Ю.М. Герасименко, С.І. Кадай // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 35 – 38.
138. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – М.: Наука, 1979. – 285 с.
139. Топоров В.Г. Напружений стан трубопроводу при спорудженні поворотів траси без технологічних захльостів / В.Г. Топоров, І.М. Рuzіна // Науковий вісник Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 2 (16). – С. 113 – 117.
140. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке / И.П. Трочун. – М.: Машиностроение, 1964. – 247 с.
141. Трощенко В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наук. думка, 1987. – 251 с.
142. Трубопровідний транспорт / за ред. М.П. Ковалка. – Київ: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
143. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В.И. Труфяков – К.: Наукова думка, 1973. – 216 с.
144. Филиппов Г.А. Факторы, влияющие на склонность трубных сталей к коррозионному растрескиванию под напряжением / Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 164 – 178.
145. Фомичев С.К. Экспериментально – расчетный метод определения остаточных напряжений в зоне кольцевых швов оболочечных конструкций / С.К. Фомичев, Ю.А. Осламовский, Е.А. Великоиваненко // Автоматическая сварка. – 1998. – № 5 – С. 14 – 18.

146. Чекурін В.Ф. Варіаційний метод розв'язування задач томографії напруженого стану твердих тіл / В.Ф. Чекурін // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – № 5. – С. 23 – 32.
147. Чувильдеев В.Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов / В.Н. Чувильдеев // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сборник трудов научно-практического семинара; под общей ред. Б.В. Будзуляка и А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 18 – 68.
148. Шип В.В. Вопросы применения акустической эмиссии при диагностике сварных трубопроводов / В.В. Шип, Г.Б. Муравин, В.Ф. Чабурнин // Дефектоскопия. – № 8. – 1993. – С. 17 – 23.
149. Шлапак Л.С. Исследование напряженно-деформированного состояния сложных участков трубопроводов в условиях горных Карпат с целью повышения их эксплуатационной надежности / Л.С. Шлапак // Методы и средства технической диагностики. – Ивано-Франковск. – 1992. – С. 166 – 172.
150. Шлапак Л.С. Разработка концепции исследования технического состояния надземных участков газонефтепроводов / Л.С. Шлапак, В.В. Розгонюк // Нефтяная и газовая промышленность. – 1996. – № 4. – С. 35 – 37.
151. Экспериментальные исследования сварочных напряжений и деформаций / Б.С. Касаткин, Л.М. Лобанов, В.В. Волков и др. – К.: Наукова думка, 1976. – 150 с.
152. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов и др. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.
153. Ягода П.А. Модель віртуального тренажера ліквідації аварійних ситуацій на лінійній частині МГ та КС / П.А. Ягода, Д.Ф. Тимків, В.Д. Тимків // Нафтова і газова промисловість. – 2006. – №1. – С. 52 – 54.

154. Ярема С.Я. Аналитическое описание диаграммы усталостного разрушения материалов / С.Я. Ярема, С.И. Микитишин // Физ.-хим. механика материалов. – 1975. – № 6. – С. 47 – 51.
155. Adamski M. Ocena stanu napreżeń i grubości ścianek w rurociągach metoda ultradźwiękowa / M. Adamski, J. Lubkiewicz // Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów: materiały II Krajowej Konferencji Technicznej. – Plock (Poland). – 1999. – S. 119 – 128.
156. Allen D.B. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique / D.B. Allen, C.M. Sayers // Ultrasonic. – 1984. – 22. – № 4. – P. 179 – 188.
157. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects / R.P. Harrison, K. Loosemore, J. Milne, A.R. Dowling // CEGB R6, Revision 2, April 1980. – 193 p.
158. Begheni M. Fatigue crack growth in residual stress fields: experimental results and modelling / M. Begheni, L. Bertini, E. Vitale – Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. – 1994. – 17, № 12. – P. 1433 – 1444.
159. Diagnostics of technological residual stresses in different thickness circumferential welded joints of pipelines / O. Ivanchuk, Y. Banachevych, V. Osadchuk, A. Kychma // 37. Mezinárodní konference “Defektoskopie 2007”, listopad 7-9, 2007, Prague. – Czech Republic. – P. 97 – 104.
160. Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. – 2000. – 625 p.
161. Fujita J. Welding Stress and Deformation Analysis Based on Inherent Strain Method / J. Fujita, T. Nototo // Proc. of Colloquium on Application of Numerical Techniques in Welding. – Dublin, 1978. – 15 p.
162. Gas transmission and distribution piping systems: ASME B31.8-1992 EDITION. – 1992. – 83 p.
163. Hardy S.J. A survey of post-Peterson stress concentration factor data / S.J. Hardy, N.H. Malik // Int. J. Fatigue. – 1992. – N 3 (14). – P. 147–153.

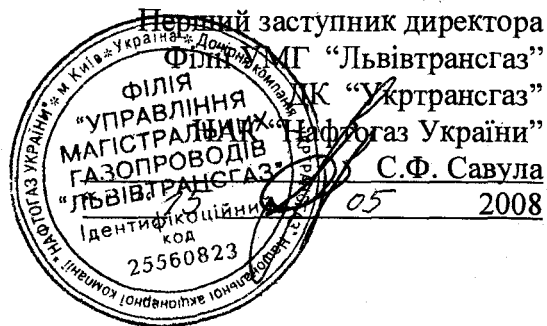
164. Jones B.L. Ocena integralności spoin obwodowych na podstawie wyników inspekcji wewnętrznej gazociągu w odniesieniu do możliwości podniesienia ciśnienia eksploatacyjnego w stosunku do jego wartości projektowej / B.L. Jones, E. Huuskonen, K. Erdbrink // Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów: materiały II Krajowej Konferencji Technicznej. – Plock (Poland). – 1999. – S.165 – 175.
165. Lubkiewicz J. Typowe anomalie rurociągów budowanych na przełomie lat 60/70 w świetle badań tlokami inteligentnymi / J. Lubkiewicz, P. Raczynski, W. Lukajtis // Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów: materiały II Krajowej Konferencji Technicznej. – Plock (Poland). – 1999. – S. 67 – 83.
166. Masubuchi K. Analysis of welded structures / K. Masubuchi. – New York: Pergamon Press, 1980. – 642 p.
167. Mackiewicz S. Ocena jakości spoin obwodowych rurociągów dalekosieżnych / S. Mackiewicz, M. Sliwowski, A. Zbyszewski // Rurociągi. – 1998. – № 1–2. – S. 25 – 29.
168. Milne J. Failure assessment diagrams and Estimates: A comparison for ferritic and austenitic steels / J. Milne // Intern. J. of Pressure Vessels and Piping. – 1983. – 13. – P. 107 – 125.
169. Mukai I. A proposal for stress intensity factor range calculation method by partial opening model of fatigue crack under welded residual stress field and prediction of the crack propagation behavior / I. Mukai, M. Murata, E.J. Kim // Quart. Of the J.W.S. – 1987. – 5, N 2. – P. 85 – 88.
170. Paris P.G. Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness and Testing and its Applications / P.G. Paris, G.C. Sih // American Society for Testing and Materials. Philadelphia, STP 381. – 1965. – P. 30 – 83.
171. Rybicki E.F. Computation of residual stresses due to multipass welds in piping systems / E.F. Rybicki, R.B. Stonesifer // J. Press. Vessel Techn. (ASME). – 1979. – 101. – P. 149 – 154.

172. Shi Y.W. Effects of welding residual stress on fatigue crack growth behaviour in butt welds of a pipeline steel / Shi Y.W., Chen B.Y., Zhang J.X. – Eng. Fract. Mech. – 1990. – 36, № 6. – P. 893 – 902.
173. Wysoczanski W. Diagnostyka naprezen w metalach metoda akustyczna / W. Wysoczanski, A. Honk, P. Purgal // Zarzadzanie ryzykiem w eksploatacji rurociagow: materialy II Krajowej Konferencji Technicznej. – Plock (Poland). – 1999. – S. 115 – 117.

Додаток А

Акт впровадження наукових досліджень у виробництво

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



АКТ

про впровадження способу оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність ділянок магістральних газопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб

Національний університет "Львівська політехніка" разом з Філією УМГ "Львівтрансгаз" ДК "Укртрансгаз" НАК "Нафтогаз України" застосували спосіб оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність ділянок трубопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб, з використанням розрахунково-експериментального методу визначення їх напруженого стану, діаграми оцінки руйнування і експериментальної інформації, отриманої електромагнітним методом, розроблений здобувачем Іванчуком О.О. під керівництвом проф., д.ф.-м.н. Осадчука В.А., при оцінці технічного стану магістральних газопроводів.

Запропонований спосіб і програмне забезпечення використовувались 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», що були виявлені під час внутрішньотрубного діагностування інтелектуальним поршнем фірми "Rosen Engineering GmbH". Проведено дослідження та розрахунки з оцінки технічного стану МГ "КЗУ – II нитка" (км 360,8 – км 379,7) на ділянці УМГ "Львівтрансгаз". Оцінено вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок газопроводу з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб, обґрунтовано рекомендації щодо технології та черговості проведення ремонтів небезпечних ділянок МГ «КЗУ – II нитка».

Очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованого способу і програмного забезпечення 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) становить 471865,18 грн. (чотириста сімдесят одна тисяча вісімсот шістьдесят п'ять гривень 18 копійок).

Заступник директора
з виробництва

Блаут Ю.Є.

Завідувач кафедри

«Зварювальне виробництво, діагностика
та відновлення металоконструкцій»
Національного університету «Львівська
політехніка»

Осадчук В.А.

Начальник
Відділу з експлуатації МГ і ГРС

Банахевич Ю.В.

Здобувач

Іванчук О.О.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший заступник директора

Філії МГ “Львівтрансгаз”

Ділянка “Львівтрансгаз”

“УПРАВЛІННЯ НАФТОГАЗ УКРАЇНИ”

МАГІСТРАЛЬНИХ

ГАЗОПРОВОДІВ

“ЛЬВІВТРАНСГАЗ”

Ідентифікаційний

25560823

С.Ф. Савула

05 2008 р.



РОЗРАХУНОК

очікуваного економічного ефекту від впровадження способу оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність ділянок магістральних газопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб

Економічний ефект від впровадження способу оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність ділянок магістральних газопроводів з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб досягається за рахунок скорочення витрат газу за час проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Застосування запропонованого способу і програмного забезпечення дозволило оцінити вплив залишкових напружень на статичну міцність ділянок газопроводу з дефектами типу тріщин в зоні зварного з'єднання різнотовщинних труб і завчасно провести ремонтні роботи без стравлювання газу в МГ «КЗУ – II нитка» (км 360,8 – км 379,7).

Економічний ефект від впровадження визначаємо за формулою:

$$П = E_{\text{втр.}} - Z_p,$$

де $E_{\text{втр.}}$ – економія за рахунок скорочення витрат газу за час проведення ремонтно-відновлювальних робіт за новою технологією;

Z_p – витрати на ремонтні роботи на лінійній частині газопроводу за новою технологією.

Економія за рахунок виключення витрат газу за час проведення ремонтно-відновлювальних робіт на магістральному газопроводі «КЗУ – II нитка» (км 360,8 – км 379,7), виражається формулою:

$$E_{\text{втр.}} = C_{\text{пр.}} \times Q_{\text{вип.}} \text{ грн,}$$

де $C_{\text{пр.}}$ – діюча оптова ціна в промисловості на газ, (934,70 грн./тис.м³);

$Q_{\text{вип.}}$ – об'єм газу, який необхідно стравити при застосуванні традиційних технологій ремонту - вогневих робіт по монтажу котушок, тис.м³.

$$Q_{\text{вип.}} = \frac{\pi D^2}{4} \times L \times P_{\text{сер}} \times \frac{T_0}{T_{\text{сер}} \times P_c \times Z_{\text{сер}}} \text{ тис.м}^3,$$

- де D - внутрішній діаметр дільниці (1,00 м.);
 L - протяжність дільниці, що відключається (18,90 км.);
 T_0 - 273,15°K;
 $T_{\text{сер}}$ - середня температура газу на дільниці, що відключається (293,76 °K);
 P_c - середній тиск газу після спорожнення дільниці - 1,03 кгс/см²;
 $Z_{\text{сер}}$ - середній коефіцієнт стискання газу на дільниці, що відключається (0,901);
 $P_{\text{сер}}$ - середній тиск в дільниці, що стравлюється-39,5 кгс/см².

$$Q_{\text{вип.}} = \frac{3,14 \times 1,00^2}{4} \times 18,90 \times 10^3 \times 39,5 \times 10^{-4} \times \frac{273,15}{293,76 \times 1,03 \times 10^{-4} \times 0,901} = 587,21 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

Тоді

$$E_{\text{втр}} = 587,21 \times 934,70 = 548865,18 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження

$$\Pi = E_{\text{втр.}} - Z_p = 548865,18 - 77000 = 471865,18 \text{ грн.}$$

Таким чином, очікуваний економічний ефект від впровадження оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність в зонах зварних з'єднань різнотовщинних труб з дефектами типу тріщин на ділянці МГ «КЗУ – II нитка» (км 360,8 – км 379,7) становить 471865,18 грн. (чотириста сімдесят одна тисяча вісімсот шістдесят п'ять гривень 18 копійок).

Начальник
 планово-економічного відділу



Грицей О.Б.

Додаток Б

Методика розрахунку оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність зварних з'єднань різнотовщинних труб магістральних нафтогазопроводів з дефектами типу тріщин

«Затверджую»



Перший заступник директора

«Львівтрансгаз»

Савула С.Ф.

21.04.2008р.

Методика

**розрахунку оцінки впливу залишкових напружень на статичну міцність
зварних з'єднань різнотовщинних труб магістральних
нафтогазопроводів з дефектами типу тріщин**

Розробники: Іванчук О.О., Осадчук В.А.

«Погоджено»

Начальник ВЕМГ і ГРС

Банахевич Ю.В.

Львів – 2008