

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

“ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

*Всі примірники дисертації
ідентичні за змістом.*

*Великий секретар (Корнута О.В.)
17.09.03.*
Банахевич Юрій Володимирович

На правах рукопису

*напис Корнута О.В.
на підставі № 18.03.03.01*



УДК 622.692.4 (043)+

523 622.691.4 (043)

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

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Осадчук Василь Антонович,

доктор фіз.-мат. наук, професор



Львів - 2003

ЗМІСТ

	стор
Вступ.....	6
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	15
1.1. Напружено-деформований стан в магістральних трубопроводах та проблеми його визначення	15
1.2 Дефекти трубопроводів та концентрація напружень в їх околі.....	21
1.3. Залишкові напруження у зварних стикових з'єднаннях із кільцевим швом магістральних нафтогазопроводів.....	23
1.3.1. Причини виникнення залишкових напружень у зварних швах.....	24
1.3.2. Вплив параметрів режиму зварювання труб на рівень залишкових напружень.....	27
1.4. Методи дослідження залишкових напружень в зварних з'єднаннях трубопроводів	28
1.4.1. Руйнівні методи визначення залишкових напружень	28
1.4.2. Неруйнівні методи	30
1.4.3. Розрахункові методи.....	32
1.4.4. Розрахунково-експериментальні методи.....	37
1.5. Основні задачі та напрямки досліджень.....	38
2. РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТРУБНИХ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ.....	40
2.1. Розвиток математичної моделі експериментально- розрахункового методу	41
2.1.1. Математична модель методу.....	42
2.1.2. Особливості застосування неруйнівних методів	49
Висновки до розділу 2	54
3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТРУБОПРОВОДІ, ВИГОТОВЛЕНОМУ ЗІ СТАЛІ 17Г1С, В ОКОЛІ	

КІЛЬЦЕВОГО ЗВАРНОГО ШВА	56
3.1. Основні співвідношення і розрахункові формули для визначення залишкових технологічних напружень в трубопроводі в околі кільцевого зварного шва і їх інтегральних характеристик	58
3.2. Визначення інтегральних характеристик різниці головних напружень електромагнітним методом.....	64
3.3. Оцінка впливу структури матеріалу зони термічного впливу на відлікові показники приладу SMMT-3.....	67
3.4. Розподіл залишкових напружень в околі кільцевого зварного шва в трубі діаметром 1220 мм, товщиною стінки 12 мм, виготовленій зі сталі 17Г1С	72
Висновки до розділу 3	82
4. КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ У ТРУБОПРОВОДІ З КОРОЗІЙНИМ ДЕФЕКТОМ В ОКОЛІ ЗВАРНОГО ШВА.....	84
4.1. Загальна постановка задачі та її схематизація.....	86
4.2. Математична постановка задачі та загальна методика її розв'язування	88
4.3. Скінченно-елементна апроксимація	94
4.3.1. Ізопараметричний чотирикутний білінійний елемент.....	94
4.3.2. Апроксимація функціонала на елементі.....	95
4.4. Програмна реалізація напіваналітичної схеми МСЕ розрахунку напружень в області кругового в плані дефекту трубопроводу.....	98
4.5. Аналіз числових результатів	102
4.5.1. Тестові задачі	102
4.5.2. Аналіз концентрації напружень у газопроводі з корозійним дефектом в області зварного шва	103
Висновки до розділу 4	110

5. ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОГАЗОПРОВІДІВ З ДЕФЕКТАМИ ТИПУ КОРОЗІЙНИХ ВИРАЗОК	112
5.1. Класифікація корозійних дефектів нафтогазопроводів.....	113
5.2. Визначення розмірів корозійних дефектів трубопроводів.....	115
5.2.1. Товщинометрія трубопроводів	115
5.2.2. Визначення корозійних дефектів трубопроводів за результатами внутрішньотрубної діагностики	116
5.2.3. Визначення розмірів корозійних дефектів трубопроводів за допомогою спеціальних пристроїв.....	118
5.3. Аналіз корозійних дефектів магістральних газопроводів.....	120
5.4. Аналіз концентрації напружень в області дефекта в формі півеліпсоїда обертання.....	120
5.5. Експериментальне визначення напружень в околі дефектів трубопроводу	129
5.5.1. Установка для моделювання НДС в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень	129
5.5.2. Комп'ютерна система реєстрації даних	130
5.5.3. Методика визначення напруженого стану нафтогазопроводів за допомогою комплексу Uni Lab – Commutator_v.1	132
5.5.4. Результати тензометрування на дослідній установці	134
5.6. Оцінка коефіцієнта запасу міцності газопроводу з дефектами типу виразок-каверн.....	140
Висновки до розділу 5.....	143
Висновки	145
Список використаних джерел	148
Додатки	169

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БН і П – будівельні норми і правила

ВБН – відомчі будівельні норми

ЗТВ – зона термічного впливу

КС – компресорна станція

ЛВУМГ – лінійно - виробниче управління магістральних газопроводів

ЛЧМТ – лінійна частина магістральних трубопроводів

МГ – магістральний газопровід

МН – магістральний нафтопровід

МТ – магістральний трубопровід

МСЕ – метод скінченних елементів

НДС – напружено - деформований стан

ПК – персональний комп'ютер

ПЗ – програмне забезпечення

УМГ – управління магістральних газопроводів

LPT – паралельний порт персонального комп'ютера

ВСТУП

Нафтогазотранспортна система України є однією з найбільших у світі. Ефективна експлуатація трубопровідного транспорту приносить вагомий внесок у національний бюджет України [51].

У даний час для переміщення газоподібних, рідких та сипучих продуктів на великі відстані дуже широко застосовується трубопровідний транспорт, завдяки його високій продуктивності і рентабельності. Україна має розвинуту мережу магістральних трубопроводів (МТ), яка за останнє десятиріччя перетворилася у самостійний комплекс магістральних і розподільних трубопроводів, що постійно оновлюється та розбудовується. В законі про "Трубопровідний транспорт" [39] відзначається, що магістральний трубопровідний транспорт має виняткове народногосподарське та оборонне значення. Крім того, в останні роки намітилася тенденція до створення великих запасів природних ресурсів у спеціально збудованих сховищах. Це дає змогу запобігати залежності від коливання кон'юктурних цін на нафтогазові продукти та забезпечувати стабільні власні і транзитні поставки. Тому проблема підтримування безпечної експлуатації і надійної працездатності існуючих трубопроводів є дуже актуальною.

Основні показники розвитку трубопровідного транспорту визначено Національною програмою "Нафта і газ України до 2010 року", затвердженою постановою Кабінету Міністрів України в 1995 році [29].

Трубопроводи переважно працюють при статичних і повторно-змінних навантаженнях, застосовуються в різних кліматичних, гідрогеологічних умовах та постійно перебувають у взаємодії із навколишнім середовищем.

В елементах системи трубопровідного транспорту виникає складний, здебільшого двовісний напружений стан, що є результатом сумування полів напружень від зовнішніх навантажень та залишкових напружень (зварювальних, монтажних та конструктивних), а також концентрації

напружень в околі дефектів поверхні труби. Забезпечення високої конструктивної і технологічної надійності трубопроводів є головним завданням у процесі їх проектування, будівництва, монтажу й експлуатації. Продовження терміну експлуатації МГ вимагає застосування сучасних ефективних методів і засобів технічної діагностики [125, 149] та обґрунтованої оцінки залишкового ресурсу роботи елементів трубопровідного транспорту [78, 148]. Закон України "Про трубопровідний транспорт" визначає поняття діагностування як комплекс заходів щодо визначення технічних параметрів трубопроводів" [39].

Довготривала ефективна робота нафтогазопроводів можлива при допустимому рівні технологічних навантажень матеріалу труб, які з урахуванням умов експлуатації визначають їх залишковий ресурс [25, 34, 42, 56]. Одним із вирішальних моментів в процесі експлуатації трубопроводів є визначення дійсного розподілу напружень і деформацій в МТ, зокрема в місцях їх зварних з'єднань, а також корозійних дефектів металу труби. Особливо це стосується кільцевих зварних швів МТ. Оскільки якість виготовлення поздовжніх швів контролюється на заводі, а точність виконання кільцевих швів у польових умовах, особливо неповоротних зварних стиків труб, визначається в більшості випадків кваліфікацією зварювальника. Корозійні дефекти утворюються внаслідок інтенсивної взаємодії металу труби із навколишнім середовищем (грунтом, повітрям, водою) в кожному конкретному випадку по своєму. Тому слід враховувати вплив комплексу природних та технологічних умов у процесі експлуатації елементів газотранспортної системи на її технічний стан.

Своєчасне виявлення дефектів і ремонт елементів трубопровідного транспорту виходячи з їх фактичного стану є однією з найважливіших технічних задач. Це диктує необхідність розроблення і освоєння нових підходів до методів оцінки та технічної діагностики трубопроводів [48, 89]. Президент НАН України Б. Є. Патон, у своєму виступі на розширеному

засіданні технічного комітету з діагностування і неруйнівного контролю наголосив на необхідність розв'язання задач в галузі діагностування технічних об'єктів з довготривалим терміном експлуатації з використанням сучасних досягнень науки і техніки [110].

Трубопровідний транспорт разом із системою резервуарів та сховищ потребують надійної роботи, що ґрунтується на досконалому діагностуванні та оцінці їх технічного стану [14, 47, 53, 147, 166]. Разом з тим, експлуатація більшості трубопроводів ведеться вже тривалий час, постійно зростає їх відсоток із відпрацьованим амортизаційним терміном [29, 50]. У зв'язку з цим дуже гостро стоїть проблема всестороннього обстеження МТ з рекомендаціями щодо можливостей подальшого їх використання [128, 138, 143]. Проблему оцінки надійності трубопроводів необхідно вирішувати комплексно [52, 55, 101, 148], включаючи визначення напружено-деформованого стану матеріалу труб [7, 114]. Як показали дослідження [34, 105], розвиток дефектів залежить від додаткових напружень, що зумовлені різного роду зовнішніми та внутрішніми чинниками.

Проблемами оцінки технічного стану і раціональних режимів експлуатації трубопроводів та визначення напружень в околі зварних стикових з'єднань із кільцевими швами і корозійних дефектів займалося багато дослідників. Вагомий внесок у розробку теоретичних та експериментальних досліджень умов роботи МТ у різний час зробили: Айбіндер А. Б. [1], Бабін Л.А. [3], Березін В.Л. [13], Бородавкін П.П. [16], Вінокуров В.А. [22–24], Грудз В.Я. [32], Капцов І.І. [44], Карпаш О.М. [45], Кирьян В.І. [47], Ковалко М.П. [51], Крижанівський Є.І. [59, 69], Куркін С.А. [62], Лобанов Л.М. [65–68], Махненко В.І. [70–75], Недосека А.Я. [82–83], Ніколаєв Г.А. [84–86], Осадчук В.А. [90–97], Патон Б.Є. [104–112], Перун Й.В. [113, 114], Підстригач Я.С. [117–121], Сагалевич В.М. [129], Середюк М.Д. [132], Талипов Г.В. [134], Фомічов С.К. [140, 141], Шлапак Л.С. [145–149] та інші дослідники. Аналіз опублікованих за даною проблемою робіт дав

можливість виділити комплекс задач, що мають важливе народногосподарське значення і які були покладені в основу дисертаційної роботи.

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження виконували в рамках програми “Нафта і газ України до 2010 року”, регіональної програми “Визначення залишкового ресурсу конструкцій, споруд і машин тривалої експлуатації та розробка заходів щодо підвищення терміну їх безаварійної роботи на 2001–2005 рр.”, та проекту 5.4.8.Б “Розробка методів теоретично-експериментального визначення напружено-деформованого стану та залишкового ресурсу за міцністю зварних металевих конструкцій при неоднорідному нагріві та силовому навантаженні”, номер державної реєстрації 0103U006117.

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

Відповідно до мети були поставлені такі задачі:

- розвинути розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень в околі стикового кільцевого зварного з'єднання труб, ураховуючи неоднорідність їх розподілу під давачами вимірювальних приладів та вплив структурно-фазових перетворень в зоні термічного впливу на магнітну проникність металу;
- дослідити напружений стан зварних стиків труб, ураховуючи їх часткову релаксацію в процесі експлуатації нафтогазопроводів;
- створити математичну модель для визначення концентрації напружень в околі поверхневих дефектів у МТ в зоні зварного шва та її реалізацію методом скінченних елементів;
- розробити переносний пристрій для вимірювання розмірів дефектів МТ і дослідити напружений стан біля них;

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

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

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

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

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

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

– розвинуто розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень біля стикових зварних швів без попереднього оброблення торців труб, який ґрунтується на розв'язанні обернених задач механіки деформівних твердих тіл із власними напруженнями з використанням експериментальної інформації, здобутої фізичними методами, і врахуванням неоднорідності їх розподілу під давачами вимірювальних

приладів та структурно-фазових змін у зоні термічного впливу;

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

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

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

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

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

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

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

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

Результати досліджень практично застосовано для оцінки технічного стану і під час ремонтів магістрального газопроводу (МГ) “Союз” на ділянці УМГ “Прикарпаттрансгаз” (сподіваний економічний ефект від реалізації

запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 189,6 тис. грн.), та під час проведення технічного нагляду над будівництвом нафтопроводу “Одеса-Броди” (передбачуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій за актом впровадження становить 170 тис. грн.).

Особистий внесок здобувача. Автор дисертації виконав таку працю:

1. Проаналізувавши результати технічного стану МГ з довготривалим терміном експлуатації, запропонував технологію їх діагностики і паспортизації в УМГ “Львівтрансгаз” [10, 35, 55, 153].

2. Запропонував і впровадив технологію підготовки і проведення внутрішньотрубної діагностики МГ на газопроводах УМГ “Львівтрансгаз” [6, 49].

3. Експериментально визначив напружено-деформований стан МГ за допомогою електромагнітного методу [7, 114].

4. Визначив залишкові напруження біля кільцевих зварних з'єднань труб, урахувавши нерівномірність їхнього розподілу під давачами приладів та структурні зміни у зоні термічного впливу [9, 11].

5. Запропонував і опрацював методику обчислення напружень в околі дефектів у формі півеліпсоїда обертання методом скінченних елементів [5, 8, 90].

6. Розробив пристрій для контролю дефектів поверхні МГ [36].

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

3-й Науково-технічній конференції і виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового обладнання”. (Івано-Франківськ, 2002); VI-й (Москва, 1996); IX-й (Сочі, 1999); XI-й (Туніс, 2001); XII-й (Туреччина, 2002) і XIII-й (Мальта, 2003) Міжнародних ділових зустрічах «Діагностика»; IV-му (1999); V-му (2001) і VI-му (2003) Міжнародному симпозіумі українських інженерів-

механіків у Львові; VI-й Міжнародній науково-практичній конференції "Нафта і газ України - 2000" (Івано-Франківськ, 2000); 5-й Міжнародній конференції "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій" (Луцьк, 2002); Міжнародній конференції-виставці "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів" "КОРОЗІЯ" (Львів, 2002).

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

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

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

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Напружено-деформований стан в магістральних трубопроводах та проблеми його визначення

В газотранспортній системі України використовуються трубопроводи з діаметрами від 300 до 1400 мм, значна частина яких експлуатується вже більше 30 років, а деякі МТ перевищили свій амортизаційний термін експлуатації [45]. В Україні, яка володіє великим комплексом транзитних та розподільчих трубопроводів, питанням визначення їх напружено-деформованого стану та всебічної діагностики відводиться особливе значення. Досвід показує, що трубопровідний транспорт залишається високоефективним і надійним засобом забезпечення споживачів енергоносіями [2, 29, 51, 81].

Вирішення проблеми забезпечення надійності роботи МТ переважно залежить від оцінки технічного стану лінійної частини трубопроводів, що є найбільш протяжною і частіше всього розташованою у важкодоступних і складних для проведення діагностики умовах [99, 113, 116].

При теоретичному дослідженні ділянку нафтогазопроводу можна представити як циліндричну оболонку. Проектування циліндричної частини оболонок базується на безмоментній теорії, яка побудована на припущенні, що оболонки є гнучкими і не можуть чинити опір дії згинаючих і крутних моментів. Таке припущення дозволяє нехтувати напруженнями від згину і кручення. Припускається, що напруження в такій безмоментній оболонці розподіляються рівномірно за товщиною. Основним силовим фактором, що діє на лінійну частину магістральних трубопроводів (ЛЧМТ) є внутрішній тиск транспортованої речовини (у випадку транспортування газу, тиск може

сягати величини до 25 МПа). Рівень напружень, що виникають при цьому в коловому та осьовому напрямках регламентується відповідними нормативними документами та подається в довідковій літературі [25, 37, 78, 122, 133]. Методологічні аспекти взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів висвітлені в [14, 59, 148]. Характер руйнування труб під дією внутрішнього тиску у трубопроводах з поверхневими дефектами наведено в роботі [160]. Першочергові заходи зі зменшення ризику і попередження аварій на газопроводах перчислені в роботах [29, 125, 126].

Однак, усі викладені міркування є справедливими для ділянок, що віддалені від місць можливої концентрації напружень. Для ділянок, де існують суттєві концентратори, слід детальніше враховувати силові та деформаційні фактори, бо реальний напружений стан значно перевищує розрахункові значення і є однією з причин, що приводять до аварійних ситуацій на МТ [34, 125, 148, 155, 156].

При оцінці стану відповідальних магістральних трубопроводів значну увагу слід приділяти потенційно небезпечним ділянкам [10, 113, 145], що характеризуються найбільшими напруженнями, зокрема, в місцях:

- прогину труб під дією зовнішніх навантажень;
- зміни профілю перерізу (овали);
- корозійних дефектів;
- із різноманітними технологічними дефектами;
- зі зварними з'єднаннями.

"Як відомо, аварії під час експлуатації трубопроводів через руйнування монтажних зварних стиків займають друге місце після аварій, спричинених корозією" [69].

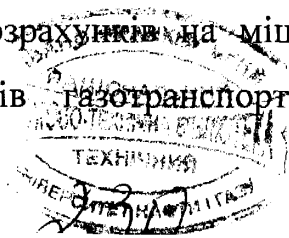
При визначенні працездатності трубопроводу, в потенційно-небезпечних місцях, перш за все, слід визначити зони із максимальними діючими напруженнями.

Працездатність магістральних і розподільних трубопроводів повинна забезпечуватися на усіх стадіях: від проектування і будівництва до експлуатації цих систем. Як правило, міцність добре забезпечена на стадії проектування: проведені розрахунки, вибраний матеріал, запроектовано відповідні запаси міцності, прорахований ресурс роботи конструкції. Однак в процесі будівництва і подальшої експлуатації відбуваються їх зміни, тобто відхилення від встановлених режимів експлуатації, зміни в діючих зовнішніх навантаженнях. Це призводить до незворотніх процесів, перш за все в матеріалі, особливо на потенційно небезпечних ділянках ЛЧМТ.

Проведені обстеження роботи МТ показали [30, 89, 124], що їх термін експлуатації в основному залежить від корозійної стійкості основного металу та зварного з'єднання труб.

Особливу увагу для забезпечення надійності лінійної частини трубопровідних систем необхідно приділяти на стадії їх експлуатації. Важлива роль при цьому відводиться технічному діагностуванню, як ефективному засобу прогнозування та запобігання аварійних ситуацій, а також екологічного захисту і забезпечення промислової безпеки. При цьому існуючі підходи до забезпечення надійної експлуатації ґрунтуються, як правило, на своєчасному виявленні дефектів, які виникли та розвиваються з тих чи інших причин та прогнозуванні залишкового ресурсу роботи ділянок нафтогазопроводів з такими дефектами.

Нормативні документи з діагностичного контролю МТ розроблені в Україні, а також діючі ще з часів Радянського Союзу не охоплюють усіх існуючих проблем, що виникають при експлуатації трубопровідних систем. Все це приводить до серйозних недоліків при проведенні оцінки технічного стану трубопроводів і як наслідок до не повністю обґрунтованих висновків [89,149]. Будівельні норми та тимчасові методики, що регламентують порядок здійснення розрахунків на міцність, стійкість та прогнозування довговічності елементів газотранспортної системи [25, 78], вже не



відповідають сучасному рівню розвитку наукових знань, не систематизовані за критеріальними ознаками та не передбачають врахування різної природи дефектів [89]. Існуючі розрахунки не враховують екстремальних ситуацій, які виникають в трубопроводах, прокладених в гірських районах з різко пересіченим рельєфом місцевості і змінами гідрогеологічних властивостей ґрунтів, а також на переходах через водні перешкоди і заболочені ділянки. Комплексне вирішення вказаних задач в основі своїй повинно мати методологію діагностики напружено-деформованого стану (НДС) МТ, яка б дозволила оцінити і прогнозувати працездатність потенційно небезпечних ділянок газотранспортної системи. Виходячи з вище наведеного, необхідно передбачити доповнення “до ВБН з розрахунку впливу дефектів на статичну міцність, в якому передбачалось би існування різних граничних станів і гнучкої системи коефіцієнтів запасу” [89].

Негативною тенденцією в галузі нафтогазотранспортної системи є збільшення кількості трубопроводів, що відпрацювали свій амортизаційний термін або близькі до цього. Так, наприклад, газотранспортна система України у своєму складі має до 60% газопроводів із терміном експлуатації від 15 до 50 років [29, 125]. Тому проблема підтримування безпечної експлуатації і надійної працездатності існуючих трубопроводів є дуже актуальною в нафтогазовій промисловості. При цьому забезпечення безаварійної експлуатації ЛЧМТ є першочерговим завданням, оскільки:

- * МТ працюють у важких умовах експлуатації;
- * аварії МТ можуть супроводжуватись значними економічними і екологічними збитками, а іноді і людськими жертвами.

Залежність умовної сили опору матеріалів трубопроводів руйнуванню від терміну їх експлуатації графічно зображена на рис. 1.1 [107]. Аналіз цих графіків показує, що внаслідок закінчення прогнозованого терміну експлуатації трубопроводів існує реальна небезпека руйнування таких конструкцій.

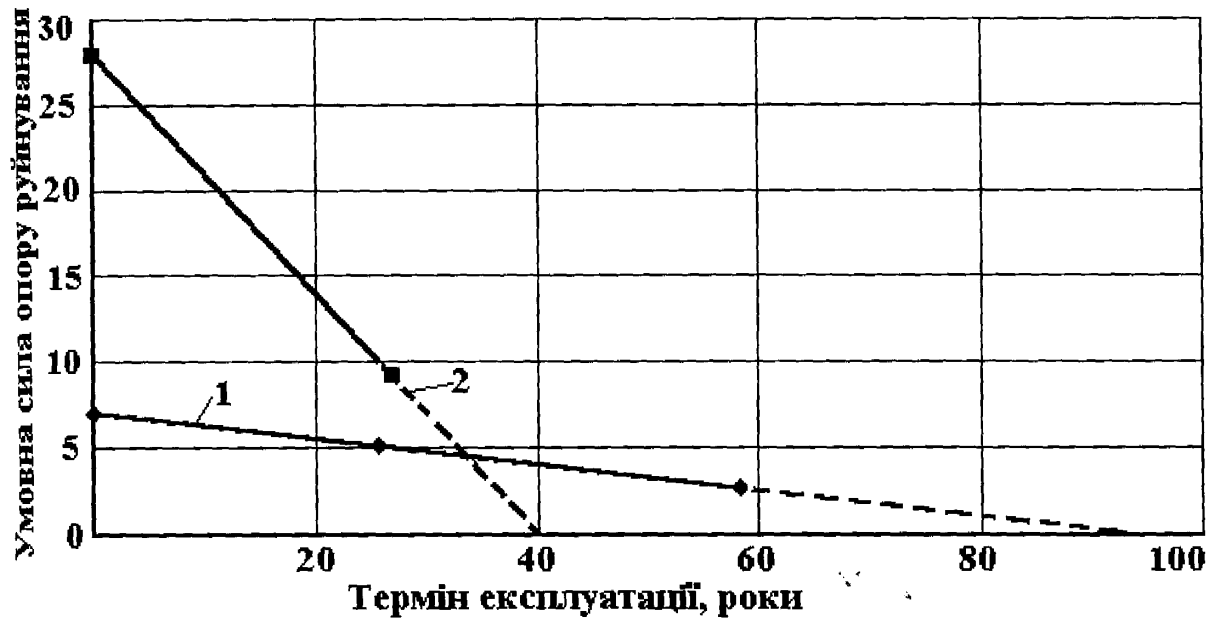


Рис. 1.1. Залишковий ресурс матеріалів труб: 1 – Сталь 20, 2 – 17 ГС [107]

Автор роботи [47] приходить до висновку, що умови експлуатації трубопроводів відмінні від нормативних можуть значно впливати на механічні властивості металу труб. Причому суттєву роль в цьому випадку відіграє напружено-деформований стан трубопроводу обумовлений зварними з'єднаннями і корозійними дефектами та іншими концентраторами напружень.

Крім можливого зниження механічних властивостей матеріалу труб, необхідно враховувати ймовірність передчасного виходу з ладу системи трубопровідного транспорту внаслідок дії зсувів та ерозії ґрунту. Аналіз результатів досліджень технічного стану надземних балкових переходів через ріки і заболочені ділянки показав наявність значних поперечних і поздовжніх переміщень трубопроводів на опорах, які залежать від цілого ряду чинників: конструктивних схем переходів, температурних змін, відхилень від проектних рішень (і їх помилок) допущених в процесі

будівництва і експлуатації МТ, умов заземлення підземних ділянок переходів, накопичення деформацій на багатопрогінних балкових переходах. Це особливо відчутно у місцях технологічного ослаблення МТ, а саме трубних зварних стикових з'єднаннях із кільцевими швами. Переважно залишкові напруження не приводять до руйнування трубопроводу в початковий період експлуатації завдяки високим механічним властивостям основного матеріалу і зварного шва, але з часом вони знижуються і ймовірність появи дефектів збільшується.

Багатолітня практика експлуатації МТ показала, що у вирішенні загальної проблеми підвищення їх надійності найменш вивченими залишаються питання, пов'язані з отриманням об'єктивної інформації про дійсний напружений стан металу труб, особливо в околі кільцевих зварних швів. При діагностуванні напруженого стану нафтогазопроводів широке застосування знайшли неруйнівні методи – рентгенівський, магнітний, ультразвуковий, метод акустичної емісії тощо. Кожен з цих методів має свої недоліки та переваги, однак ні один із них не задовольняє всіх вимог, що висуваються до методів неруйнівного контролю трубопровідних систем. Тому перспективним є їх комплексне застосування, яке разом з математичним моделюванням може дати обґрунтовані результати.

Експериментальні дослідження напружень і деформацій в трубопроводах, що розташовані на зсувних і інших ділянках траси, проводяться в комплексі з геодезичними вимірюваннями переміщень ґрунтових мас та інженерно-геологічними дослідженнями.

Однак визначення напружень лише експериментальними методами (при умові, коли їх значення нижче критичних) на якій-небудь з ділянок МТ не забезпечує достатню інформацію про його реальний напружений стан. У зв'язку з цим велике практичне значення для оцінки і прогнозування технічного стану ЛЧМТ мають також розрахунково-експериментальні методи дослідження напружень, що виникають в трубопроводах, в тому

числі з врахуванням їх просторового положення.

Таким чином дуже важливим є перехід до комплексного використання розрахункових та експериментальних методів досліджень МТ, що дало б можливість більш точно визначити реальний напружений стан трубопроводів і оцінити залишковий ресурс їх роботи.

1.2. Дефекти трубопроводів та концентрація напружень в їх околі

Одним з головних концентраторів напружень є дефекти матеріалу труб МТ. Вони можуть виникати як при спорудженні МТ так і в процесі їх експлуатації. Результати аналізу внутрішньотрубного діагностування [4, 49, 50, 159] та зовнішнього обстеження [34, 54] показують, що найчастіше втрати матеріалу спричинені дією корозійного середовища. При цьому найбільш небезпечною є не обширна корозія (дія якої прогнозується), а наявність локальних дефектів типу виразок-каверн [78]. Особливо часто вони спостерігаються в околі стикових зварних з'єднань кільцевими швами, які переважно виконуються в польових умовах. Основними чинниками, що впливають на якість такого зварного шва в МТ є глибина проплавлення стінки труби і величина зони термічного впливу та механічні властивості металу труби [40, 68]. Цей тип з'єднань також характеризується значною концентрацією залишкових зварювальних напружень, які нерівномірно розподіляються за товщиною матеріалу і вздовж відстані від шва.

Аналіз літературних джерел, науково-дослідних та виробничих звітів [68, 109, 143] показав певні закономірності розподілу дефектів в магістральних трубопроводах. Їх можна сформулювати у вигляді наступних висновків:

- 1) дефекти типу вм'ятин, випуклостей, стрес-корозія зустрічаються на локальних ділянках;

2) дефекти типу зовнішньої та внутрішньої корозії, виразок-каверн, задрів і т. д. розподіляються по всій поверхні трубопроводів достатньо рівномірно [25, 78].

Корозія металу є однією із головних причин виникнення аварійних ситуацій в трубопроводному транспорті. Причому на практиці рівномірна корозія (менш небезпечний вид корозії, розвиток і наслідки якої легко прогнозуються) зустрічається рідко. В більшості випадків це – локальні виразки-каверни, піттинг корозія [25, 78]. На рис. 1.2 наведено деякі результати статистичного аналізу даних внутрішньотрубного діагностичного обстеження магістрального газопроводу “Івацевичі-Долина III нитка” на ділянці від КС “Ковель” до КС “Сокаль”. Результати обстежень, проведені інтелектуальним поршнем фірми “H.Rosen Engineering GmbH” [163].

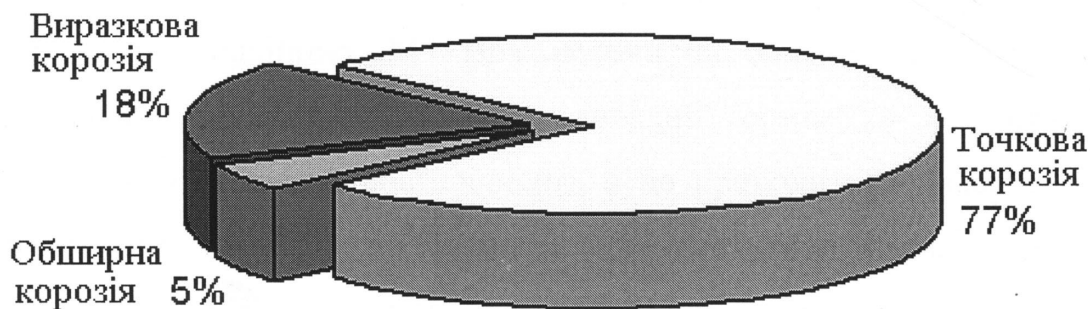


Рис. 1.2. Розподіл числа корозійних пошкоджень у металі труби

Зрозуміло, що пошкоджений навіть значною локальною корозією, трубопровід втрачає свою працездатність не відразу, а має (в залежності, від ступеня небезпеки дефекту і швидкості корозійного процесу) деякий залишковий ресурс. Визначальною при цьому є величина напружень в околі дефектів, які підсумовують вплив усіх небезпечних факторів і можуть бути деякою кількісною характеристикою безпечної роботи трубопроводу.

Теоретичне дослідження міцності великогабаритних магістральних трубопроводів з поверхневими заглибинами вимагає розв’язування

просторової задачі пружно-пластичності. Числові методи дослідження просторових пружно-пластичних задач міцності та руйнування дозволяють зі значними затратами машинного часу отримати розв'язки конкретних задач для заданих геометричних та фізико-механічних параметрів МТ при статичних та деяких видах динамічного навантаження трубопроводів. Однак узагальнені дані про вплив поверхневих тривимірних дефектів на міцність тонкостінних елементів відсутні навіть для статичного навантаження. Більше того, мало вивченими є навіть пружні просторові задачі такого типу [34, 89].

1.3. Залишкові напруження у зварних стикових з'єднаннях із кільцевим швом магістральних нафтогазопроводів

Залишкові напруження, що виникають при різних технологічних операціях під час монтажу і експлуатації трубопроводів суттєво впливають на працездатність і надійність МТ. Враховуючи, що більшість магістральних нафтогазопроводів експлуатується вже тривалий термін, то збільшуються вимоги до їх надійності та довговічності, а це приводить до необхідності більш глибокого вивчення проблеми залишкових напружень, зокрема у зварних швах [69]. Кільцеві зварні шви МТ виконуються в трасових умовах і як правило їх руйнування відбувається найчастіше.

Інколи залишкові напруження можуть досягати значної величини, співрозмірної з границею текучості і суттєво впливати на міцність і надійність елементів МТ [15, 61, 69, 139].

Спостерігаються випадки, коли залишкові напруження можуть самі по собі викликати крихке руйнування без додаткових зовнішніх дій.

1.3.1. Причини виникнення залишкових напружень у зварних швах. Утворення залишкових напружень при виконанні кільцевих швів нафтогазопроводів здійснюється за рахунок колового стиснення металу в зоні пластичних деформацій та вигину стінки труби. Залишкові напруження залежать від механічних та хімічних властивостей металу труби, їх геометричних розмірів, а також параметрів зварювання. В багат шарових швах на залишкові напруження додатково ще впливають нерівномірність усадки поперек шва і послідовність виконання валиків [62, 71]. При оцінці впливу залишкових напружень на роботу трубопроводу необхідно знати величину, знак і характер розподілу напружень в перерізі труби.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що залишкові напруження в трубопроводах великих діаметрів, в яких зона зустрічі початку і кінця зварного шва складає невелику частину периметра, практично можна вважати осесиметричними [22]. Винятком є електрошлакові шви, залишкові напруження в яких по всій ймовірності не будуть осесиметричними, оскільки спостерігається значна нерівномірність усадження шва по довжині.

Величина напружень і пластичних деформацій у шві трубопроводу також залежить від послідовності накладання валиків і типу розробки крайок. Усадка перших шарів відбувається при порівняно нежорсткому зв'язку між трубами, що з'єднуються, і тільки при накладанні останніх шарів жорсткість шва та труби стають близькими за величиною. У зв'язку з цим деформація трубопроводу визначається шляхом інтегрування прогинів від окремих шарів зварювання із врахуванням змінної жорсткості труб [74]. Дальшому розвитку теорії формування деформацій та напружень у зварних з'єднаннях сприяло застосування теорії пластичності в умовах рухомого поля [72].

Деформації вигину труби в зоні зварного стикового шва приводять до значної нерівномірності розподілу напружень за товщиною стінки трубопроводу. Найбільші залишкові кільцеві та осьові напруження в МТ

виникають на внутрішній поверхні труби в зоні зварного шва. На зовнішній поверхні в зоні шва трубопроводу осьові напруження переходять із розтягальних у стискальні. Кільцеві напруження на зовнішній поверхні зберігають свій характер розподілу, однак є значно меншими, ніж на внутрішній поверхні трубопроводу, що пов'язано з розвантаженням під дією деформацій вигину. Отже, за рівнем напружень на зовнішній поверхні трубопроводу не можна робити висновки про значення максимальних кільцевих залишкових напружень в зоні зварного шва.

Осьові напруження в МТ розподілені майже антисиметрично за товщиною стінки труби, і на її внутрішній поверхні в зоні шва розтягальні осьові напруження часом співрозмірні з кільцевими. Деформації вигину в навколошовній зоні зростають при збільшенні погонної енергії зварювання [72–75]. За осьовою координатою розподіл осьових та кільцевих напружень в різних поперечних перерізах трубопроводу має змінний характер з інтенсивним згасанням [24, 46]. Типовий характер розподілу залишкових напружень на зовнішній та внутрішній стінках трубопроводу у зоні стикового зварного з'єднання двох труб, виготовлених з низьколегованої сталі, подано на рис. 1.3.

Для сталей, у яких структурні перетворення протікають при температурах, що менші за $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, залишкові напруження можуть мати принципово інший характер. Під час структурних перетворень при охолодженні зварного шва проходить різка зміна об'єму. За рахунок цього розтягальні напруження, що виникають на стадії охолодження, переходять у стискальні [64, 71].

Залишковий двовимірний напружений стан в околі кільцевого зварного шва трубопроводу знижує статичну та втомну міцність стикового з'єднання і з часом може привести до його руйнування [60, 107]. Питання руйнування

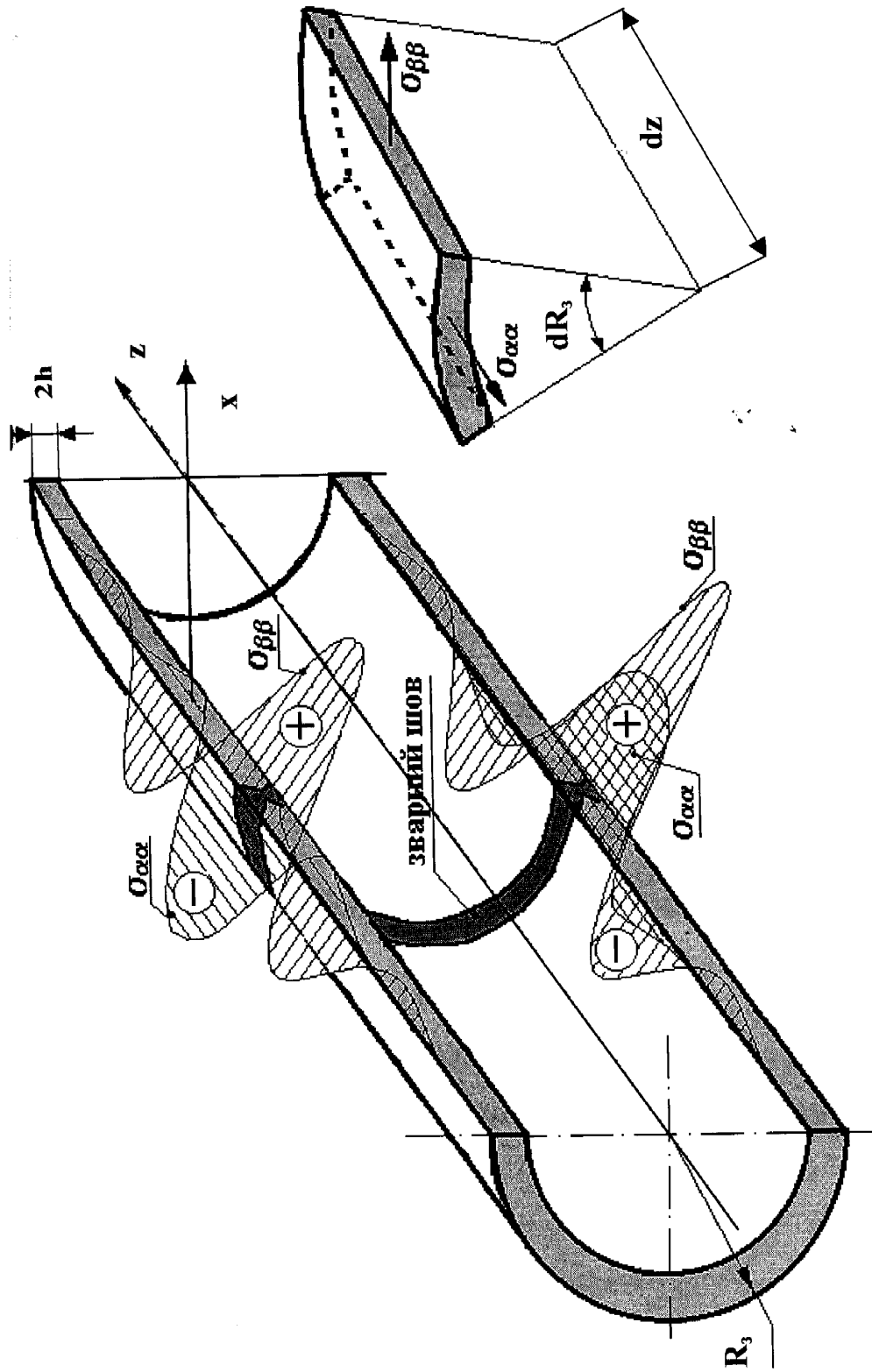


Рис. 1.3. Розподіл залишкових напружень на зовнішній та внутрішній стінках трубопроводу у зварному стиковому з'єднанні із кільцевим швом: R_3 - зовнішній радіус труби; $2h$ - товщина стінки труби; $\sigma_{\alpha\alpha}$ - осьові напруження, $\sigma_{\beta\beta}$ - кільцеві напруження; + - розтягальні напруження; - - стискальні напруження

металу стінки труби під впливом внутрішнього тиску у процесі зварювання трубопроводу під тиском розглянуті в роботі [18].

Залишкові напруження негативно впливають і на корозійну стійкість трубопроводів внаслідок виникнення міжкристалітних корозійних тріщин у навколошовній зоні [28, 71].

1.3.2. Вплив параметрів режиму зварювання труб на рівень залишкових напружень. Погонна енергія зварювання, при інших однакових умовах, суттєво впливає на розміри шва та навколошовної зони, степінь перегріву зварювальної ванни, швидкість охолодження різних ділянок з'єднання трубопроводів. В результаті цього міняються механічні властивості металу труб в околошовній зоні. Це питання стає особливо актуальним при монтажі та ремонті магістральних нафтогазопроводів, зварювальні роботи на яких проводяться у трасових умовах. Для забезпечення утворення оптимальних структур та властивостей зварного з'єднання строго регламентуються значення параметрів режиму зварювання стиків трубопроводів [20].

Згідно з нормативною документацією допускається незначна варіація величин параметрів зварювання. Погонна енергія і технологія зварювання МТ суттєво впливають на рівень залишкового напруженого стану в стиковому зварному з'єднанні труб [71, 72]. Допустима в широкому діапазоні зміна величини теплового балансу процесу зварювання труб ускладнює прогнозування рівня напружень в стиковому з'єднанні трубопроводів. Отже, вивчення впливу режимів зварювання труб на рівень залишкових напружень є особливо актуальним для забезпечення високої експлуатаційної надійності МТ.

Проблеми впровадження нових технологій та проведення атестації зварювальних робіт, які застосовуються при монтажі трубопроводів, розглянуті в [18, 63].

1.4. Методи дослідження залишкових напружень в зварних з'єднаннях трубопроводів

Експериментальне визначення залишкових напружень та деформацій в трубопроводах проводиться різними методами в залежності від конструкції і від того, наскільки повну картину розподілу напружень необхідно отримати [9, 11, 38, 83, 103, 150]. Ці методи розділяють на дві основні групи: руйнівні і неруйнівні. Розглянемо їх у комплексі з методами визначення залишкових зварювальних напружень, бо оцінка працездатності трубопроводу із дефектом поверхні може передбачати його наявність в околі зварного з'єднання.

1.4.1. Руйнівні методи визначення залишкових напружень. Руйнівні методи визначення залишкових напружень передбачають руйнування конструкції. До руйнівних методів визначення залишкових напружень перш за все належать механічні методи. Суть яких полягає в тому, що проводиться повне або часткове розрізання елемента конструкції з подальшим вимірюванням деформацій, що виникли при цьому. Тут використовується той факт, що при розрізанні елемента конструкції на окремі частини проходить перерозподіл залишкових напружень біля вільної поверхні. Застосування руйнівних методів не завжди можливо з точки зору забезпечення подальшої експлуатації конструкції. Наприклад, у випадку діючих магістральних нафтогазопроводів.

У зварному з'єднанні, в залежності від конфігурації і співвідношення його розмірів, може бути лінійний, плоский чи об'ємний напружений стан. Зв'язок між деформаціями і напруженнями описується законом Гука.

Отже, для визначення компонентів напруженого стану трубопроводів необхідно знати відповідні пружні деформації [12, 123, 135]. При

дослідженні напружено-деформованого стану зварних з'єднань, як правило визначають нормальні напруження, оскільки дотичні переважно мають малу величину [158]. Експериментальне визначення напружень зводиться до знаходження пружних деформацій ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z , для чого на виробі в досліджуваній зоні підготовлюють так звані бази вимірювання [46]. При лінійному напруженому стані досить підготувати одну базу, напрямком якої збігається з напрямком очікуваної деформації (рис. 1.4.а).

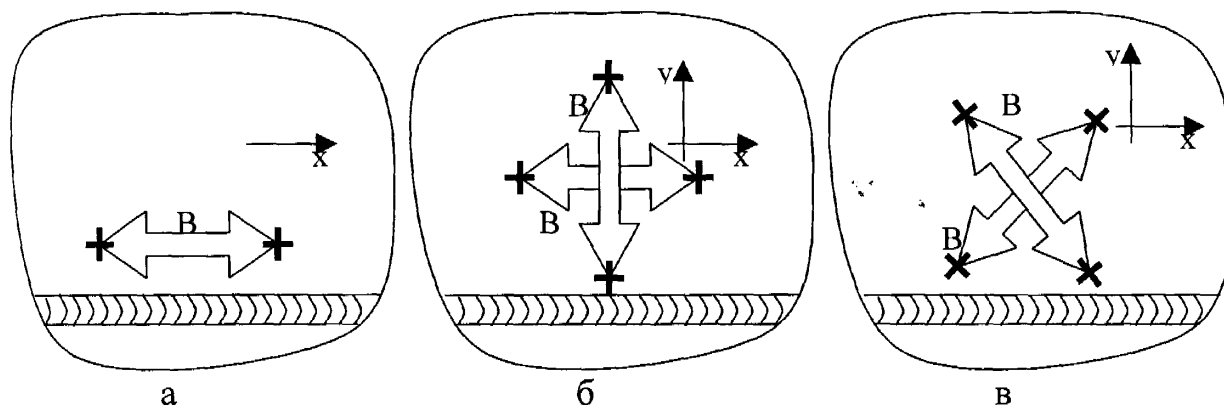


Рис.1.4. Розташування вимірювальних баз

У випадку плоского напруженого стану можуть бути два варіанти підготовки баз: якщо відомий напрямок головних напружень, то готують бази в двох головних напрямках (рис. 1.4.б); якщо ж напрямок головних напружень невідомий, то готують бази не менш, як в чотирьох напрямках (рис. 1.4.в) і за даними вимірювань будують еліпс напружень у точці і знаходять напрямок головних нормальних напружень.

Деформації вимірюють, як правило, електричними тензометрами або механічними деформометрами.

У практиці експериментальних досліджень напружено-деформованого стану зварних конструкцій значне місце займають механічні деформометри [46, 140]. У залежності від необхідної точності вимірювання, діапазону вимірюваних величин, розроблено різні типи механічних деформометрів. Однак вони переважно складаються з двох основних вузлів: корпусу з

важільною системою і перетворювача деформації. У залежності від конструкції вимірювальних важелів деформометр встановлюють на базу вимірювання, підготовлену на виробі у вигляді циліндричних западин діаметром 0,8 – 1,2 мм чи у вигляді сферичних відбитків.

Вимірювана деформація бази за допомогою важільної системи передається на перетворювач деформації. Найчастіше застосовують перетворювачі механічні, оптичні, струнні, ємнісні, п'єзоелектричні, індуктивні, магнітопружні, механотронні, пневмоконтактні тощо [83].

Останнім часом широкого застосування для вимірювання залишкових напружень набув спосіб, що використовує оптично активні давачі [76]. Напружений стан в оптичному давачі досліджується за допомогою одностороннього полярископа.

Іntenсивно розвиваються методи голографічної інтерферометрії для визначення залишкових напружень на поверхнях зварних елементів конструкцій [83]. При проведенні експериментів з визначення залишкових напружень використовуються малогабаритні голографічні прилади з оптичною схемою, яка чутлива до переміщень.

1.4.2. Неруйнівні методи. Неруйнівні методи дають можливість контролювати рівень напружень та інші властивості конструкцій, не порушуючи його цілісності і суцільності. Ці методи відіграють важливу роль при проведенні діагностики трубопроводів [83].

Такі методи дослідження і контролю напруженого стану, як рентгенівський, електромагнітний, ультразвуковий, електротензометрії тощо широко застосовуються при оцінці технічного стану трубопровідних систем. Однак їх використання при визначенні напружень у зварювальному шві має ряд особливостей. Це пояснюється тим, що зварювання труб супроводжується не тільки пружно-пластичними деформаціями, що викликають напруження, але й різними фізико-хімічними процесами в

навколошовній зоні, які зумовлюють неоднорідність властивостей зварного з'єднання і виникнення залишкових напружень. Великий градієнт зміни напружень у відносно малому об'ємі також створює додаткові труднощі при дослідженні НДС стикових зварних з'єднань трубопроводів. Давачі в більшості випадків охоплюють досить велику площу поверхні (100 – 350 мм²). Це ускладнює вимірювання за рахунок великого градієнту зміни напружень у відносно малому об'ємі, який необхідно враховувати. Тому проблема розроблення методів з визначення НДС, що дають інформацію в більш локальному об'ємі трубопроводу, є актуальною.

Ультразвуковий метод визначення залишкових напружень базується на залежності швидкості поширення ультразвукової хвилі в металах від їх напруженого стану. Ультразвуковий метод вимірювання напружень в трубопроводах дає можливість вимірювати напруження як на моделях, так і на діючих нафтогазопроводах [33, 98, 111, 114, 144, 146, 151, 152]. При проведенні вимірювань за допомогою цього методу застосовуються поперечні (зсувні) і поздовжні ультразвукові хвилі. Широке практичне застосування для вимірювань швидкостей поширення ультразвуку в металах отримав прилад, у якому використовується спосіб автоциркуляції імпульсу [78, 148].

Електромагнітні методи визначення залишкових напружень базуються на вивченні особливостей взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з механічними змінами об'єкта [77, 83]. Оцінку напруженого стану феромагнетиків здійснюють на основі залежності зміни їх магнітних властивостей від напружень, а також корелятивного зв'язку між амплітудою вихрових струмів та рівнем напружень [141].

Останнім часом для оцінки напруженого стану трубопроводів досить широко застосовують магнітопружний метод [78, 83]. В його основу покладено той факт, що під дією механічних напружень значно змінюються властивості феромагнітних матеріалів. При наявності в кристалічному тілі

напружень деформується гратка, і атоми зміщаються щодо положення, які вони займали під час відсутності напружень, внаслідок чого змінюється і характер магнітної взаємодії між атомами кристала. Отже, вимірявши зміну магнітної проникності в результаті дії напружень, і, користуючись тарувальними коефіцієнтами, можна визначити величину діючих в трубопроводі напружень.

Рентгенівський метод дослідження залишкових напружень базується на вимірюванні зміни відстані між кристалографічними площинами під дією напружень. Рентгенівський метод використовується в лабораторній практиці для вимірювань на малих зразках. Вимірювання цим методом напруженого стану на МТ пов'язано з великими матеріальними затратами, технічною складністю і відносно низькою точністю.

1.4.3. Розрахункові методи. Розрахункові методи визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях можна розділити на дві групи. Перша група – це методи, що базуються на відображенні розвитку пружно-пластичних деформацій у процесі нагрівання і вирівнювання температур під час зварювання. Реалізація цих методів основана на використанні даних про температурні поля в поєднанні з математичними моделями теорії термопластичності. Як правило, навіть для випадку порівняно простих зварних з'єднань це досить складна задача. Друга група – це наближені розрахункові методи визначення залишкових напружень і деформацій. Більшість результатів про розподіл залишкових напружень в зварних швах отримана за їх допомогою [17, 40, 102, 161, 162, 164, 165].

Для спрощення розрахунків використовується припущення про одновісність зварювальних напружень. Враховуються тільки ті напруження, що діють у напрямку, паралельному до осі шва, а інші – вважаються досить малими і ними нехтують. Згідно з цим припущенням окремі шари матеріалу розширюються вільно вздовж осі і за товщиною труби. При цьому

припускають відсутність зсувів на основі гіпотези плоских перерізів. При формуванні шва перерізи можуть переміщуватись у напрямку осі шва, повертатись на деякий кут, але не можуть викривлятись.

Найбільш повно наближені методи розроблені в працях К. М. Гатовського, Г. А. Ніколаєва, І. П. Трочуна і Н. О. Окерблома [27, 28, 85, 88, 137].

Результати, отримані за цими методами, добре співпадають з результатами отриманими експериментально. Вище розглянуті методи можуть бути використані в основному для визначення поздовжніх залишкових деформацій і напружень у протяжних елементах типу довгих пластин або балок [28, 84]. Наведені методи можливо застосовувати для аустенітних сталей та низьковуглецевих і низьколегованих сталей із границею текучості до 300 МПа, у яких структурно-фазові перетворення при охолодженні завершуються вище за 870°К [28, 86].

Обмеження щодо використання цих методів при визначенні поздовжніх деформацій і напружень виникають в таких випадках. По-перше, коли поперечні перерізи сильно викривляються і не дотримується гіпотеза плоских перерізів. По-друге, коли температурна деформація при зварюванні близька до деформації межі текучості металу, що зварюється. Незначні відхилення від гіпотези плоских перерізів впливають на проходження пластичних деформацій, що приводить до помилкових результатів при розрахунках.

При дослідженні зварювальних напружень використовують і "пружні" розв'язки. Такий підхід запропонований у методі "пружних" розв'язків О. А. Ільюшина. Цей метод знайшов застосування при розв'язуванні задач, пов'язаних із зварювальними технологіями як в точній постановці, коли вони служать початковою інформацією для отримання пластичного розв'язку, так і в наближеній постановці.

Наближений метод, запропонований Г.Б.Талиповим [134], використовує математичний апарат теорії пластичності. Автор у своїй роботі [134] розглядає формування залишкових напружень в зварному шві як температурну задачу середовища, що деформується. В цьому методі прийнято припущення, що кожен метал різко втрачає свою здатність чинити опір пластичним деформаціям у певному вузькому інтервалі температур. При подальших розрахунках вважається, що це відбувається за певної середньої в цьому інтервалі температури. Таке припущення, хоч і віднесено Г. Б. Талиповим до основних, не суттєво зменшує точність методу. Значно більший вплив на точність розрахунків зварних з'єднань має друге припущення [134]. Згідно якого розрахунок проводиться відразу на стадії охолодження, а деформації, які відбуваються в процесі нагрівання, не враховуються. При цьому вважають, що температура у цей період не змінюється.

Талиповим Г. Б. [134] запропоновано також інший підхід, який полягає в наступному. Приймається, що причиною утворення залишкових деформацій і напружень в зварному з'єднанні є виключно температурне укорочення зони, у якій температура була вищою за T_K . Вважається, що зазначена зона набуває початкових пластичних деформацій укорочення у тих напрямках, в яких при нагріванні було обмежене температурне розширення. Тому пропонують на границях цієї зони і до решти об'єму металу, який пластично не деформувався, прикласти силу протилежного напрямку щоб усунути "щілини" між цими зонами. При цьому напруження і деформації, що утворюються в зварному з'єднанні вважаються залишковими. Перевага цього методу полягає в можливості розглядати неоднорідні задачі, на основі використання математичних моделей теорії пружно-пластичних деформацій. До недоліків методу можна віднести той факт, що процес виникнення пластичних деформацій під час нагрівання не розглядається. Початкові деформації вважаються однаковими в коловому і радіальному напрямках. Це

означає, що не приймаються до уваги поперечне усадження в зварному з'єднанні, яке виникає при нагріванні. В той час, як для двовісних задач пластичні деформації, що утворюються при нагріванні, у ряді випадків є неоднаковими у різних напрямках.

В розрахунковому методі, запропонованому В. С. Ігнат'євою [43], вводиться припущення про миттєве формування зварного шва по всій довжині. При цьому розрахунок залишкових деформацій та напружень проводиться після визначення тимчасових деформацій і напружень на стадії нагрівання. Для даного температурного поля визначаються тимчасові умовні напруження методами теорії термопружності. Границя області пластичних деформацій визначається за інтенсивністю обчислених напружень. Компоненти пластичних деформацій, що виникають в процесі зварювання, обчислюються за теорією пружно-пластичних деформацій. Поле цих деформацій для спрощення розрахунку замінюється деяким полем "фіктивних температур". Залишкові напруження визначаються як температурні напруження фіктивного поля температур.

Характерним для цього методу є те, що на стадії нагрівання визначаються з певним наближенням деформації і напруження в зварному з'єднанні, які потім в якості початкових параметрів використовуються для визначення поля залишкових напружень. Точність такого методу можна підвищити, якщо при розрахунку залишкових напружень вводити початкові пластичні деформації без заміни їх фіктивними полями температур.

В працях [70–77] задача про напруження і деформації, що виникають в процесі зварювання, подається у пружно-пластичній постановці деформування тіла в умовах змінних температур. Таким чином задача зводиться до системи нелінійних диференціальних рівнянь із відомими крайовими умовами. Аналітичні розв'язки таких систем можливі тільки для часткових випадків при значному спрощенні процесу деформування, що не відтворює дійсних технологічних параметрів зварювання. Кращі результати

при розв'язуванні таких задач можна отримати, використовуючи числові методи в поєднанні із сучасним програмним забезпеченням.

Необхідно відзначити наступні шляхи розв'язування пружно-пластичних задач, що виникають при зварюванні, а саме: безпосереднє чисельне диференціювання та інтегрування нелінійних рівнянь і варіаційні розв'язки.

На основі принципів пружних розв'зків можна подати задачу теорії пластичності у вигляді послідовності задач теорії пружності з деякими додатковими умовами. Найбільш практичне застосування знайшли принципи додаткових об'ємних сил і додаткових навантажень та змінних параметрів пружності.

Махненко В.І. при дослідженні деформацій і напружень, що виникають при зварюванні запропонував змішаний принцип розв'язків [72], а саме: принцип додаткових деформацій у сукупності зі змінним модулем зсуву.

Розрахунково-аналітичний метод визначення залишкових напружень, що виникають при зварюванні, в умовах плоского напруженого стану, який базується на дислокаційній теорії про залишкові напруження, поданий Б.С. Касаткіним [46].

Розрахункові методи визначення залишкових деформацій і напружень пов'язані з численними допущеннями і спрощеннями реального процесу, тому в них неможливо врахувати всі діючі технологічні фактори. Особливо це стосується великогабаритних виробів складної геометричної форми. Наприклад, магістральні нафтогазопроводи, матеріал яких у процесі зварювання змінює свою структуру. Недоліки розрахункових методів також проявляються при аналізі напружено-деформованого стану трубопроводів після їх часткового термооброблювання або таких, що перебувають в довготривалій експлуатації.

1.4.4. Розрахунково-експериментальні методи. Одним з ефективних методів визначення залишкових напружень є розрахунково-експериментальні методи, що ґрунтуються на попередньо експериментально встановлених закономірностях.

Поширеним підходом при визначенні залишкових напружень у різних зварних з'єднаннях є введення в розрахунок заданих множин залишкових деформацій. Задача зводиться до визначення напружень, що відповідають заданим залишковим деформаціям. Однією з перших робіт в цьому напрямку є праця Є.О. Патона та його учнів [112], в якій запропонована ідея розрахункової оцінки залишкових зварювальних напружень в циліндричній оболонці на основі тензорної функції усадки. В цій роботі досліджено умови виникнення зварювальних напружень у циліндричних оболонках від кільцевих і поздовжніх швів.

Аналітичний розрахунок залишкових напружень у тонких оболонках для попередньо заданого характеру розподілу залишкових деформацій запропоновано в роботі [118]. Функції, що характеризують розподіл залишкових деформацій, рекомендується визначати експериментально на моделі і використовувати їх для розрахунку напружень в оболонках з іншими геометричними параметрами.

Розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових напружень в оболонкових конструкціях розвинуто Я. С. Підстригачем, В. А. Осадчуком та їх учнями Л. В. Базилевичем, Р. М. Кушніром, А. М. Марголіним, М. М. Николишиним, І. Б. Прокоповичем, С. Т. Сідельниковим, В. Ф. Чекуріним, та ін., який в літературі називають методом умовних пластичних деформацій [90–97]. Цей метод базується на розв'язанні обернених задач механіки деформованих тіл із залишковими власними деформаціями і використанні експериментальної інформації, яку отримують за допомогою неруйнівних фізичних методів. Базовими є рівняння

деформованих твердих тіл, які враховують наявність пластичних деформацій, що описуються тензорним полем. Враховуючи отриману інформацію про розподіл цих деформацій будується розв'язок прямої задачі і записуються вирази для визначення напружень, у які входять невідомі шукані параметри даного поля. Для їх знаходження будується функціонал, в який входять з певними ваговими функціями квадрати різниць компонент тензора напружень або їх інтегральних характеристик, отриманих одним із експериментальних методів σ^E і відповідних виразів для напружень, отриманих теоретичним шляхом σ^T . Мінімізація цього функціоналу за шуканими параметрами забезпечує мінімальне відхилення відповідних теоретично обчислених σ^T і експериментально отриманих σ^E полів напружень. Після знаходження цих параметрів, записують поле залишкових пластичних деформацій і обчислюють напруження у довільній точці трубопроводу.

Цей метод дозволяє використовувати експериментальну інформацію, здобуту за допомогою окремих неруйнівних фізичних методів або їх синтезу. Особливо це стає важливим у випадку дослідження напруженого стану реальних об'єктів, з довготривалим терміном експлуатації, наприклад, магістральних нафтогазопроводів.

1.5. Основні задачі та напрямки досліджень

Проаналізувавши існуючі на сьогодні методи визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях стосовно їх придатності для діагностування напруженого стану в околі зварних кільцевих швів магістральних нафтогазопроводів, можна зробити наступні висновки. Розрахункові методи, особливо для МТ тривалої експлуатації, не можуть бути використані, тому що, як правило, відсутні точні відомості про параметри режимів, за яких проводилось зварювання, а також термооброблення і способи забезпечення

часткової релаксації залишкових напружень. За допомогою неруйнівних експериментальних методів отримуємо інформацію про усереднену різницю головних напружень по поверхні контакту давача приладів для вимірювань (електромагнітний метод) або по об'єму під давачем (ультразвуковим методом). Враховуючи значні градієнти залишкових напружень в малих об'ємах в біляшовній зоні, усереднені їх характеристики можуть значно відрізнитись від значень окремих компонентів напружень вздовж відстані від осі шва і по товщині труби. Це утруднює, а часто і неможливе використання неруйнівних методів для визначення залишкових напружень в околі кільцевих швів трубопроводів.

У зв'язку з цим розвиток існуючих та розроблення нових розрахунково-експериментальних методів визначення залишкових напружень в околі зварних стиків труб є важливим та актуальним технічним завданням, особливо при діагностуванні МТ тривалої експлуатації.

В даній дисертаційній роботі були поставлені задачі:

- розвинути розрахунково-експериментальний метод умовних пластичних деформацій для визначення залишкових технологічних напружень в околі кільцевого стикового зварного з'єднання труб МТ і урахувати нерівномірність їх розподілу під давачами приладів, що використовуються в неруйнівних методах, і залежність початкових показників вимірювань від структурно-фазових перетворень в зоні термічного впливу;

- дослідити перерозподіл залишкових напружень в околі зварного шва, викликаний наявністю в ньому корозійних дефектів типу виразок-каверн і оцінити їх вплив на міцність МТ.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТРУБНИХ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ

Залишкові напруження і деформації, спричинені різними технологічними операціями, зокрема зварюванням, суттєво впливають на міцність, точність виготовлення, тримкість конструкцій та споруд. Спостерігаються випадки, коли залишкові напруження самі по собі можуть викликати крихке руйнування без додаткових зовнішніх дій. Тому необхідне вдосконалення методів їх визначення при проведенні контролю стану зварних конструкцій і споруд тривалої експлуатації, зокрема магістральних нафтогазопроводів засобами технічної діагностики з метою оцінки їх залишкового ресурсу. Одним з ефективних підходів до визначення залишкових напружень є розрахунково-експериментальний метод, що ґрунтується на використанні розв'язків рівнянь механіки деформівних тіл з власними напруженнями і експериментальної інформації, здобутої неруйнівними методами.

Суть методу полягає в наступному. Спочатку записуються основні співвідношення і диференціальні рівняння механіки деформівних тіл з залишковими деформаціями, які одержуються з використанням зображення компонентів тензора деформації $\{e_{ij}\}$ у вигляді суми: $e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0$, де e_{ij} – компоненти тензора повної деформації, e_{ij}^e – компоненти тензора пружної деформації, e_{ij}^0 – компоненти тензорного поля умовних пластичних власних деформацій, несумісність яких зумовлює виникнення залишкових напружень. При цьому поле e_{ij}^0 враховує, крім пластичних деформацій, також деформації,

зумовлені різного роду структурними перетвореннями, які супроводжуються зміною об'єму матеріалу. Далі з використанням, зокрема, фундаментальних розв'язків або функцій Гріна розв'язувальних рівнянь будуються інтегральні подання компонентів тензора напружень через невідомі компоненти поля деформацій e_{ij}^0 . Щоб знайти це поле, використовується експериментальна інформація про поле залишкових напружень σ_{ij} або їх інтегральні характеристики, яку, зокрема, можна здобути одним з неруйнівних (фізичних) методів або за допомогою синтезу цих методів, та будується функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальні відхилення експериментально визначених I_m^E від аналогічних теоретично обчислених I_m^T характеристик полів напружень. Тоді задача про знаходження поля e_{ij}^0 розв'язується як обернена задача механіки деформівних тіл з власними напруженнями і є умовно коректною. Розв'язок такої задачі будується на певних підмножинках допустимих розв'язків, зокрема, на компактній множині [136], що забезпечує його стійкість до малих змін вхідних параметрів, які одержуються на основі експериментальних даних. Після знаходження поля e_{ij}^0 обчислюються компоненти тензора залишкових напружень в довільній точці тіла, зокрема ті, які не можна отримати експериментально.

2.1. Розвиток математичної моделі експериментально-розрахункового методу

Розглянемо задачу про визначення залишкових напружень у замкненій циліндричній оболонці з кільцевим швом. У кільцевих з'єднаннях оболонок (труб), виконаних за один або багато проходів, шви при зварюванні виконуються послідовно, а не одночасно по всьому периметру, тому залишкові

напруження в зоні зустрічі початку і кінця шва будуть відрізнятися від напружень в інших місцях з'єднання. Строго кажучи, розподіл напружень з цієї причини не буде осесиметричним. Але, як показують експериментальні дослідження, залишкові напруження в МТ великих діаметрів, в яких зона зустрічі початку і кінця шва складає невелику частину периметра, практично можна вважати осесиметричними [22]. Винятком є електрошлакові шви, напруження в яких, за всієї ймовірності, не повинні бути осесиметричними, оскільки спостерігається значна нерівномірність усадження по довжині шва. В МТ малого діаметру, зварених за один прохід, зона зустрічі початку і кінця шва складає значну частину периметра і спричиняє порушення осесиметричного напруженого стану.

2.1.1. Математична модель методу. Нехай кругова циліндрична оболонка (труба) завтовшки $2h$ знаходиться в рівновазі під дією поля залишкових технологічних деформацій e_{ij}^0 , зумовлених зварюванням. Матеріал оболонки будемо вважати однорідним та ізотропним. Положення довільної точки на серединній поверхні оболонки радіусом R визначатимемо її координатами z і φ , де z – відстань точки від початкового перерізу, взята вздовж твірної, φ – кут, що утворюється довільною площиною, яка проходить через вісь обертання, з початковою. Оскільки вибір початкових перерізів $z=0$, $\varphi=0$ є довільним, надалі будемо їх суміщати з площинами симетрії полів власних деформацій e_{ij}^0 , якщо така симетрія є в даній конкретній задачі. Надалі зручніше буде користуватись безрозмірними координатами

$$\alpha = z / R, \quad \beta = \frac{\pi}{2} + \varphi, \quad (2.1)$$

які пов'язані з декартовими співвідношеннями $x = -R \sin \beta, y = -R \cos \beta, z = R\alpha$ (рис. 2.1).

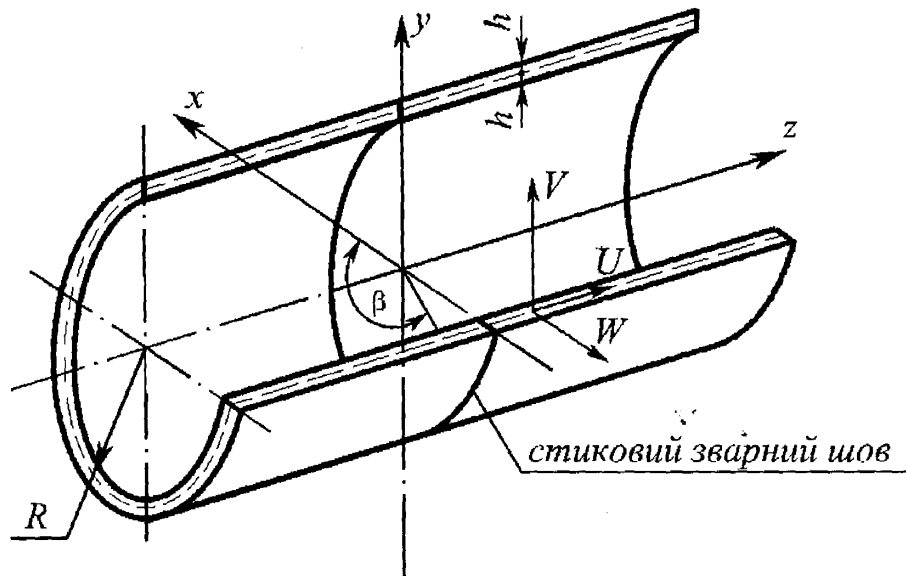


Рис. 2.1. Схема стикового зварного з'єднання трубопроводу у вигляді замкненої колової циліндричної оболонки: U, V, W – компоненти вектора переміщень точки серединної поверхні вздовж осі, в напрямку дуги кола і в напрямку нормалі до серединної поверхні

Розглянемо нескінченно довгу оболонку, зварену з двох частин кільцевим швом (стикове з'єднання). Віднесемо оболонку до триортгональної системи координат α, β, γ , де γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні і початок координат виберемо на осі шва. Тоді, за умов відсутності осьових зусиль, ключове рівняння задачі для визначення функції прогину $W(\alpha)$ в рамках гіпотези Кірхгофа-Лява можна записати у вигляді [95].

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4a^4\right)W = 4a^4 R \varepsilon_{\beta\beta}^0 - R^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (k_{\alpha\alpha}^0 + \mu k_{\beta\beta}^0). \quad (2.2)$$

Тут

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

$$k_{\beta\beta}^0 = \frac{3}{2h^2} \int_{-h}^h e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad (2.3)$$

$a^4 = 3R^2(1 - \mu^2)/4h^2$, μ – коефіцієнт Пуассона.

При цьому колове зусилля N_2 , осьовий M_1 та кільцевий M_2 згинальні моменти, нормальні осьові $\sigma_{\alpha\alpha}$ і колові $\sigma_{\beta\beta}$ напруження визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} N_2 &= D_0 \left(\frac{W}{R} - \varepsilon_{\beta\beta}^0 \right), \quad M_1 = -\frac{D_1}{R^2} \left[\frac{d^2 W}{d\alpha^2} + R^2 (\kappa_{\alpha\alpha}^0 + \mu \kappa_{\beta\beta}^0) \right], \\ M_2 &= -\frac{D_1}{R^2} \left[\mu \frac{d^2 W}{d\alpha^2} + R^2 (\kappa_{\beta\beta}^0 + \mu \kappa_{\alpha\alpha}^0) \right], \\ k_{\beta\beta}^0 &= \frac{3}{2h^2} \int_{-h}^h e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) d\gamma, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha} &= \frac{3}{2h^3} M_1 \gamma + \frac{E}{1 - \mu^2} \left[\varepsilon_{\alpha\alpha}^0 + \kappa_{\alpha\alpha}^0 \gamma - e_{\alpha\alpha}^0 + \mu (\varepsilon_{\beta\beta}^0 + \kappa_{\beta\beta}^0 \gamma - e_{\beta\beta}^0) \right], \\ \sigma_{\beta\beta} &= \frac{1}{2h} \left(N_2 + 3M_2 \frac{\gamma}{h^2} \right) + \frac{E}{1 - \mu^2} \left[\varepsilon_{\beta\beta}^0 + \kappa_{\beta\beta}^0 \gamma - e_{\beta\beta}^0 + \mu (\varepsilon_{\alpha\alpha}^0 + \kappa_{\alpha\alpha}^0 \gamma - e_{\alpha\alpha}^0) \right], \end{aligned}$$

$$\text{де } D_0 = 2Eh, \quad D_1 = \frac{2Eh^3}{3(1 - \mu^2)}, \quad E - \text{модуль Юнга.}$$

В праву частину рівняння (2.2) входять невідомі функції $\varepsilon_{\beta\beta}^0, \kappa_{\beta\beta}^0$, які відтворюються в процесі розв'язку оберненої задачі за допомогою експериментальної інформації.

Для побудови інтегрального подання характеристик напруженого стану використаємо фундаментальний розв'язок рівняння

$$\left(\frac{d^4}{d\alpha^4} + 4a^4 \right) W^* = \delta(\alpha), \quad (2.5)$$

який запишемо у вигляді [95]

$$W^*(\alpha) = \frac{1}{8a^4} e^{a|\alpha|} (\cos a\alpha + \sin a|\alpha|).$$

В рівнянні (2.5) через $\delta(\alpha)$ позначено δ – функцію Дірака.

Використавши тепер операцію згортки, для довільного згасаючого на нескінченності поля деформацій e_{ij}^0 , вираз для прогину $W(\alpha)$ подамо у вигляді

$$W(\alpha) = \frac{aR}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{\beta\beta}^0(\zeta) K_1(\zeta - \alpha) d\zeta + \frac{R^2}{4a} \int_{-\infty}^{\infty} [\kappa_{\alpha\alpha}^0(\zeta) + \mu\kappa_{\beta\beta}^0(\zeta)] K_2(\zeta) d\zeta, \quad (2.6)$$

де

$$K_1 = e^{-a|\zeta - \alpha|} [\cos a(\zeta - \alpha) + \sin a|\zeta - \alpha|],$$

$$K_2 = e^{-a|\zeta - \alpha|} [\cos a(\zeta - \alpha) - \sin a|\zeta - \alpha|].$$

Якщо підставити вираз (2.6) у формули (2.4), то отримаємо інтегральні подання для визначення напружень $\sigma_{\alpha\alpha}$, $\sigma_{\beta\beta}$ в довільній точці труби через компоненти тензора деформацій e_{ij}^0 . Використовуючи такі вирази, можна сконструювати їх комбінації, зокрема, інтеграли від різниці головних напружень по деяких поверхневих і об'ємних областях оболонки, які можна виміряти відомими фізичними методами: магнітопружності, ультразвуковим, поляризаційно-оптичним, голографічної інтерферометрії тощо.

Тепер для визначення невідомого тензорного поля власних деформацій e_{ij}^0 на основі аналізу апріорної інформації вибирається певна підмножина допустимих розв'язків. Такою інформацією, зокрема, є результати аналізу одержаних в літературі аналітичних розв'язків деяких задач [72] і

експериментальних даних, одержаних руйнівними методами [23, 84, 85, 130, 150]. Проведений аналіз показує, що пластичні деформації зосереджені в деякій невеликій області біля шва і плавно згасають на її границі. При цьому в області пластичних деформацій функції, що описують компоненти тензорного поля e_{ij}^0 можуть мати монотонний характер, як, наприклад, для маловуглецевих і низьколегованих сталей, в яких структурні перетворення проходять при високих температурах (за яких границя текучості близька до нуля), так і немонотонний характер для матеріалів, в яких структурні перетворення проходять при порівняно низьких температурах. Для деяких легованих сталей компоненти поля e_{ij}^0 в області пластичних деформацій можуть навіть змінювати знак [22, 24, 64].

Для тонких оболонок у разі осесиметричної задачі поле $e_{ij}^0(\alpha, \gamma)$ зобразимо як ряд за степенями γ та обмежимося до квадратичних членів розвинення:

$$e_{ii}^0(\alpha, \gamma) = F_{0i}(\alpha) + F_{1i}(\alpha) \frac{\gamma}{h} + F_{2i}(\alpha) \frac{\gamma^2}{h^2}, \quad i = \alpha, \beta. \quad (2.7)$$

Зважаючи на те, що деформації e_{ii}^0 локалізовані в області шва і можуть бути описані гладкими функціями, апроксимуємо $F_{vi}(\alpha)$ виразами

$$F_{vi}(\alpha) = \begin{cases} \sum_{K=0}^{nj} a_{Kj}^{(v)} \varphi_{Kj}(\alpha), & \alpha_{1j}^0 \leq \alpha \leq \alpha_{2j}^0 \\ 0, & \alpha \leq \alpha_{1j}^0, \quad \alpha \geq \alpha_{2j}^0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Гут позначено: $\varphi_{ki}(\alpha)$ ($i = \alpha, \beta$) – задані лінійно незалежні функції, зокрема, поліноми; $a_{kj}^{(v)}$ – невідомі (шукані) параметри ($j = 1$, якщо $i = \alpha$; $j = 2$, якщо $i = \beta$); n_j – скінченні цілі числа; $\alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0$ – шукані координати перерізів, які характеризують межі розподілу поля умовних пластичних деформацій.

Оскільки компоненти поля e_{ii}^0 є обмеженими, то з цього витікає, що параметри $|a_{kj}^{(v)}| \leq C, k = 0, \bar{n}_j$. Значення параметрів $\alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0$ не перевищують деякого числа α^* , яке дорівнює максимальній величині межі поля пластичних деформацій. Таким чином, множина функцій, що описується виразами (2.7), (2.8) скінченно вимірна, обмежена і є компактною множиною, що забезпечує стійкість розв'язків оберненої задачі визначення шуканих параметрів $a_{kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0$ шляхом мінімізації відповідного функціоналу [136]. При цьому внаслідок гладкості поля e_{ij}^0 (неперервності функцій та їх похідних на межі області пластичних деформацій: $\alpha_1 = \alpha_{1j}^0, \alpha = \alpha_{2j}^0$) параметри $a_{kj}^{(v)}$ повинні задовольняти умови

$$F_{vi} = 0, \quad \frac{dF_{vi}}{d\alpha} = 0, \quad \alpha_1 = \alpha_{1j}^0, \quad \alpha = \alpha_{2j}^0 \quad (2.9)$$

Підставивши тепер вирази (2.7), (2.8) в (2.3), (2.6), а потім в (2.4), отримаємо співвідношення для обчислення залишкових напружень в довільній точці трубопроводу, які подано у вигляді

$$\sigma_{aa}(\alpha, \gamma) = \frac{3\gamma}{2h^3} M_1(\alpha) + \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left[\sum_{k=0}^{n_1} a_{k1}^{(2)} \varphi_{ka}(\alpha) S_1^0(\alpha) + \mu \sum_{k=0}^{n_2} a_{k2}^{(2)} \varphi_{k\beta}(\alpha) S_2^0(\alpha) \right],$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2h} N_2(\alpha) + \frac{3\gamma}{2h^3} M_2(\alpha) + \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left[\sum_{k=0}^{n_2} a_{k2}^{(2)} \varphi_{k\beta}(\alpha) S_2^0(\alpha) + \right.$$

$$+ \mu \sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(2)} \varphi_{K\alpha}(\alpha) S_1^0(\alpha) \quad], \quad (2.10)$$

де

$$N_2(\alpha) = D_0 \left\{ \frac{a}{2} \sum_{K=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3} a_{K2}^{(2)}) f_{1K}(\alpha) + \frac{R}{4a} \left[\sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(1)} f_{4K}(\alpha) + \sum_{K=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)} f_{3K}(\alpha) \right] - \sum_{K=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3} a_{K2}^{(2)}) \varphi_{K\beta}(\alpha) S_2^0(\alpha) \right\}.$$

$$M_1(\alpha) = D_1 \left\{ \frac{a^3}{R} \sum_{n=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3} a_{K2}^{(2)}) f_{3K}(\alpha) - \frac{a}{2} \left[\sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(1)} f_{2K}(\alpha) + \mu \sum_{n=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)} f_{1K}(\alpha) \right] \right\},$$

$$M_2(\alpha) = \mu M_1(\alpha) - D_1 (1 - \mu^2) \sum_{k=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)} \varphi_{K\beta}(\alpha) S_2^0(\alpha),$$

$$f_{1K}(\alpha) = \int_{\alpha_{12}^0}^{\alpha_{22}^0} \varphi_{K\beta}(\zeta) K_1(\zeta - \alpha) d\zeta, \quad f_{2K}(\alpha) = \int_{\alpha_n^0}^{\alpha_{21}^0} \varphi_{K\alpha}(\zeta) K_1(\zeta - \alpha) d\alpha,$$

$$f_{3K}(\alpha) = \int_{\alpha_{12}^0}^{\alpha_{22}^0} \varphi_{K\beta}(\zeta) K_2(\zeta - \alpha) d\zeta, \quad f_{4K}(\alpha) = \int_{\alpha_{11}^0}^{\alpha_{21}^0} \varphi_{K\alpha}(\zeta) K_2(\zeta - \alpha) d\zeta,$$

$$S_1^0(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha_{11}^0 \leq \alpha \leq \alpha_{21}^0 \\ 0, & \alpha < \alpha_{11}^0, \alpha > \alpha_{21}^0, \end{cases} \quad S_2^0(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha_{12}^0 \leq \alpha \leq \alpha_{22}^0 \\ 0, & \alpha < \alpha_{12}^0, \alpha > \alpha_{22}^0. \end{cases}$$

Для знаходження параметрів $a_{Kj}^{(\nu)}$, $\alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0$ використаємо експериментальну інформацію, яку можна здобути за допомогою вимірювань одним із фізичних методів або їх синтезу. Позначимо величини, які можна одержати за допомогою вимірювань, через $I_m^E(\sigma_n)$. У відповідність цим величинам запишемо вирази через компоненти напружень, які отримуємо за

допомогою співвідношень (2.10) і позначимо їх $I_m^T(\sigma_{ii})$. Побудуємо тепер функціонал

$$g(a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_n [I_m^T(\Omega_n, a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) - I_m^E(\Omega_n)]^2, \quad (2.11)$$

де $I_m^E(\Omega_n)$ – різновидності інтегральних експериментальних характеристик, Ω_n – підобласті оболонки, в яких ці характеристики вимірюються; r_n – деякі вагові множники.

Обернена задача про визначення поля деформацій $\varepsilon_{ij}^0(\alpha, \gamma)$ зводиться до знаходження параметрів $a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0$, за яких є мінімальний функціонал (2.11) на множині функцій (2.7), (2.8) для різних чисел членів n_1, n_2 . При цьому числа n_1, n_2 є “природними” [21] параметрами регуляризації. За наближений розв’язок задачі приймаємо величини $a_{Kj}^{-(v)}, \alpha_{1j}^{-0}, \alpha_{2j}^{-0}$, які забезпечують найменше значення функціонала g .

2.1.2. Особливості застосування неруйнівних методів. При визначенні характеристик напруженого стану в магістральних трубопроводах широко використовують магнітопружний і ультразвуковий фізичні методи. При цьому, будуючи функціонал (2.11), слід враховувати наступні чинники, які призводять до похибок вимірювань:

- методи дають інформацію не про окремі компоненти напруженого стану, а про їх комбінацію (різницю головних напружень);
- давачі приладів не забезпечують достатню локальність досліджуваної області при проведенні вимірювань;
- на покази приладів впливає зміна структурно-фазового складу матеріалу в зоні термічного впливу зварного з’єднання.

Для випадку ультразвукового та магнітопружного методів, в результаті вимірювань отримуються значення різниці головних напружень:

для магнітопружного методу

$$\sigma^{+E}(\alpha) = \sigma_{\beta\beta}(\alpha, +h) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, +h),$$

для ультразвукового методу

$$\sigma_0^E(\alpha) = \sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma).$$

Враховуючи, що при експериментальних дослідженнях існуючими приладами за допомогою показників вимірювань магнітопружним методом визначають усереднену по площі поверхні контакту давача з поверхнею труби ψ різницю головних напружень

$$\sigma_+^E(\alpha_n) = \frac{1}{\psi_1} \iint_{\psi} [\sigma_{\beta\beta}(\alpha, +h) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, +h)] d\psi, \quad (2.12)$$

а при використанні ультразвукового методу – усереднену по певному об'єму по всій товщині оболонки V , що знаходиться під поверхнею контакту ψ_0 давача з трубою

$$\sigma_0^E(\alpha_m) = \frac{1}{V_0} \iiint_V [\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma)] dV, \quad (2.13)$$

аналогічні величини потрібно записати за допомогою виразів, отриманих теоретичним способом

$$\sigma_+^T(\alpha_n; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) = \frac{1}{\psi_1} \iint_{\psi} [\sigma_{\beta\beta}(\alpha, +h; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, +h; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0)] d\psi, \quad (2.14)$$

$$\sigma_0^T(\alpha_m; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) = \frac{1}{V_0} \iiint_V [\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0)] dV. \quad (2.15)$$

Тут α_n і α_m – координати центрів поверхонь давачів, ψ_1 – площа поверхні контакту ψ , $V_0 = 2h\psi_2$, ψ_2 – площа поверхні контакту ψ_0 . З використанням такої експериментальної інформації функціонал (2.11) записуємо у вигляді

$$g(a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) = \sum_{n=1}^{N_1} p_n [\sigma_+^T(\alpha_n; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) - \sigma_+^E(\alpha_n)]^2 + \sum_{m=1}^{N_2} q_m [\sigma_0^T(a_m; a_{Kj}^{(v)}, \alpha_{1j}^0, \alpha_{2j}^0) - \sigma_0^E(a_m)]^2. \quad (2.16)$$

Величини σ_+^T і σ_0^T , що описуються виразами (2.14), (2.15) враховують неоднорідність розподілу залишкових напружень під контактуючими поверхнями давача і оболонки.

Вищенаведені співвідношення описують математичну модель для визначення залишкових напружень в трубі в околі стикового зварного шва в загальному випадку, коли зони пластичних деформацій зліва і справа від зварного шва можуть бути різними. Якщо умови, за яких відбувається зварювання і термооброблення є однаковими зліва і справа від шва, то наведені співвідношення спрощуються. У цьому випадку можна прийняти, що $\alpha_{11}^0 = \alpha_{21}^0 = \alpha_{22}^0 = \alpha_0$ ($\alpha_0 = X_0 / R$, X_0 – півширина зони пластичних деформацій).

Вибравши тепер функції $\varphi_{ki}(\alpha)$ у вигляді звичайних поліномів, тобто $\varphi_{ki}(\alpha) = \alpha^k$, формули для обчислення напружень у довільній точці трубопроводу запишемо у вигляді

$$\sigma_{aa}(\alpha, \gamma) = \frac{3\gamma}{2h^3} M_1(\alpha) + \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left[\sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(2)} \alpha^K + \mu \sum_{K=0}^{n_2} a_{K2}^{(2)} \alpha^K \right] S^0(\alpha),$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2h} N_2(\alpha) + \frac{3\gamma}{2h^3} M_2(\alpha) + \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left[\sum_{K=0}^n a_{K2}^{(2)} \alpha^K + \mu \sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(2)} \alpha^K \right] S^0(\alpha). \quad (2.17)$$

Тут

$$N_2(\alpha) = D_0 \left\{ \frac{a}{2} \sum_{K=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3} a_{K2}^{(2)}) \alpha^K + \frac{R}{4a} \left[\sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(1)} w_{2k}(\alpha) + \sum_{K=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)} w_{2k}(\alpha) \right] - \right.$$

$$-\sum_{k=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3}a_{K2}^{(2)})\alpha^k S^0(\alpha) \},$$

$$M_1(\alpha) = D_1 \left\{ \frac{a^3}{R} \sum_{n=0}^{n_2} (a_{K2}^{(0)} + \frac{1}{3}a_{K2}^{(2)})w_{1k}(\alpha) - \frac{a}{2} \left[\sum_{K=0}^{n_1} a_{K1}^{(1)}w_{1k}(\alpha) + \mu \sum_{n=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)}w_{1k}(\alpha) \right] \right\},$$

$$M_2(\alpha) = \mu M_1(\alpha) - D_1(1 - \mu^2) \sum_{k=0}^{n_2} a_{K2}^{(1)}\alpha^k S^0(\alpha),$$

$$w_{1k}(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \alpha^k K_1(\zeta - \alpha) d\zeta, \quad w_{2k}(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \alpha^k K_2(\zeta - \alpha) d\zeta,$$

$$S^0(\alpha) = \begin{cases} 1, & |\alpha| \leq \alpha_0, \\ 0, & |\alpha| > \alpha_0. \end{cases}$$

Невідомими параметрами у цьому випадку є $a_{kj}^{(v)}$ і α_0 , а функціонал (2.16) набуває вигляду

$$g(a_{Kj}^{(v)}, \alpha_0) = \sum_{n=1}^{N_1} p_n [\sigma_+^T(\alpha_n; a_{Kj}^{(v)}; \alpha_0) - \sigma_+^E(\alpha_n)]^2 + \sum_{m=1}^{N_2} q_m [\sigma_0^T(\alpha_m; a_{Kj}^{(v)}; \alpha_0) - \sigma_0^E(\alpha_m)]^2. \quad (2.18)$$

Мінімізація функціоналу (2.18) забезпечує мінімальне відхилення знайдених теоретично характеристик полів напружень σ_+^T , σ_0^T від експериментальних σ_+^E , σ_0^E і дозволяє визначити шукані параметри $a_{kj}^{(v)}$, α_0 . Після їх визначення за формулами (2.17) обчислюємо залишкові напруження в довільній точці трубопроводу. Зауважимо, що при визначенні величин $\sigma_+^E(\alpha_n)$, $\sigma_0^E(\alpha_m)$ слід оцінити вплив структурно-фазового складу матеріалу в зоні

термічного впливу зварного з'єднання на зміну тих фізичних властивостей матеріалу, на базі яких ґрунтуються магнітопружний і ультразвуковий методи.

Однак при застосуванні ультразвукового методу, в порівнянні з магнітопружним, в зоні термічного впливу зварного з'єднання виникають значні труднощі. Це пов'язано із нерівномірністю структурно-фазового складу зони за товщиною матеріалу, яка викликана специфічною формою зварного шва. Тому доцільним є застосування ультразвукового методу на ділянках основного металу з'єднання, де під дією термічного циклу зварювання не відбувалися алотропічні зміни.

Для магнітопружного методу отримуємо деяку замкнену область, яка в зоні термічного впливу зварного з'єднання МТ має змінні початкові значення магнітної проникності.

Методика врахування впливу зміни структурно-фазового складу матеріалу в околі зварного шва на величину напружень, визначених за допомогою магнітопружного методу, розглядається в наступному розділі.

Висновки до розділу 2

В цьому розділі :

1. Викладено математичну модель для визначення залишкових технологічних напружень в трубних стикових зварних з'єднаннях. Записано ключове диференціальне рівняння четвертого порядку для визначення нормального до серединної поверхні переміщення (прогину) труби W , в праву частину якого входять невідомі функції, що описують власні пластичні деформації e_{ii}^0 в околі кільцевого зварного шва.

2. Отримано інтегральне подання для визначення колових $\sigma_{\beta\beta}$ і поздовжніх $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень в трубі через локальні поля пластичних деформацій e_{ii}^0 , в які входять невідомі числові параметри. Для відшукування цих параметрів побудовано функціонал g , що виражає суму квадратів відхилень інтегральних характеристик напружень, які можуть бути визначені експериментально за допомогою електромагнітного і ультразвукового методів від аналогічних величин, знайдених розрахунковим способом.

3. Сформульована обернена задача про відшукування невідомих параметрів поля пластичних деформацій шляхом мінімізації функціоналу g . Наведено формули, за якими після визначення параметрів поля пластичних деформацій, обчислюються напруження в довільній точці труби.

4. При визначенні відхилень експериментальних характеристик напружень, отриманих фізичними методами від розрахункових враховується нерівномірність їх розподілу під давачами, а також можлива часткова релаксація напружень, зумовлена різними видами обробки після виконання зварних швів.

5. З використанням даного методу обчислюються залишкові напруження, які задовольняють рівняння рівноваги, сумісності деформацій і

граничні умови, а точність їх визначення зумовлюється об'ємом і точністю експериментальних даних.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ТРУБОПРОВОДІ, ВИГОТОВЛЕНОМУ ЗІ СТАЛІ 17Г1С, В ОКОЛІ КІЛЬЦЕВОГО ЗВАРНОГО ШВА

В сучасній структурі трубопровідного транспорту широко використовуються труби великого діаметру. У галузі, що займається транспортуванням газу, – це труби з внутрішнім діаметром від 800 мм до 1400 мм, які складають близько 60 % загальної довжини магістральних газопроводів [125]. Переважно, саме вони найчастіше потребують проведення діагностичних та ремонтно-зварювальних робіт.

В даний час для виготовлення прямошовних газо-, нафтопровідних труб великого діаметру традиційними є сталі 17ГС, 17Г1С.

Хімічний склад і механічні властивості сталі 17Г1С наведені в таблицях 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1

Хімічний склад сталі 17Г1С

Номер плавки	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti
5210	0,17	1,20	0,4	0,035	0,015	0,005	0,005
5259	0,17	1,24	0,42	0,034	0,014	0,007	0,005

Таблиця 3.2

Механічні властивості сталі 17Г1С

Номер плавки	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне видовження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ² , -40°С
5210	580	400-410	25-26	47-48
5259	590	360-370	23,5-28	48-49

Основною труднощами при зварюванні труб є запобігання різкого погіршення властивостей матеріалу в результаті появи в металі в зоні термічного впливу (ЗТВ) структур, що знижують опірність крихкому руйнуванню.

Відповідно до завдань роботи досліджували зварні з'єднання труб із кільцевим швом.

Досліджування проведено для трубопроводів, при зварюванні яких додаткове оброблення торців труб не здійснювалося. Для зварювання застосовували флюс марки АН - 348 А та електродний дріт Св - 08 ГА (ГОСТ - 2246-80). Параметри режиму процесу вибиралися згідно нормативної документації [20].

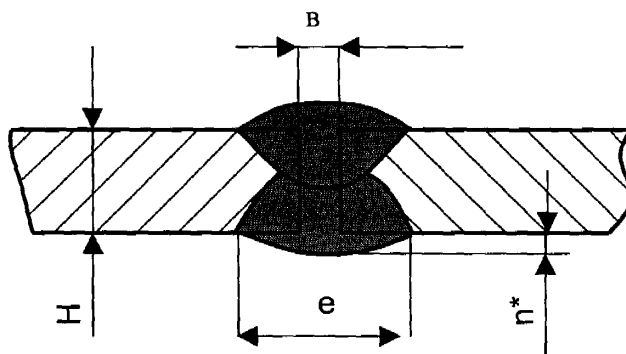


Рис. 3.1. Розробка крайок та розміри зварного шва: $H = 12$ мм; $e = 22$ мм; $v = 2$ мм; $c^* = 2,5$ мм

Автоматичне зварювання під флюсом виконувалось із вільним формуванням поверхні шва за природньої тепловіддачі через шлак.

Для автоматичного зварювання швів були використані зварювальний автомат АДФ-1201 та зварювальний трактор ТС-17 М.

Контроль якості всіх зварних з'єднань проводився зовнішнім оглядом, рентгенопросвічуванням, ультразвуковою дефектоскопією.

3.1. Основні співвідношення і розрахункові формули для визначення залишкових технологічних напружень в трубопроводі в околі кільцевого зварного шва і їх інтегральних характеристик

В розділі 2 показано, що для визначення залишкових напружень в трубопроводі в околі зварного шва необхідно вибрати множину функцій, які описують поля залишкових пластичних деформацій e_{ii}^0 , характерних для матеріалу, з якого виготовлена труба, і форми розробки крайок при зварюванні. Для цього використовується апріорна інформація, яка базується на літературних даних з визначення залишкових пластичних деформацій з використанням руйнівних експериментальних і розрахункових методів. Аналіз механічних і фізико-хімічних властивостей сталі 17Г1С показує, що вона належить до тих низьколегованих сталей, в яких структурно-фазові перетворення в зоні термічного впливу не викликають напружень, але впливають на початкові показники вимірювань, що використовуються в фізичних методах (електромагнітному, ультразвуковому тощо). Останнє може зумовити значні похибки при вимірюваннях інтегральних характеристик напружень фізичними методами в зоні термічного впливу. Тому задача оцінки впливу структурних перетворень в зоні термічного впливу на величину максимальних залишкових напружень є актуальною, оскільки ці напруження можуть суттєво вплинути на оцінку міцності труби.

Для маловуглецевих і низьколегованих сталей, до яких, зокрема, належить і сталь 17Г1С, узагальнення відомих експериментальних даних різних авторів [46,85] обґрунтовує апроксимацію локалізованих біля шва (виконаного без додаткового оброблення торців труб), полів залишкових пластичних деформацій такими функціями:

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha) = \begin{cases} -\varepsilon_0^* \varphi(\alpha), & |\alpha| \leq \alpha_0, \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_0, \end{cases} \quad (3.1)$$

$$e_{\alpha\alpha}^0(\alpha) = k e_{\beta\beta}^0(\alpha).$$

Тут ε_0^* – максимальні залишкові пластичні деформації;

$\varphi(\alpha)$ – функція, що описує епюру пластичних деформацій, спричинених зварюванням

$$\varphi(\alpha) = 1 - s \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} - (1 - s) \frac{\alpha^4}{\alpha_0^4}, \quad 0 \leq s \leq 2, \quad (3.2)$$

k і s – числові параметри, $\alpha = z/R$ – відстань від осі шва, $\alpha_0 = z_0/R$ (z_0 – півширина зони пластичних деформацій), R – радіус середньої поверхні труби.

Графіки функції $\varphi(\alpha)$ – для різних значень параметра s зображені на рис. 3.2.

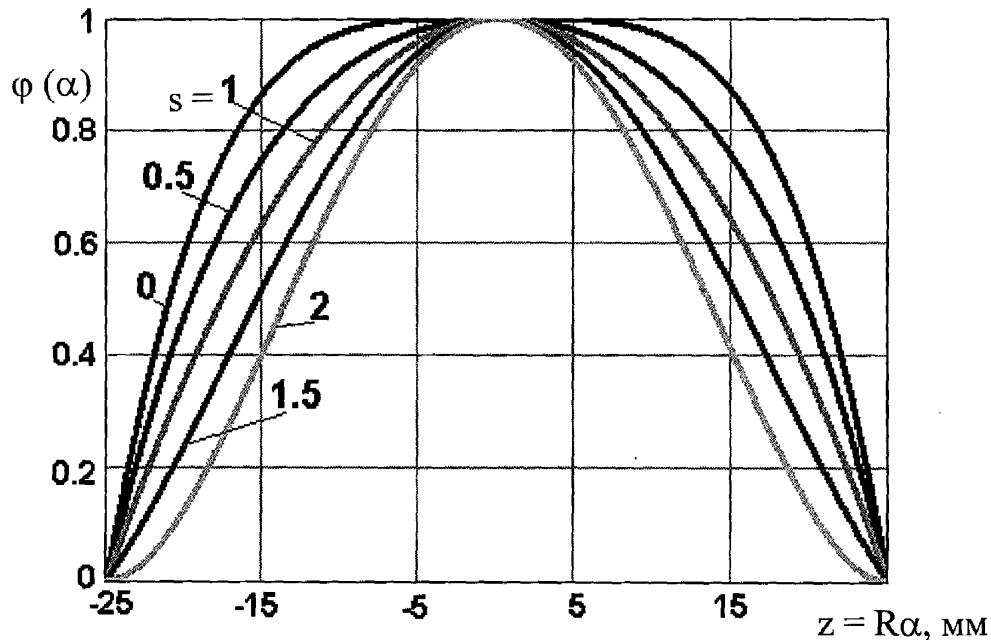


Рис. 3.2. Функція, що описує епюру пластичних деформацій

Із виразу (3.2) видно, що на межі зони пластичних деформацій $\alpha = \pm\alpha_0$ функція $\varphi(\alpha) = 0$. При цьому вибором величини параметра s можна також задовольнити умову гладкості функцій на межі зони пластичних деформацій,

яка полягає в тому, що крім самої функції, на цій межі і її похідна також повинна дорівнювати нулю, тобто

$$\varphi'(\alpha)_{\alpha=\pm\alpha_0} = 0. \quad (3.3)$$

Продиференціювавши вираз (3.2) отримуємо

$$\left[2s \frac{\alpha}{\varepsilon_0} + 4(1-s) \frac{\alpha^3}{\alpha_0^4} \right] \alpha = \pm \alpha_0 = 0. \quad (3.4)$$

Звідси знаходимо, що $s = 2$.

Підставивши тепер вирази (3.1) у формули (2.3), після інтегрування отримуємо

$$\varepsilon_{\beta\beta}^0(\alpha) = \begin{cases} -\varepsilon_0^* \varphi(\alpha), & |\alpha| \leq \alpha_0, \\ 0, & |\alpha| \geq \alpha_0, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$k_{\alpha\alpha}^0 = k_{\beta\beta}^0 = 0.$$

У цьому випадку формули (2.4) для визначення колового зусилля N_2 , осьового M_1 і колового M_2 згинальних моментів та осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ напружень в трубці набувають вигляду

$$N_2 = D_0 \left(\frac{W}{R} - \varepsilon_{\beta\beta}^0 \right), \quad M_1 = -\frac{D_1}{R^2} \frac{d^2 W}{d\alpha_2}, \quad M_2 = \mu M_1, \quad (3.6)$$

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{3}{2h^3} M_1 \gamma, \quad \sigma_{\beta\beta} = \frac{1}{2h} \left(N_2 + 3M_2 \frac{\gamma}{h^2} \right). \quad (3.7)$$

Використавши тепер формулу (2.6), для визначення прогину $W(\alpha)$, отримуємо вираз

$$W(\alpha) = -\frac{R\varepsilon_0^* a}{2} \Gamma_1(\alpha), \quad (3.8)$$

$$\text{де } \Gamma_1(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\zeta) e^{-a|\zeta-\alpha|} [\cos \alpha(\zeta - \alpha) + \sin a|\zeta - \alpha|] d\zeta. \quad (3.9)$$

Підставивши (3.8) у формули (3.7), отримуємо вирази для обчислення осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ і кільцевих $\sigma_{\beta\beta}$ напружень в довільній точці труби

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{(1-\mu^2)R} \gamma \Gamma_2(\alpha), \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = E\varepsilon_0^* \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) \right] + \mu \sigma_{\alpha\alpha},$$

де

$$\Gamma_2(\alpha) = \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \varphi(\zeta) e^{-a|\zeta-\alpha|} [\cos \alpha(\zeta - \alpha) + \sin a|\zeta - \alpha|] d\zeta. \quad (3.11)$$

У формулах (3.8), (3.9) $a = \sqrt[4]{3R^2(1-\mu^2)/4h^2}$, E – модуль Юнга, μ – коефіцієнт Пуассона.

Якщо поле залишкових деформацій, що описується виразами (3.1), (3.2), апроксимувати функціями, які задовольняють умови гладкості на межі зони пластичних деформацій, то параметр $s = 2$ і вирази (3.9), (3.11) набувають вигляду

$$\begin{aligned} \Gamma_1(\alpha) = & \frac{2}{a^5 \alpha_0^4} e^{-a(\alpha_0+\alpha)} \left\langle e^{2a\alpha_0} [3(a\alpha_0 - 1)\cos \alpha(\alpha_0 - \alpha) + a\alpha_0(2a\alpha_0 - 3)\sin \alpha(\alpha_0 - \alpha) + \right. \\ & 3(1 + a\alpha_0)\cos a(\alpha_0 + \alpha) + a\alpha_0(3 + 2a\alpha_0)\sin a(\alpha_0 + \alpha) + \\ & + e^{a(\alpha_0+\alpha)} \{ 6[\cos a(\alpha_0 - \alpha) + a\alpha_0 \sin a(\alpha_0 - \alpha)]kha(\alpha_0 - \alpha) - \\ & - 2a\alpha_0 [3\cos a(\alpha_0 - \alpha) + 2a\alpha_0 \sin a(\alpha_0 - \alpha)]sha(\alpha_0 - \alpha) - \\ & \left. - 6 + a^4(\alpha_0^2 - \alpha^2)^2 \right\rangle S^0(\alpha), \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_2(\alpha) = & \frac{2}{a^5 \alpha_0^4} e^{-a(\alpha_0+\alpha)} \left\langle e^{2a\alpha_0} [a\alpha_0(3 - 2a\alpha_0)\cos \alpha(\alpha_0 - \alpha) + 3(a\alpha_0 - 1)\sin \alpha(\alpha_0 - \alpha)] + \right. \\ & a\alpha_0(3 + 2a\alpha_0)\cos a(\alpha_0 + \alpha) - 3(1 + a\alpha_0)\sin a(\alpha_0 + \alpha) + \\ & + 2e^{a(\alpha_0+\alpha)} \{ a\alpha_0 [2a\alpha_0 \cos a(\alpha_0 - \alpha) - 3\sin a(\alpha_0 - \alpha)]kha(\alpha_0 - \alpha) + \\ & + 3[\sin a(\alpha_0 - \alpha) - a\alpha_0 \cos a(\alpha_0 - \alpha)]sha(\alpha_0 - \alpha) + \\ & \left. + a^2(\alpha_0^2 - 3\alpha^2) \right\rangle S^0(\alpha). \end{aligned} \quad (3.13)$$

У цьому випадку у виразах для визначення напружень (3.10) невідомими будуть два числові параметри ε_0^* і α_0 . Для їх знаходження використовуємо функціонал (2.16), який для даного випадку запишемо у вигляді

$$g(\varepsilon_0^*, \alpha_0) = \sum_{n=1}^{N_1} p_n [\sigma_+^T(\alpha_n; \varepsilon_0^*, \alpha_0) - \sigma_+^E(\alpha_n)]^2 + \sum_{m=1}^{N_2} q_m [\sigma_0^T(\alpha_m; \varepsilon_0^*, \alpha_0) - \sigma_0^E(\alpha_m)]^2. \quad (3.14)$$

Введемо тепер позначення $\hat{\sigma} = E\varepsilon_0^*$ і з використанням формул (3.10) запишемо

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) - \sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = \hat{\sigma} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) + \frac{a^3 \gamma}{(1 + \mu^2)R} \Gamma_2(\alpha) \right]. \quad (3.15)$$

Підставивши вираз (3.15) у співвідношення (2.14), (2.15) за умови, що контактні поверхні між давачами приладів і трубою можна апроксимувати кругами, отримуємо

$$\sigma_+^T(\alpha_n; \varepsilon_0^*, \alpha_0) = \frac{\hat{\sigma}}{\pi r_0^2} \iint_{\psi} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) + \frac{a^3 h}{(1 + \mu)R} \Gamma_2(\alpha) \right] d\psi, \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0^T(\alpha_m; \varepsilon_0^*, \alpha_0) &= \frac{\hat{\sigma}}{2h\pi r_1^2} \iint_{\psi_0} \left\{ \int_{-h}^h \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) + \frac{a^3 h}{(1 + \mu)R} \Gamma_2(\alpha) \right] d\gamma \right\} d\psi_0 = \\ &= \frac{\hat{\sigma}}{\pi r_1^2} \iint_{\psi_0} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) \right] d\psi_0, \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$r_0 = R_0 / R, \quad r_1 = R_1 / R,$$

де R_0, R_1 – відповідно радіуси кругів, по яких відбувається контакт між трубою і давачами приладів при вимірюваннях електромагнітним і ультразвуковим методами.

Використавши тепер формули для обчислення поверхневих інтегралів, співвідношення (3.16), (3.17) запишемо у вигляді

$$\sigma_+^T(\alpha_n; \varepsilon_0^*, \alpha_0) = \frac{2\hat{\sigma}}{\pi r_0^2} \int_{\alpha_n - r_0}^{\alpha_n + r_0} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) + \frac{a^3 h}{(1 + \mu)R} \Gamma_2(\alpha) \right] \sqrt{r_0^2 - (\alpha - \alpha_n)^2} d\alpha, \quad (3.18)$$

$$\sigma_0^T(\alpha_m; \varepsilon_0^*, \alpha_0) = \frac{2\hat{\sigma}}{\pi r_1^2} \int_{\alpha_m - r_1}^{\alpha_m + r_1} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) \right] \sqrt{r_1^2 - (\alpha - \alpha_m)^2} d\alpha. \quad (3.19)$$

Позначимо

$$J_+^T(\alpha_n, \alpha_0) = \frac{2}{\pi r_0^2} \int_{\alpha_n - r_0}^{\alpha_n + r_0} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) + \frac{a^3 h}{(1 + \mu)R} \Gamma_2(\alpha) \right] \sqrt{r_0^2 - (\alpha - \alpha_n)^2} d\alpha, \quad (3.20)$$

$$J_0^T(\alpha_m, \alpha_0) = \frac{2}{\pi r_1^2} \int_{\alpha_m - r_1}^{\alpha_m + r_1} \left[-\frac{a}{2} \Gamma_1(\alpha) + \varphi(\alpha) \right] \sqrt{r_1^2 - (\alpha - \alpha_m)^2} d\alpha, \quad (3.21)$$

вирази (3.18), (3.19) запишемо так:

$$\sigma_+^T(\alpha_n; \varepsilon_0^*, \alpha_0) = \hat{\sigma} J_+^T(\alpha_n, \alpha_0), \quad \sigma_0^T(\alpha_m; \varepsilon_0^*, \alpha_0) = \hat{\sigma} J_0^T(\alpha_m, \alpha_0), \quad (3.22)$$

$$g(\varepsilon_0^*, \alpha_0) = \sum_{n=1}^{N_1} p_n [\hat{\sigma} J_+^T(\alpha_n, \alpha_0) - \sigma_+^E(\alpha_n)]^2 + \sum_{m=1}^{N_2} q_m [\hat{\sigma} J_0^T(\alpha_m, \alpha_0) - \sigma_0^E(\alpha_m)]^2. \quad (3.23)$$

Використавши тепер умову мінімуму функціонала (3.23) по параметру ε_0^*

$$\frac{\partial g}{\partial \varepsilon_0^*} = 0, \quad \text{або} \quad \frac{\partial g}{\partial \hat{\sigma}} = 0, \quad (3.24)$$

виразимо параметр $\hat{\sigma}$ через α_0 .

$$E\varepsilon_0^* = \frac{\sum_{n=1}^{N_1} p_n [J_+^T(\alpha_n, \alpha_0)]^2 + \sum_{m=1}^{N_2} q_m [J_0^T(\alpha_m, \alpha_0)]^2}{\sum_{n=1}^{N_1} p_n \sigma_+^E(\alpha_n) J_+^T(\alpha_n, \alpha_0) + \sum_{m=1}^{N_2} q_m \sigma_0^E(\alpha_m) J_0^T(\alpha_m, \alpha_0)}. \quad (3.25)$$

Якщо тепер (3.25) підставити замість $\hat{\sigma}$ у співвідношення (3.23), то отримаємо вираз, який описує залежність функціонала g^* тільки від параметра α_0 . Параметр α_0 що дорівнює віднесеній до радіуса R півширині зони пластичних деформацій знаходимо методом перебору з умови забезпечення найменшого значення величини $g^*(\alpha_0)$. При цьому значення параметра α_0 знаходяться в інтервалі $0 < \alpha_0 < \alpha_0^*$, де α_0^* – максимальна величина зони пластичних деформацій, яка наближено може бути оцінена

одним з розрахункових методів для пластини такої ж товщини як і труба, наприклад, методом Трочуна [137].

Після відшукування параметра α_0 за формулою (3.25) знаходимо невідомий параметр $\hat{\sigma} = E\varepsilon_0^*$ і за формулами (3.10) обчислюємо залишкові напруження в довільній точці труби.

Нижче з використанням електромагнітного методу, з урахуванням впливу структурних перетворень на відлікові показники приладу SMMT – 3 для труби в ненапруженому стані, проведено вимірювання величин $\sigma_+^E(\alpha_n)$, визначено параметри $\hat{\sigma}$ і α_0 і досліджено розподіл напружень в околі кільцевого зварного шва.

3.2. Визначення інтегральних характеристик різниці головних напружень електромагнітним методом

Для визначення інтегральних характеристик напруженого стану $\sigma_+^E(\alpha_n)$ електромагнітним методом необхідно визначити коефіцієнт магнітопружної чутливості (тарувальний коефіцієнт), який представляє собою відношення зміни локальної намагніченості в зоні дії перетворювача до напруження, що викликало цю зміну. Оскільки магнітні характеристики при переході від однієї марки сталі до іншої змінюються суттєво, то калібрування необхідно проводити для кожного матеріалу зокрема. Переважно, калібрування виконують при одновісному розтягу. Зразок закріплюють в захоплювачах розривної машини. Встановлюють на ньому електромагнітний перетворювач, орієнтуючи його вздовж напрямку дії напруження. В даній роботі, зокрема застосовувався портативний прилад магнітопружної тензометрії SMMT – 3, який відрізняється від аналогічних малими габаритами і вагою, наявністю автономного живлення при відносно високій точності вимірювань. Прилад є переносним універсальним

пристроєм, який призначений для експлуатації у польових та стаціонарних умовах. Конструкція давача дає можливість проводити вимірювання різниці магнітних характеристик у взаємоперпендикулярних напрямках, знижує до мінімуму негативний вплив геометричного фактора та не потребує спеціальної підготовки досліджуваної поверхні.

Для детального вивчення напруженого стану в місцях, де спостерігається його значний градієнт, було розроблено спеціальний допоміжний пристрій (рис 3.3). Пристрій дає змогу послідовно наближатися до шва з кроком 0,1 мм і застосовувався для вимірювання компонент напруженого стану в околі стикових зварних з'єднань з кільцевим швом та навколо корозійних дефектів.

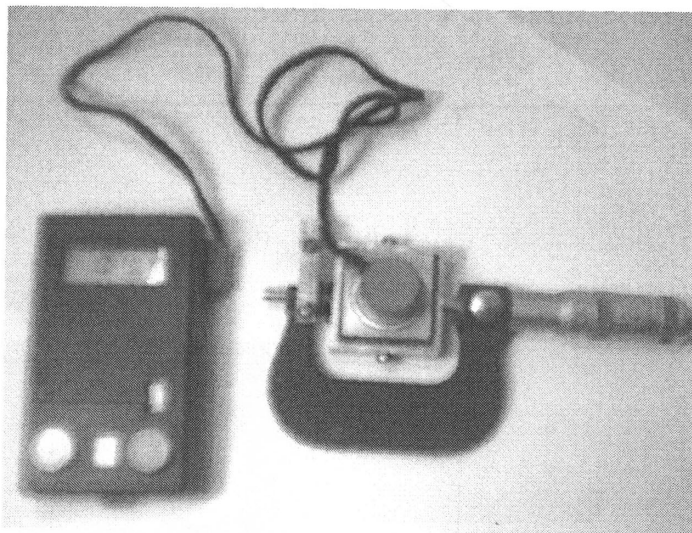


Рис. 3.3. Пристрій для переміщення давача з кроком 0,1 мм

Тарування проводять на зразку, форма якого відповідає ГОСТ 1497-84 (випробовування на розтяг), виготовленого із того самого або аналогічного до досліджуваного об'єкту, матеріалу. Цей ГОСТ не передбачає застосування зразків товщиною, яка відповідає товщинам труб магістральних газопроводів. Тому вибір розмірів зразка може мати значний вплив на покази приладу: в центрі зразка, від впливу концентраторів напружень в місцях переходу від робочої частини до деталі, може виникати напружений стан, що

значно перевищує розрахунковий. Нижче наведено оптимальні розміри зразка, які отримані на основі аналізу результатів, отриманих методом скінченних елементів (рис.3.4). Зразок виготовляли в даному випадку для труб діаметром 1220 мм із товщиною стінки 12 мм і його розміри вибрано мінімально можливими для даної товщини.

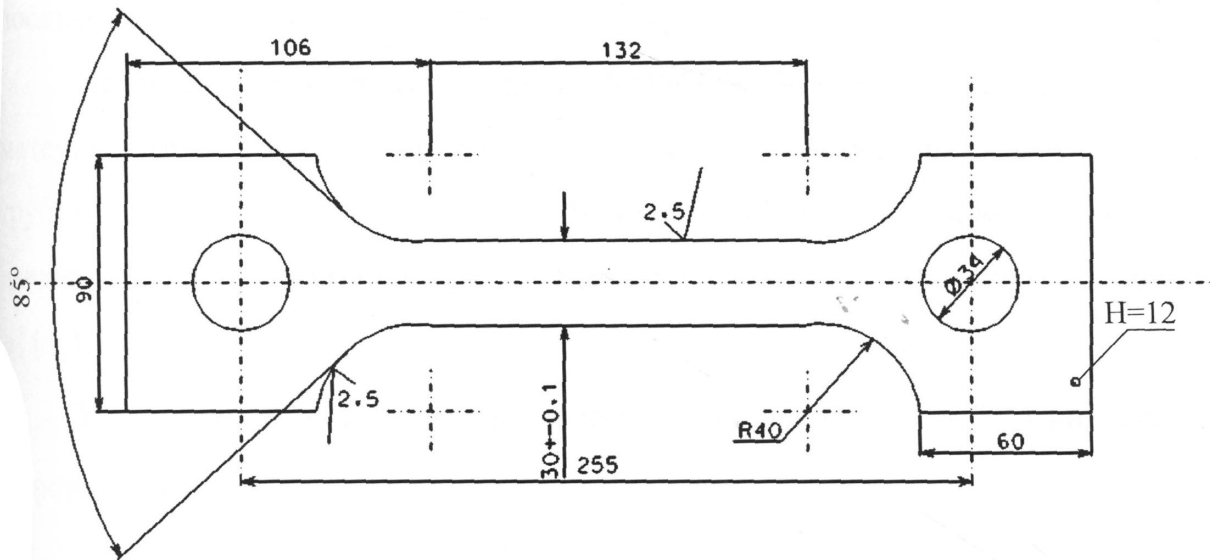


Рис. 3.4. Зразок для тарування магнітопружного приладу

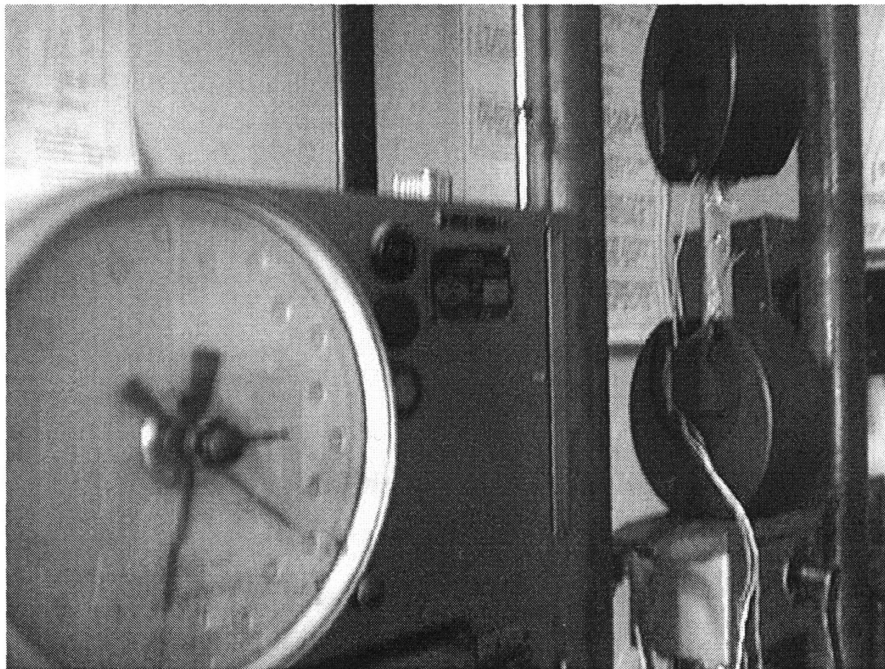


Рис. 3.5. Тарування зразка на розривній машині

Тарувальні випробування проводились на атестованій розривній машині (рис.3.5) при одновісному напруженому стані з метою визначення залежності між показами приладу і реальними напруженнями в металі зразка. Як правило, ця залежність має лінійний характер, а коефіцієнт пропорційності k визначається особливостями приладу і маркою досліджуваної сталі.

На основі показників приладу SMMT – 3, отриманих на зразках із матеріалу труби, для якої проводиться діагностика, в ненапруженому стані і в трубі під дією напружень можна визначити усереднену по поверхні контакту давача з трубою інтегральну характеристику різниці головних напружень $\sigma_+^E(\alpha_n)$.

У випадку двовісного напруженого стану величину $\sigma_+^E(\alpha_n)$ визначаємо за формулою

$$\sigma_+^E(\alpha_n) = kN_n, \quad (3.26)$$

тут k – тарувальний коефіцієнт,

$$N_n = \frac{1}{2}[(N_{1n} - N_{2n}) - (N_{10} - N_{20})], \quad (3.27)$$

N_{1n} , N_{2n} – показники приладу при вимірюванні в перерізі α_n на поверхні труби у двох головних напрямках головних напружень;

N_{10} , N_{20} – показники приладу, які знімаються на зразку (характеристики металу) в ненапруженому стані за напрямком 1 (N_{10}) і 2 (N_{20}) як середні значення за результатами декількох вимірювань.

3.3. Оцінка впливу структури матеріалу зони термічного впливу на відлікові показники приладу SMMT-3

Для оцінки впливу зміни структури матеріалу в зоні термічного впливу (ЗТВ), зумовленої процесами зварювання, на початкові показники приладу N_{10} , N_{20} в роботі запропоновано методику, суть якої полягає в наступному.

З запасу матеріалів трубопроводу, в якому діагностується напружений стан, або із його частин, вирізаних з труби під час ремонтних робіт, вибирають куски матеріалу зі зварним швом. Потім вирізають метал із основного матеріалу (ОМ) для виготовлення тарувального зразка і заготовки матеріалу зі зварним швом, які містять зони термічного впливу, де пройшли структурні зміни.

Після виготовлення тарувального зразка (рис.3.4) його встановлюють в розривну машину (рис.3.5) і в навантаженому стані з використанням приладу SMMТ-3, згідно з інструкцією з його застосування, проводять вимірювання відлікових показників N_{10}^{OM} і N_{20}^{OM} у двох взаємоперпендикулярних напрямках декілька разів і на основі усереднених даних визначають величину

$$\Delta N_0^{OM} = N_{10}^{OM} - N_{20}^{OM} . \quad (3.27)$$

Потім, поступово збільшуючи навантаження на зразок, будують тарувальну криву.

Із заготовок, що містять зони зі структурними перетвореннями вирізають прямокутні зразки таких розмірів, щоб пружні деформації в них, а відповідно і залишкові напруження, якнайменше відрізнялись від нульових значень. Ці зразки містять зони основного металу і зони зі структурними перетвореннями. При цьому відібрані для експерименту зразки повинні задовольняти вимоги, щоб виміряні в їхніх зонах основного металу відлікові значення показників N_{10}^{OM} і N_{20}^{OM} були такими ж, як і для тарувального зразка.

Потім давач приладу SMMТ-3 поміщається в зону матеріалу зразка, де пройшли структурні зміни (центр давача поміщався в точку $z_1=18$ мм від осі шва), і в ній вимірюються відлікові значення у двох взаємоперпендикулярних напрямках N_{10}^{CP} і N_{20}^{CP} . Вимірювання проводяться декілька разів і на основі усереднених даних визначають величину

$$\Delta N_0^{CP} = N_{10}^{CP} - N_{20}^{CP} , \quad (3.28)$$

Далі обчислюють величину

$$\Delta \tilde{N}_0 = \Delta N_0^{CP} - \Delta N_0^{OM}, \quad (3.29)$$

і за допомогою тарувальної діаграми знаходять абсолютну “похибку” вимірювань величини $\sigma_T^E(\alpha_n)$ за допомогою приладу SMMT-3 в області контакту давача з трубою, яка містить зону металу, де пройшли структурні перетворення.

Для виготовленого зі сталі 17Г1С тарувального зразка товщиною 12 мм були проведені вимірювання, побудована тарувальна крива і визначено тарувальний коефіцієнт. Площа поперечного перерізу зразка 30,5 мм x 12 мм=366 мм².

Таблиця 3.3

Результати тарування

Напруження σ , МПа	Покази прил., N1 (червоні мітки вздовж осі труби)	Покази прил., N2 (червоні мітки перпендик. до осі труби)	$\Delta N = [(N_1 - N_2) - (N_{10} - N_{20})] / 2$
0	120	-2	0
17,3	121	-5	2
34,5	114	-18	5
51,7	140	-23	20,5
69,0	144	-31	26,5
86,3	145	-35	29
103,5	152	-45	37,5
120,8	159	-50	43,5
138,1	164	-56	49

Результати вимірювань апроксимувались поліномом першого ступеня виду:

$\sigma(\Delta N) = \alpha_0 + \alpha_1 * \Delta N$. Апроксимація виконувалась для наступних двох випадків результати яких відображені в табл.3.4.

Таблиця 3.4

Апроксимація результатів вимірювання

Напруження σ , МПа	Коефіцієнти полінома	
	α_0	α_1
на відрізку від 0 до 34 МПа	8,328	2,564
на відрізку від 34 МПа до 138 МПа	12,245	2,456

Результати вимірювань представлено на рис.3.6. Результати обчислень для випадку апроксимації на відрізку від 0 до 138 МПа представлено на рис.3.7. Результати обчислень для випадку апроксимації на відрізку від 34 МПа до 138 МПа представлено на рис.3.8.

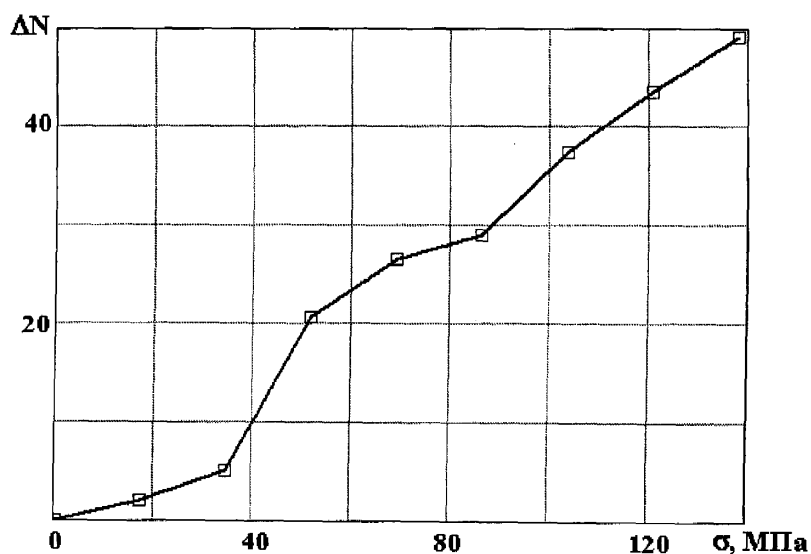


Рис.3.6. Тарування зразка зі сталі 17Г1С

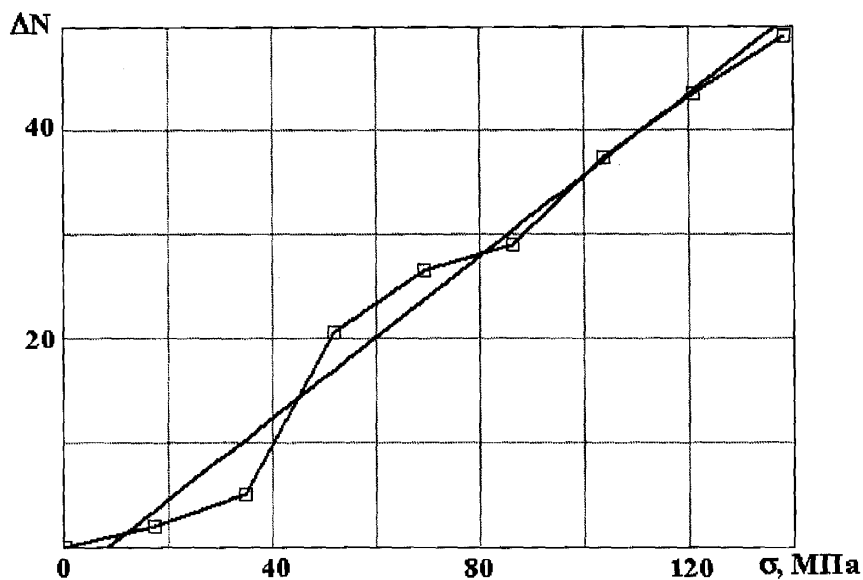


Рис.3.7. Апроксимація результатів тарування на відрізьку від 0 до 138 МПа

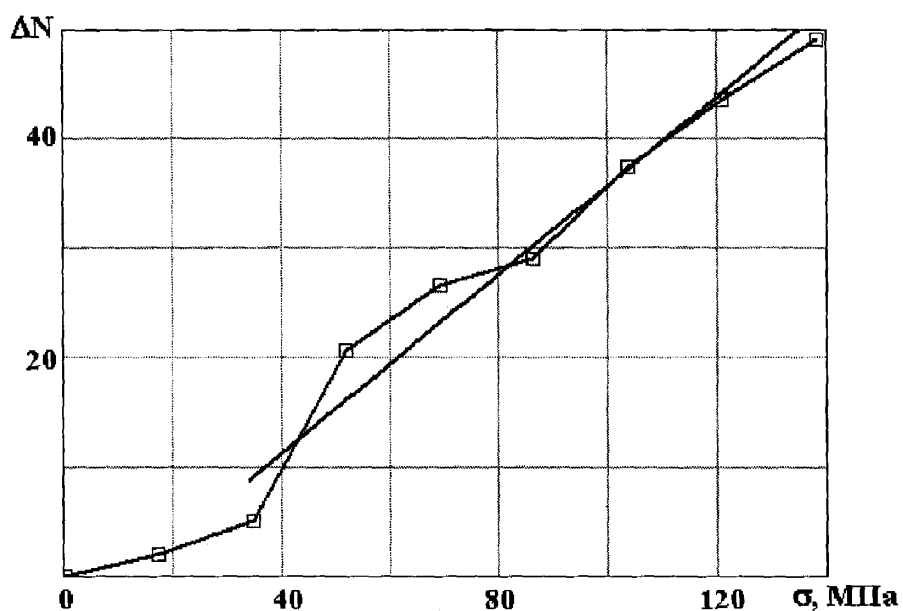


Рис.3.8. Апроксимація результатів тарування на відрізьку від 34 МПа до 138 МПа

Аналіз тарувальних кривих показує, що для напружень до 30 МПа доцільно використовувати тарувальний коефіцієнт $k=2,564$, а для більших напружень тарувальний коефіцієнт $k=2,456$.

Зразки з тієї ж сталі зі зварним швом і зоною термічного впливу показані на рис. 3.9.

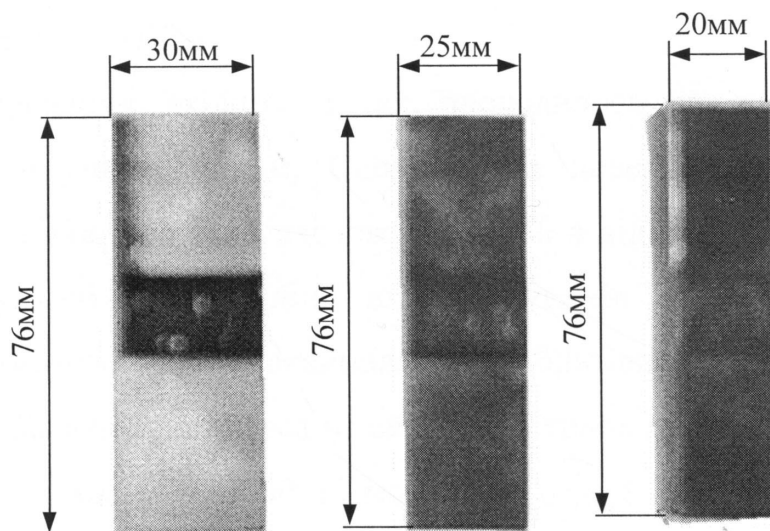


Рис.3.9. Зразки з зоною термічного впливу

Аналіз літературних даних [46, 130] показує, що в таких зразках повздовжні та поперечні відносно осі шва залишкові напруження є досить малими. На трьох таких зразках були проведені вимірювання початкових показників приладів під давачем, що містить зону структурних перетворень і в зоні основного металу. Аналіз обробки результатів вимірювань з використанням тарувального коефіцієнта $k=2,564$ показав, що врахування впливу структурних змін на початкові показники вимірювань в порівнянні з основним металом, тобто величина $\Delta\tilde{N}_0$, може зумовити зміну, у випадку що розглядається, величини $\sigma_+^E(z_l)$ в межах від 11 до 15 МПа.

3.4. Розподіл залишкових напружень в околі кільцевого зварного шва в трубі діаметром 1220 мм, товщиною стінки 12 мм, виготовленій зі сталі 17Г1С

Залишкові технологічні напруження з використанням запропонованого розрахунково-експериментального методу визначались в околі кільцевого

зварного шва зварених за нормативним режимом [20] труб МГ «Івацевичі-Долина III нитка» на ділянці Волинського ЛВУМГ. Цей трубопровід експлуатується з 1978 р.

Вимірювання вхідних даних проводилось за допомогою приладу SMMT-3 наступним чином. Спочатку на поверхні труби в околі шва наносилась сітка: три лінії вздовж осі труби з відстанню між ними 20 мм і перпендикулярні до них лінії вздовж дуг кіл з кроком 2 мм. Далі з урахуванням можливості максимального наближення плоского давача до осі шва, центр давача розміщався на середній з трьох ліній на відстані 18 мм від осі шва ($z_1=18$ мм, $\alpha_1=18/604$) і визначали $\Delta N(z_1)$. У цьому положенні давач охоплював зону термічного впливу. В цьому ж перерізі ($z_1=18$ мм) визначали значення показника приладу $\Delta N(z_1)$ ще на двох сусідніх лініях, віддалених від середньої лінії на 20 мм. За розрахункове в цьому перерізі приймають усереднене за трьома вимірюваннями значення $\Delta N(z_1)$. Потім центр давача зміщався на 2 мм вздовж осі трубопроводу і процедура вимірювань повторювалась в перерізі $z_2 = 20$ мм. Аналогічно отримувались значення показника приладу $\Delta N(z)$ в інших перерізах трубопроводу. При цьому в зоні термічного впливу враховувалась поправка на структурні зміни металу. Потім аналогічні вимірювання були проведені на відстані 100 мм і більше від осі шва і усереднене значення приймалось за таке, що відповідає дії силового навантаження, зокрема, заданого внутрішнього тиску $P=4,5$ МПа. Далі від показників, що відповідають вимірюванням змін магнітної проникності в околі зварного шва, викликаних дією силових факторів і технологічних напружень, віднімався усереднений показник, що відповідає дії тільки силових факторів і отримували величини $\Delta N(z_n)$, зумовлені дією тільки залишкових напружень. Для отриманих експериментальних даних з використанням тарувального коефіцієнта $k=2,564$ обчислювали відповідні їм

значення середньоінтегральних по площі контакту давача різниць колових і осьових напружень $\sigma_+^{E*}(z)$, які наведені у другому стовпці табл.3.5.

Для отриманих значень $\sigma_+^{E*}(z_n)$ за допомогою програми обробки експериментальних даних була побудована згладжуюча функція у вигляді полінома

$$\sigma_+^E(z) = \sum_{k=0}^5 v_k z^k, \quad 18 \leq z \leq 60, \quad (3.30)$$

де числові значення коефіцієнтів полінома v_k наступні:

$$v_0 = 691,61; \quad v_1 = -78,09; \quad v_2 = 3,33; \quad v_3 = -6,88 \cdot 10^{-2}; \quad v_4 = 6,80 \cdot 10^{-4}; \quad v_5 = -2,5 \cdot 10^{-6}.$$

На рис.3.10 зірочками зображено значення інтегральних характеристик $\sigma_+^{E*}(z_n)$, а суцільною лінією графік апроксимаційного полінома (3.30). Середньоінтегральні значення різниці головних напружень $\sigma_+^E(z_n)$, обчислені за формулою (3.30), наведені в табл.3.5 в третьому стовпці.

Далі за формулою (3.20) для $r_0 = \frac{8}{604}$ записано вирази для $J_+^T(\alpha_n, \alpha_0)$. Ці вирази і значення $\sigma_+^E(\alpha_n)$, обчислені за апроксимаційним поліномом (3.31), підставлено у співвідношення (3.25) і невідомий параметр $\hat{\sigma}$ ($\hat{\sigma} = E\varepsilon_0^*$) виражено через параметр α_0 . Потім цей вираз для $\hat{\sigma}$ підставлено у співвідношення (3.23) і отримано вираз для функціоналу g , який залежить тільки від одного невідомого параметра α_0 .

Для числової реалізації вказаних вище процедур і обчислення напружень в трубі було розроблено програмне забезпечення на мові Fortran Power Station 4.0.

На рис.3.11 графічно зображено залежність функціонала g від параметра $z_0 = R\alpha_0$. Як видно із графіка мінімум функціонала досягається при $z_0 = 21,80$ мм, або $\alpha_0 = 21,80/604$. Тут при обчисленнях прийнято, що вагові коефіцієнти є однакові і дорівнюють одиниці ($p_n = 1$).

Таблиця 3.5

Значення середньоінтегральних характеристик різниці головних напружень в різних перерізах газопроводу

z_n , мм	$\sigma_+^{E*}(z_n)$, МПа	$\sigma_+^E(z_n)$, МПа	$\sigma_+^T(z_n)$, МПа
18	30.8	30.3581	35.0510
20	12.4	12.2151	13.9300
22	-1.4	-0.8649	-1.4187
24	-11.7	-9.9815	-11.4524
26	-15.8	-16.0807	-17.1879
28	-18.4	-19.9642	-20.0508
30	-20.9	-22.2999	-21.6047
32	-23.7	-23.6310	-22.8962
34	-26.3	-24.3861	-24.0715
36	-22.6	-24.8890	-25.1354
38	-25.5	-25.3681	-26.0924
40	-29.2	-25.9667	-26.9472
42	-27.1	-26.7525	-27.7041
44	-28.8	-27.7273	-28.3677
46	-25.8	-28.8368	-28.9423
48	-28.3	-29.9806	-29.4319
50	-33.5	-31.0217	-29.8408
52	-28.6	-31.7963	-30.1729
54	-34.0	-32.1239	-30.4321
56	-34.0	-31.8164	-30.6223
58	-29.0	-30.6887	-30.7472
60	-28.6	-28.5679	-30.8103

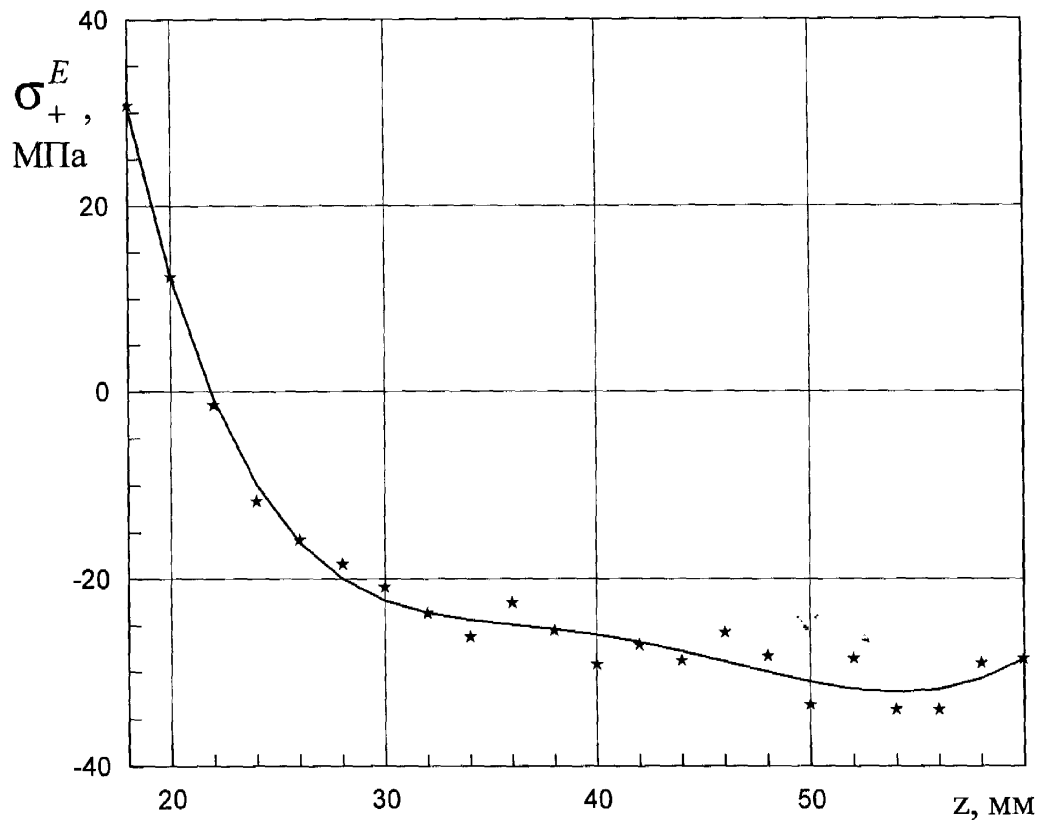


Рис.3.10. Експериментальні дані та апроксимаційна крива

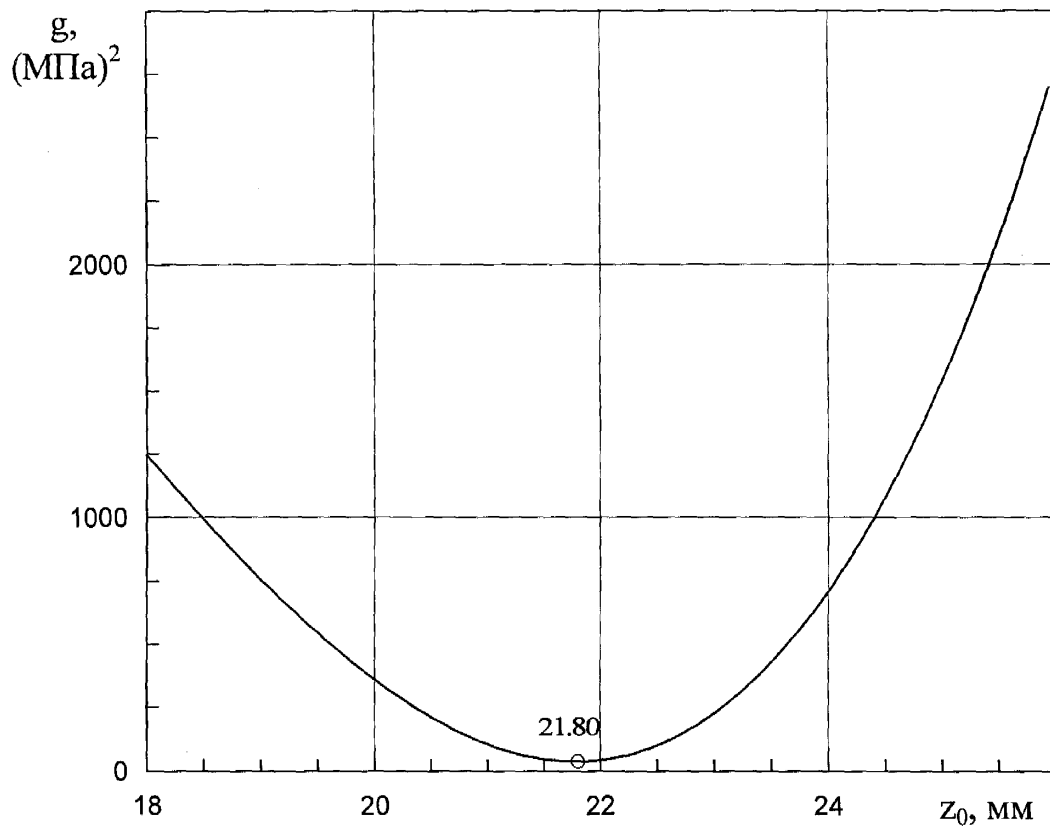


Рис.3.11. Залежність функціонала g від параметра $z_0 = R\alpha_0$

Після цього за формулою (3.25) обчислюється значення параметра $\hat{\sigma}$, а відповідно і $\varepsilon_0^* = 1,28 \cdot 10^{-3}$. Далі за формулами (3.10) обчислюємо напруження в довільній точці труби.

На рис.3.12 зображено зміну колових і осьових залишкових технологічних напружень на зовнішній та внутрішній стінках трубопроводу з віддаленням відстані від осі шва. При цьому з аналізу формул (3.10) випливає, що зміна колових і осьових напружень по товщині стінки труби має лінійний характер. Колові напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях труби безпосередньо біля шва є розтягальними і досягають найбільшого значення на внутрішній поверхні труби на осі шва. Область розтягальних колових напружень розміщена в межах чотирьох товщин труби (дві зліва і дві справа товщини труби від лінії шва). Далі в межах десяти товщин труби ці напруження є стискальними і зі збільшенням відстані від осі шва їхня величина згасає до нуля. Осьові залишкові напруження є меншими за величиною, ніж колові, і є стискальні на зовнішній поверхні труби та розтягальні на внутрішній в межах шести товщин труби, а зі збільшенням відстані від осі шва вони змінюють знаки на протилежні.

Для оцінки зміни величини максимальних залишкових напружень, зумовленої врахуванням впливу структурних перетворень в зоні термічного впливу на початкові показники ΔN_0 приладу SMMT-3, було проведено числовий аналіз розподілу напружень у випадку, коли величина $\sigma_+^{E*}(z_1)$ в зоні, що враховує структурні перетворення приймає різні значення. З цією метою значення величини $\sigma_+^E(z_1)$ покроково з інтервалом 10% зменшували до 50%. В табл.3.6 в першій стрічці наведені значення, які відповідають зменшенню величини $\sigma_+^E \Big|_{z_1=18} = 30,358$ МПа відповідно від 10 до 50%.

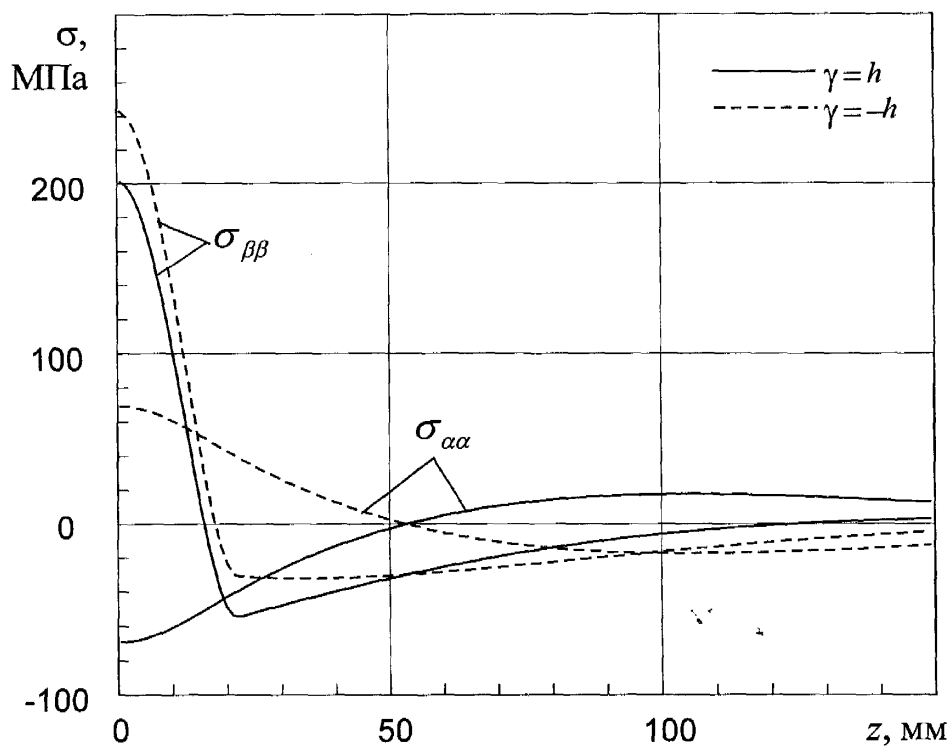


Рис.3.12. Зміна колових $\sigma_{\beta\beta}$ і осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ залишкових напружень з віддаленням від осі стикового зварного шва трубопроводу

Аналіз результатів, наведених в табл.3.6 дозволяє зробити висновок, що зміна величини σ_+^E , коли центр давача знаходиться в перерізі $z_I=18$ мм до 50%, починаючи з перерізу $z_I=24$, незначно впливає на масив апроксимованих експериментальних даних в інших перерізах.

Для оцінки впливу наведеної в таблиці 3.6 зміни експериментальних даних $\sigma_+^E(z_n)$ на величину максимальних колових і осьових напружень були розраховані залишкові напруження в трубі для кожного стовпця величин $\sigma_+^E(z)$. В табл.3.7 наведено результати цих обчислень.

Таблиця 3.6

Залежність масиву експериментальних даних $\sigma_+^E(z_n)$ від зменшення величини $\sigma_+^E(z_1)$

$\Delta\sigma_+^E(18),\%$ z_n	0	10	20	30	40	50
18	30.358	27.846	25.335	22.823	20.312	17.800
20	12.215	11.249	10.282	9.316	8.349	7.383
22	-0.865	-0.986	-1.107	-1.227	-1.348	-1.469
24	-9.982	-9.731	-9.481	-9.231	-8.981	-8.731
26	-16.081	-15.756	-15.432	-15.108	-14.784	-14.459
28	-19.964	-19.726	-19.488	-19.251	-19.013	-18.775
30	-22.300	-22.210	-22.120	-22.030	-21.940	-21.850
32	-23.631	-23.684	-23.736	-23.789	-23.842	-23.895
34	-24.386	-24.537	-24.688	-24.839	-24.990	-25.141
36	-24.889	-25.077	-25.265	-25.453	-25.641	-25.829
38	-25.368	-25.533	-25.699	-25.864	-26.029	-26.195
40	-25.967	-26.064	-26.161	-26.258	-26.356	-26.453
42	-26.753	-26.759	-26.765	-26.772	-26.778	-26.785
44	-27.727	-27.646	-27.566	-27.485	-27.404	-27.323
46	-28.837	-28.697	-28.557	-28.418	-28.278	-28.138
48	-29.981	-29.829	-29.678	-29.526	-29.375	-29.223
50	-31.022	-30.913	-30.805	-30.697	-30.589	-30.480
52	-31.796	-31.778	-31.760	-31.742	-31.725	-31.707
54	-32.124	-32.215	-32.306	-32.397	-32.488	-32.580
56	-31.816	-31.982	-32.147	-32.312	-32.478	-32.643
58	-30.689	-30.810	-30.930	-31.051	-31.172	-31.293
60	-28.568	-28.407	-28.246	-28.085	-27.924	-27.762

Таблиця 3.7

Залежність максимальних напружень від зміни величини $\sigma_+^E(z_1)$ в зоні, що враховує структурні перетворення

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

При цьому величини ε_0^* і z_0 , що відповідають указаним у таблиці приростам приймають наступні значення: $\varepsilon_0^*=1,28 \cdot 10^{-3}$; $1,31 \cdot 10^{-3}$; $1,32 \cdot 10^{-3}$; $1,33 \cdot 10^{-3}$; $1,35 \cdot 10^{-3}$; $1,36 \cdot 10^{-3}$; $z_0=21,8 \text{ мм}$; $21,4 \text{ мм}$; $21,10 \text{ мм}$; $20,85 \text{ мм}$; $20,55 \text{ мм}$; $20,25 \text{ мм}$.

Для зварного з'єднання, що розглядається вище, похибка вимірювань в зоні структурних перетворень знаходиться в межах 30% від 30 МПа. Це може спричинити при розрахунку максимальних напружень похибку порядку 4%.

Таким чином, розроблений в роботі алгоритм розрахунку залишкових технологічних напружень в околі зварного шва з використанням експериментальної інформації, здобутої за допомогою електромагнітного методу, дозволяє з незначними похибками розраховувати максимальні напруження навіть у випадку, коли похибки вимірювань в зоні термічного впливу, де пройшли структурні перетворення, є досить значними.

Використовуючи запропонований алгоритм проведено також дослідження розподілу залишкових напружень в околі зварних швів для труб

(1020x10 мм), виготовлених із сталі 13Г1СУ. Отримані результати використали при проведенні технічного нагляду під час будівництва МН “Одеса – Броди”.

Висновки до розділу 3

У даному розділі з використанням розрахунково-експериментального методу, викладеного в попередньому розділі, отримано:

1. Для труби, виготовленої зі сталі 17Г1С, обґрунтовано вибір множини тензорних функцій, що описують поле пластичних деформацій в околі кільцевого зварного шва, виконаного без додаткового оброблення торців труб.

2. В замкнутому вигляді отримано вирази для обчислення колових $\sigma_{\beta\beta}$ і поздовжніх $\sigma_{\alpha\alpha}$ напружень в довільній точці труби. В ці вирази входять невідомі параметри ε_0^* і α_0 , що характеризують амплітуду на осі шва і ширину зони пластичних деформацій.

3. Записано функціонал g , що являє собою суму квадратів відхилень середньоінтегральних характеристик різниці колових і осьових напружень, які можна здобути експериментальним шляхом з використанням (σ_+^E) електромагнітного або ультразвукового (σ_0^E) методів, та отримано формули для обчислення аналогічних характеристик (σ_+^T) , (σ_0^T) розрахунковим способом, в які входять параметри ε_0^* і α_0 .

4. Розроблено методику оцінки впливу структурно-фазового складу матеріалу в околі зварного шва на величину напружень, що визначаються експериментально електромагнітним методом.

5. Розроблено програмне забезпечення для визначення колових і осьових напружень в околі кільцевого зварного шва труби з використанням експериментальної інформації, здобутої електромагнітним і ультразвуковим методами.

6. У зварених за нормативним режимом труб зі сталі 17Г1С МГ “Івацевичі-Долина III нитка” з використанням експериментальних даних, здобутих електромагнітним методом, визначено розподіл залишкових

технологічних напружень в околі кільцевого зварного шва і в результаті його аналізу встановлено:

- колові залишкові напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях трубопроводу в межах двох товщин від осі шва є розтягальними і досягають найбільшого значення на внутрішній поверхні труби на осі шва, зі збільшенням відстані від осі шва в межах десяти товщин стінки труби ці напруження є меншими за величиною і стискальними;

- осьові залишкові напруження є меншими за величиною, ніж колові, і є стискальними на зовнішній поверхні та розтягальними на внутрішній в межах шести товщин стінки труби, а зі збільшенням відстані від осі шва вони змінюють знаки на протилежні;

- нехтування впливом структурних перетворень в зоні термічного впливу змінює початкові показники приладу SMMT-3, в порівнянні з основним металом, на величину, що відповідає зміні середньоінтегральної різниці головних напружень в цій зоні σ_+^E в межах 30%. При цьому максимальні напруження на осі шва, обчислені за розробленим в роботі алгоритмом, змінюються не більше ніж на 4%.

РОЗДІЛ 4

КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ У ТРУБОПРОВОДІ З КОРОЗІЙНИМ ДЕФЕКТОМ В ОКОЛІ ЗВАРНОГО ШВА

Поверхневі дефекти, які викликані корозією або іншими чинниками, є типовими ушкодженнями трубопроводів. Такі дефекти є концентраторами напружень і можуть суттєво впливати на надійність та довговічність нафтогазопроводів.

Теоретичне дослідження трубопроводів за наявності поверхневих дефектів в переважній більшості випадків вимагає розв'язування просторової задачі пружно-пластичності. Розроблені на сьогоднішній день числові методи дослідження просторових пружно-пластичних задач міцності та руйнування [26, 80] дозволяють зі значними затратами ресурсів ЕОМ отримати розв'язки конкретних задач для заданих геометричних та фізико-механічних параметрів при статичних та деяких видах динамічного навантаження.

Однак узагальнені дані про вплив поверхневих дефектів на міцність тонкостінних елементів конструкцій в суттєво трьохвимірних випадках відсутні навіть для статичного навантаження. Більше того, мало вивченими є пружні просторові задачі для пластин та оболонок з вказаними дефектами [115, 127, 157]. Так в ґрунтовному довіднику з концентрації напружень Р. Петерсона [115] є представлені лише дані про концентрацію напружень в нескінченній пластині з сферичними заглибинами великого діаметра на обох поверхнях за одностороннього розтягу та в нескінченній пластині з центральною сферичною порожниною за всестороннього розтягу.

В роботі [34] наведено інженерні формули для обчислення коефіцієнта концентрації напружень в зоні поверхневих дефектів трубопроводів. Однак в цій роботі не вказана методика отримання цих формул, їх точність та галузь

застосування. При деяких реальних значеннях геометричних параметрів дефекту вони дають від'ємне значення коефіцієнта концентрації напружень.

З іншого боку, дослідження концентрації напружень на основі просторової задачі теорії пружності не втрачає своєї актуальності, оскільки отримані при цьому коефіцієнти концентрації напружень ("теоретичні" коефіцієнти концентрації) лежать в основі інженерних розрахунків на міцність та тріщинотривкість за наявності пластичних деформацій в умовах статичного та циклічного навантаження [34, 56, 79, 115].

Нижче викладено результати дослідження концентрації напружень в області поверхневого дефекту трубопроводу, який моделюється півеліпсоїдом обертання за умови пружної деформації. Для магістральних нафтогазопроводів з урахуванням їх великих діаметрів ($D_y \geq 500$ мм) і малої області збурення напруженого стану, зумовленого концентратором, ділянка трубопроводу з дефектом моделювалася пластиною, до границі якої прикладені задані розподілені зусилля.

Для розв'язування просторової задачі про двосторонній розтяг пластини з поверхневим круговим в плані дефектом використовувалася напіваналітична схема методу скінченних елементів в полярній системі координат, яка базувалася на розкладі переміщень в ряд Фур'є по кутовій координаті та їх білінійній апроксимації на чотирикутних елементах в осьовому перерізі.

Проведено тестування методу на задачах розтягу та циліндричного згину пружного шару з порожниною. Дано аналіз концентрації напружень в області дефекту в полі залишкових зварних напружень МГ.

4.1. Загальна постановка задачі та її схематизація

Корозія металу є однією із головних причин виникнення аварійних ситуацій в трубопроводному транспорті. Причому на практиці рівномірна корозія менш небезпечна, оскільки розвиток і наслідки її легко прогнозуються. Виразки-каверни [25, 78] належать до найбільш небезпечних пошкоджень, оскільки вони ростуть в глибину і прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу з такими пошкодженнями пов'язано зі значними труднощами.

Зрозуміло, що пошкоджений навіть значною локальною корозією, трубопровід втрачає свою працездатність не відразу, а має (в залежності, від ступеня небезпеки дефекту і швидкості корозійного процесу) деякий залишковий ресурс. Визначальною при цьому є величина напружень в околі дефектів, які підсумовують вплив усіх небезпечних чинників і можуть бути деякою кількісною характеристикою безпечної роботи трубопроводу.

Сучасний розвиток обчислювальної техніки дає змогу ефективно визначити розподіл напружень і деформацій в пружному континіумі чисельними методами, зокрема методом скінченних елементів (МСЕ) [41].

Розглядається задача про концентрацію напружень в області поверхневого кругового в плані дефекту трубопроводу за умови пружної деформації (рис.4.1).

Наявність дефекту суттєво збурює напружений стан трубопроводу відносно основного напруженого стану лише в області 3-4 радіусів дефекту [79]. Тому, з урахуванням малої відносної товщини труб нафтогазопроводів, вихідну задачу з незначним наближенням можна звести до визначення напружень в квадратній пластині з круговим дефектом, яка розтягується у поперечному напрямку розподіленим зусиллям інтенсивності σ_{xx} , а у поздовжньому – σ_{zz} (рис.4.1,б).

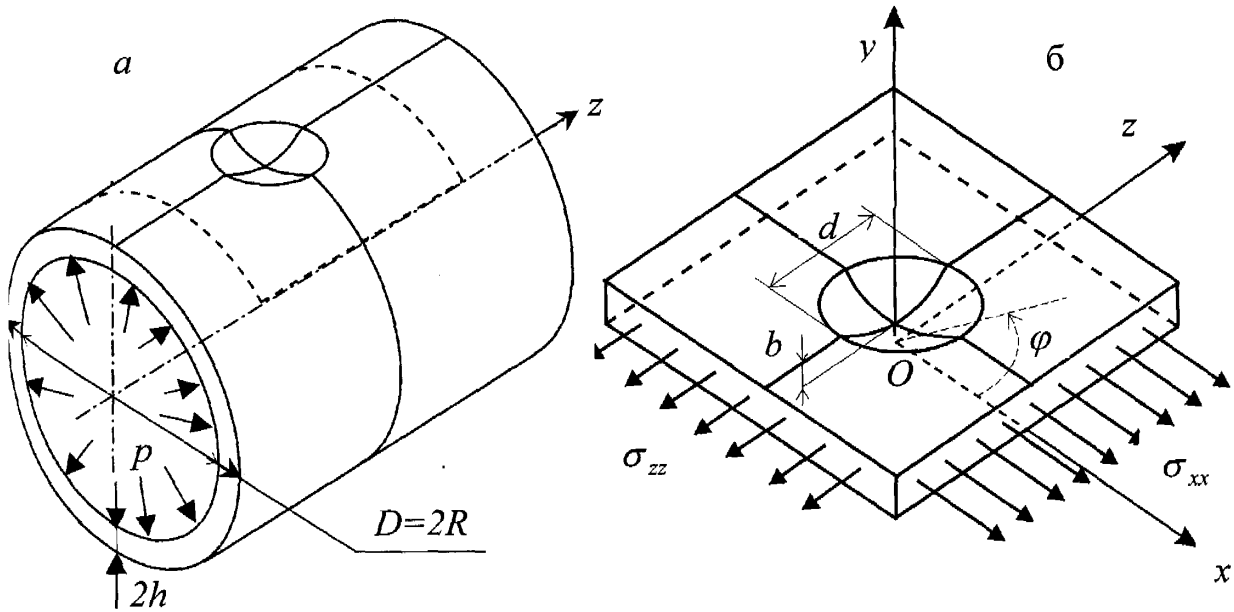


рис.4.1. Трубопровід з поверхневим дефектом (а) і розрахункова модель (б):
 $D=2R$ – зовнішній діаметр трубопроводу; $2h$ – товщина труби; p – тиск в трубопроводі, $d=2c$ – діаметр дефекта; b – глибина дефекта

Позначимо через σ_1 та σ_2 основні напруження в трубопроводі без дефекту, які розраховуються за формулами [130]:

1) для випадку нерухомості перерізу труби вздовж її осі

$$\sigma_1 = \frac{pD_B}{2(2h)} = \frac{pR_B}{(2h)}, \quad \sigma_2 = \mu \frac{pR_B}{(2h)} - \alpha_T E \Delta T ; \quad (4.1)$$

2) для вільного заглушеного кінця труби або циліндричного резервуара

$$\sigma_1 = \frac{pR_B}{2h}, \quad \sigma_2 = \frac{1}{2} \frac{pR_B}{(2h)} \quad (4.2)$$

де $D_B = 2R_B$ – внутрішній діаметр труби; α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення; ΔT – сезонний або технологічний перепад температури;

μ, E – відповідно коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу труби.

В області зварного шва виникають залишкові деформації $\varepsilon_{\alpha\alpha}^0(\alpha)$ та $\varepsilon_{\beta\beta}^0(\alpha)$, які спричиняють виникнення в трубі залишкових напружень

$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha)$ та $\sigma_{\beta\beta}(\alpha)$. Методика розрахунку останніх викладена в розділі 2.

Формулювання задачі теорії пружності з початковими деформаціями в напруженнях [87] включає три однорідні рівняння рівноваги і шість рівнянь сумісності деформацій, які містять другі похідні від початкових деформацій, та крайові умови. Аналіз цієї задачі показує, що лінійно розподілені залишкові деформації (в декартовій системі координат $Oxyz$) є сумісними в однорідній області і не викликають залишкових напружень.

В загальному випадку ділянку трубопроводу з дефектом будемо розглядати під дією напружень

$$\sigma_{xx} = \sigma_1 + \sigma_{\beta\beta}, \quad \sigma_{zz} = \sigma_2 + \sigma_{\alpha\alpha} \quad (4.3)$$

4.2. Математична постановка задачі та загальна методика її розв'язування

Задача просторової теорії пружності про двохосний розтяг пластини з круговим дефектом розглядається в циліндричній системі координат (r, y, φ) (рис. 4.1), яка пов'язана з декартовою системою координат (x, y, z) таким чином

$$x = r \cos \varphi, \quad z = r \sin \varphi, \quad y = y \quad .$$

Вісь Oz направлена вздовж трубопроводу, а вісь Ox – у поперечному напрямку. Напружено-деформований стан в циліндричній системі координат повністю описується [87]:

вектором переміщень $\bar{u} = (u, v, w)^T$;

квазі-вектором деформацій $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \gamma_{ry}, \gamma_{\varphi y}, \gamma_{r\varphi})^T$;

квазі-вектором напружень $\bar{\sigma} = (\sigma_{rr}, \sigma_{yy}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{ry}, \sigma_{\varphi y}, \sigma_{r\varphi})^T$.

Вказані величини пов'язані між собою співвідношеннями Коші:

$$\bar{\varepsilon} = [A]\bar{u}, \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} & 0 & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

та законом Гука

$$\bar{\sigma} = [D]\bar{\varepsilon}, \quad [D] = \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Тут і надалі прийнято позначення:

$\{a\} = \bar{a}$ – вектор-стовпчик, $\{a\}^T = \bar{a}^T = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ – вектор-рядок, $[A]$ – матриця.

Рівняння рівноваги в напруженнях при відсутності масових сил в циліндричній системі координат мають вигляд [87]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{ry}}{\partial y} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\sigma_{r\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{ry}}{r} &= 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

На краю пластини $r = r_2$ (рис.4.2) виконуються наступні крайові умови:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) + \frac{1}{2}(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})\cos 2\varphi = F_r(r_2, \varphi, y), \\ \sigma_{r\varphi} &= -\frac{1}{2}(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})\sin 2\varphi = F_r(r_2, \varphi, y), \\ \sigma_{ry} &= 0 = F_y, \quad (r = r_2, 0 \leq y \leq 2h, 0 \leq \varphi \leq 2\pi).\end{aligned}\quad (4.7)$$

Для однозначного визначення напружень на основі рівнянь рівноваги (4.6) за крайових умов (4.7), необхідно додати 6-ть рівнянь сумісності деформацій, незалежними з яких є лише 3. Простий аналіз загальної системи рівнянь у випадку, коли дефект знаходиться поза зоною дії залишкових напружень, дозволяє зробити такі висновки:

- 1) напружений стан в трубопроводі не залежить від модуля пружності E , а може залежати лише від коефіцієнта Пуассона ν , який входить в рівняння сумісності деформацій;
- 2) при пропорційному збільшенні усіх розмірів трубопроводу зі збереженням крайових умов (4.7) напружений стан в пластині не змінюється. Це дозволяє віднести геометричні параметри пластини до її товщини;
- 3) симетрія задачі відносно осей Ox та Oz та її лінійність суттєво спрощують побудову загального розв'язку за двохосного розтягу. Достатньо розв'язати задачу про одноосний розтяг пластини вздовж осі Ox і знайти компоненти напружень $\sigma_{\alpha\beta}^1$ віднесені до зовнішнього зусилля σ_1 . Загальний розв'язок задачі при двохосному розтязі отримується як лінійна комбінація

$$\sigma_{\alpha\beta}(r, y, \varphi) = \sigma_1 \sigma_{\alpha\beta}^1(r, y, \varphi) + \sigma_2 \sigma_{\alpha\beta}^1(r, y, \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad (\alpha, \beta = r, y, \varphi). \quad (4.8)$$

Для чисельного дослідження задачі методом скінченних елементів (МСЕ) скористаємось її еквівалентною варіаційною постановкою як проблеми мінімуму функціонала Лагранжа [19, 41, 80].

4.3. Скінченно-елементна апроксимація

4.3.1. Ізопараметричний чотирикутний білінійний елемент. Для апроксимації переміщень по осьовому перерізу в функціоналах (4.13) використовуються ізопараметричні чотирикутні елементи з вузлами в вершинах (рис.4.3) та білінійна апроксимація всередині елемента [41, 131]. Така апроксимація забезпечує неперервність переміщень вздовж границь між елементами, що гарантує збіжність методу скінченних елементів [41, 80, 131].

На елементі вводиться природня система координат (ξ, η) . Початку координат відповідає точка перетину ліній, які ділять навпіл протилежні сторони елемента. Інтерполяційний поліном записується у вигляді

$$\psi(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \Psi_i = \{N\}^T \{\Psi\}, \quad (4.17)$$

де $\Psi_i, i=1,2,\dots,4$ – вузлові значення апроксимованої функції,

$\{\Psi\} = (\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4)^T$ – вектор вузлових значень, $N_i(\xi, \eta)$ – функції форми:

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta), & N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta), \\ N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta), & N_4(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta), \end{aligned} \quad (4.18)$$

які складають вектор функцій форми $\{N\}$.

Перехід до координат r, y здійснюється за формулами

$$r = \{N\}^T \{R\} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) R_i, \quad y = \{N\}^T \{Z\} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) Z_i, \quad (4.19)$$

де $\{R\}, \{Z\}$ – вектори координат вузлів елемента.

Формули для обчислення похідних $\frac{\partial N_i}{\partial r}, \frac{\partial N_i}{\partial y}$ отримуються

наступним чином. Вводиться матриця Якобі

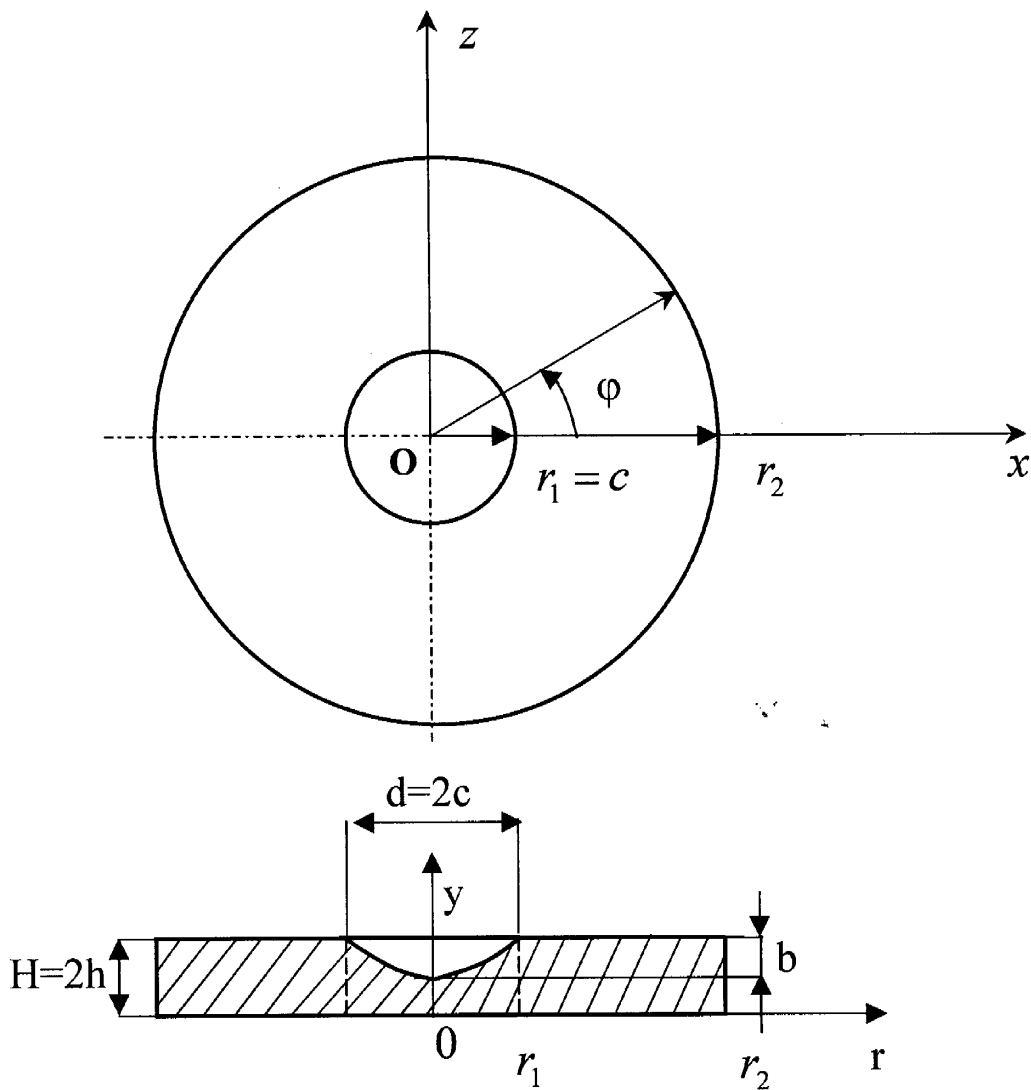


Рис. 4.2. Пластина з поверхневим дефектом в циліндричній системі координат

Введемо простір кінематично допустимих переміщень

$$2h = \{ \bar{u} \in (H^1(V))^3 \mid u = 0, r = 0; \bar{u} = 0, r = 0, y = 0 \}. \quad (4.9)$$

Тоді, вихідна крайова задача еквівалентна проблемі мінімізації

$$\min_{\bar{u} \in H} \left\{ J(\bar{u}) = \frac{1}{2} a(\bar{u}, \bar{u}) - l(\bar{u}) \right\}, \quad (4.10)$$

де

$$a(\bar{u}, \bar{u}) = \int_V \bar{\varepsilon}^T [D] \bar{\varepsilon} dV \quad - \quad \text{квадратична форма, яка відповідає енергії}$$

пружної деформації тіла V ,

$l(\bar{u}) = \int_S \bar{F}^T \bar{u} dS$ – робота заданих зовнішніх зусиль (4.7) $\bar{F}^T = (F_r, F_z, F_\varphi)$ на

поверхні $S = \{(r, z, \varphi) | r = r_2, 0 \leq z \leq 2h, 0 \leq \varphi \leq 2\pi\}$ на можливих переміщеннях.

Припускаючи, що зовнішнє навантаження (4.7) є симетричним відносно осі Ox скористаємось напіваналітичним варіантом МСЕ [41] та подамо шукані переміщення у вигляді розкладів в ряди Фур'є за кутовою координатою:

$$\bar{u} = \sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} \bar{u}_n(r, y) [\Phi_n(\varphi)], \quad (4.11)$$

де

$$\bar{u}_n(r, y) = (u_n(r, y), v_n(r, y), w_n(r, y))^T, \quad [\Phi_n(\varphi)] = \begin{bmatrix} \cos n\varphi & 0 & 0 \\ 0 & \cos n\varphi & 0 \\ 0 & 0 & \sin n\varphi \end{bmatrix}.$$

Тоді, підставляючи ці розклади в функціонал (4.10) і враховуючи ортогональність системи тригонометричних функцій $\{\sin k\varphi, \cos l\varphi, k, l = 0, 1, \dots, \infty\}$ на проміжку $[0, 2\pi]$, отримаємо його подання у вигляді:

$$J(\bar{u}) = \sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} J_n(\bar{u}_n), \quad (4.12)$$

де

$$J_n(\bar{u}_n) = \alpha_n \left[\frac{1}{2} \int_{\Omega} ([A_n] \bar{u}_n)^T [D][A] \bar{u}_n r dr dy - \int_L \bar{F}_n^T \bar{u}_n r dL \right], \quad (4.13)$$

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & \frac{n}{r} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & -\frac{n}{r} & \delta_n \frac{\partial}{\partial y} \\ -\frac{n}{r} & 0 & \delta_n \left(\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \right) \end{bmatrix}, \quad \alpha_n = \begin{cases} 2\pi, & n=0 \\ \pi, & n \geq 1 \end{cases}, \quad \delta_n = \begin{cases} 0, & n=0 \\ 1, & n \geq 1 \end{cases}, \quad (4.14)$$

\bar{F}_n – отримуються з розкладу заданих напружень (4.7) в ряд Фур'є

$$\bar{F} = \sum_{n=0,1,\dots}^{\infty} \bar{F}_n(r, y) [\Phi_n(\varphi)], \quad \bar{F}_n(r, y) = (F_{nr}(r, y), F_{nz}(r, y), F_{n\varphi}(r, y)),$$

$$F_{nr}(r, y) = \frac{2}{\alpha_n} \int_0^{\pi} \sigma_{rr}(r, y, \varphi) \cos n\varphi d\varphi, \quad (4.15)$$

$$F_{n\varphi}(r, y) = \frac{2\delta_n}{\alpha_n} \int_0^{\pi} \sigma_{r\varphi}(r, y, \varphi) \sin n\varphi d\varphi, \quad F_{nz}(r, y) = 0.$$

Аналогічним чином, розкладаючи в ряд Фур'є задані переміщення, отримуємо граничні умови для векторів $\bar{u}_n, n = 0, 1, \dots, \infty$.

Таким чином, для кожної компоненти переміщень \bar{u}_n отримуємо двовимірну проблему мінімізації функціонала (4.13) на деякій множині кінематично допустимих переміщень $H_0^{(n)}$.

Задача суттєво спрощується за умови двоосного розтягу, коли крайові умови (4.7) містять лише дві гармоніки, які відповідають $n=0$ та $n=2$.

Для цього випадку матимемо точний розклад

$$\begin{aligned} u &= u_0 + u_2 \cos 2\varphi, \\ v &= v_0 + v_2 \cos 2\varphi, \\ w &= w_2 \sin 2\varphi. \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

яка встановлює зв'язок між похідними по ξ, η та похідними по x, z

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix}. \quad (4.21)$$

Зворотній зв'язок отримується обертанням цієї матриці.

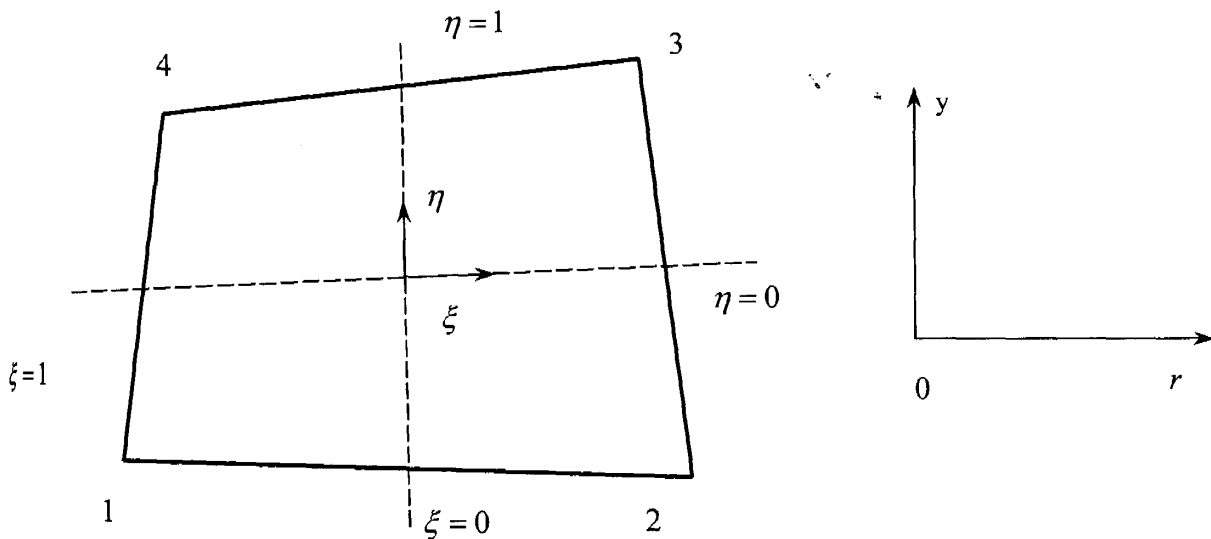


Рис. 4.3. Ізопараметричний чотирикутний білінійний елемент

4.3.2. Апроксимація функціонала на елементі. Значення переміщень u_n, v_n, w_n у вузлах $i=1,2,3,4$ елемента $\Omega^{(e)}$ з номером e позначимо через $u_{ni}^{(e)}, v_{ni}^{(e)}, w_{ni}^{(e)}$ і введемо узагальнений вектор вузлових переміщень на елементі

$$\{\Psi_n^{(e)}\}^T = [\bar{u}_n^{(e)}, \bar{v}_n^{(e)}, \bar{w}_n^{(e)}] = [u_{n1}^{(e)}, u_{n2}^{(e)}, u_{n3}^{(e)}, u_{n4}^{(e)}, \dots, w_{n1}^{(e)}, w_{n2}^{(e)}, w_{n3}^{(e)}, w_{n4}^{(e)}]. \quad (4.22)$$

Переміщення на елементі апроксимуються білінійними функціями (4.17)

$$u_n(r, y) = \{N^{(e)}\}^T \{u_n^{(e)}\}, \dots, w_n(r, y) = \{N^{(e)}\}^T \{w_n^{(e)}\}. \quad (4.23)$$

Тоді для квадратичної частини функціоналу (4.13) отримаємо апроксимацію

$$\frac{1}{2} \int_{\Omega^{(e)}} ([A_n] \bar{u}_n)^T [D] [A_n] \bar{u}_n r dr dz \approx \frac{1}{2} \{\Psi_n^{(e)}\}^T [K_n^{(e)}] \{\Psi_n^{(e)}\}, \quad (4.24)$$

де $[K_n^{(e)}]$ – матриця жорсткості елемента

$$[K_n^{(e)}] = \int_{\Omega^{(e)}} [k_n^{(e)}] r dr dy. \quad (4.25)$$

Після проведення необхідних викладок матриця $[k_n^{(e)}]$ зображається у вигляді:

$$[k_n^{(e)}] = \gamma \begin{bmatrix} [A_n] & [B_n] & [P_n] \\ [B_n]^T & [C_n] & [Q_n] \\ [P_n]^T & [Q_n]^T & [R_n] \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

де $[A_n], [B_n], [C_n], [P_n], [Q_n], [R_n]$ – матриці розміру 4×4 , елементи яких даються формулами:

$$\begin{aligned} a_{ij}^n &= \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \alpha \left(\frac{N_i}{r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{N_j}{r} \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) + (1 + \beta n^2) \frac{N_i N_j}{r^2} + \beta \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}, \\ b_{ij}^n &= \alpha \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} + \frac{N_i}{r} \right) \frac{\partial N_j}{\partial y} + \beta \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial r}, \\ c_{ij}^n &= \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \beta \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \beta n^2 \frac{N_i N_j}{r^2}, \\ p_{ij}^n &= n \left[\alpha \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{N_j}{r} - \beta \frac{N_i}{r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + (1 + \beta) \frac{N_i N_j}{r^2} \right], \\ q_{ij}^n &= n \left[\alpha \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{N_j}{r} - \beta \frac{N_i}{r} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right], \\ r_{ij}^n &= n^2 \frac{N_i N_j}{r^2} + \delta_n \beta \left[\frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} - \frac{N_i}{r} \right) \left(\frac{\partial N_j}{\partial r} - \frac{N_j}{r} \right) \right], \\ \alpha &= \nu, \quad \beta = \frac{1 - 2\nu}{2}, \quad \gamma = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Розрахунок інтегралів в формулі (4.25) здійснюється за квадратурною формулою Гаусса [131] порядку $n = 2$.

Аналогічно апроксимується інтеграл від заданих зусиль по частині контура $L = \{(r, y) | r = r_2, \quad 0 \leq y \leq 2h\}$:

$$\int_{L \cap \Omega^{(e)}} \bar{F}_n^T \bar{u} r dL \approx \{\Psi_n^{(e)}\}^T \{F_n^{(e)}\}, \quad (4.28)$$

де для конкретного випадку (наприклад, коли граничною є сторона елемента між 2-им та 3-ім вузлами елемента)

$$\{F_n^{(e)}\} = \{\bar{F}_{nr}^{(e)}, \bar{F}_{ny}^{(e)}, \bar{F}_{n\phi}^{(e)}, \bar{F}_{n\alpha}^{(e)}\} = F_\alpha \frac{L_{23}}{6} [0, 2R_2 + R_3, 2R_3 + R_2, 0], \quad (4.29)$$

L_{23} – відстань між 2-им та 3-ім вузлами елемента.

Таким чином, вихідний функціонал $J_n(\bar{u}_n)$ апроксимується на елементі e функцією багатьох змінних

$$J_n^{(e)}(\{\Psi_n^{(e)}\}) = \frac{1}{2} \{\Psi_n^{(e)}\}^T [K_n^{(e)}] \{\Psi_n^{(e)}\} - \{\Psi_n^{(e)}\}^T \{F_n^{(e)}\}. \quad (4.30)$$

Сумуючи за елементами, отримаємо загальний вираз

$$J_n = \sum_{e=1}^N J_n^{(e)} = \frac{1}{2} \{\Psi_n\}^T [K_n] \{\Psi_n\} - \{\Psi_n\}^T \{F_n\}, \quad (4.31)$$

де $[K_n]$ – глобальна матриця жорсткості,

$[F_n]$ – вектор навантаження,

$\{\Psi_n\}^T = [u_{n1}, v_{n1}, w_{n1}, \dots, u_{nM}, v_{nM}, w_{nM}]$ – глобальний вектор переміщень,

N – кількість елементів,

M – кількість вузлів.

Мінімізація функції (4.31) зводиться до розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$[K_n] \{\Psi_n\} = \{F_n\}. \quad (4.32)$$

Тим самим, для кожної гармоніки n отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (4.32).

Для реалізації вище викладеної методики розрахунку НДС трубопроводів методом скінченних елементів створено пакет прикладних програм для ПК.

4.4. Програмна реалізація напіваналітичної схеми МСЕ розрахунку напружень в області кругового в плані дефекту трубопроводу

На базі практичних положень напіваналітичної схеми МСЕ, викладених вище, розроблена програма для розрахунку напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу з поверхневим круговим в плані дефектом під дією циклічно-симетричних зусиль, прикладених по боковій поверхні.

Програма написана на мові Fortran 77. Складається з основної програми SupMain, та 27 підпрограм ElipsDef, FurLoad, SimpN, VvidDef, MeshSimp, MeshCyl, MeshVar, Deli2, SolPar, Fdef, Fun, VuvSt, FrmGSM, FormGF, SISM, DcmpBD, SlvBD, VuvPer, Stress, StrBord, StrDot, StrSurfA, StrGage, StrSec, StrSecIr, DigVal, RadDef.

За заданих геометричних параметрів ділянки трубопроводу та дефекту, механічних констант матеріалу і навантаження, програма автоматично генерує сітку методу скінченних елементів і розраховує:

- переміщення в вузлах сітки;
- напруження на елементах;
- максимум по елементах еквівалентних напружень за енергетичною теорією формозміни;
- напруження в точках границі області;
- напруження по заданих перерізах у вихідній прямокутній системі координат.

Програмне забезпечення дозволяє проводити розрахунок для довільної в осьовому перерізі форми дефекту, шляхом задання відповідної функції форми. Стандартно задані форми дефекту – півеліпсоїд обертання та циліндрична порожнина з еліпсоїдальним дном.

Підпрограми розробленого комплексу можна розділити на наступні групи:

- 1) Головна програма.
- 2) Підпрограми стандартних чисельних методів:
 - розв'язування нелінійних рівнянь методом парабол – SolPar;
 - обчислення еліптичних інтервалів – Deli2;
 - обчислення інтегралів – SimpN;
 - прямого та оберненого ходу методу Гаусса розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь для стрічкових матриць DcmpBD, SlvBD.
- 3) Підпрограми методу скінченних елементів:
 - опис геометрії дефекту, навантажень, формування та виводу сітки скінченних елементів – Fdef, RadDef, FurLoad, MeshSimp, MeshCyl, MeshVar, Fun, VuvSt;
 - формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь та правої частини – FrmGSM, FormGF;
 - модифікації системи рівнянь для врахування кінематичних крайових умов – SISM;
 - розрахунку та виводу переміщень у вузлах – VuvPer, напружень на елементах – Stress, напружень в вузлах границі – StrBord, StrDot, StrSurfA, StrGage, напружень в перерізах – StrSec, StrSecir.
- 4) Підпрограма вводу вхідних даних – VvidDef.
- 5) Допоміжна підпрограма DigVal.

Схема ієрархії програми показана на рис. 4.4.

Дано короткий опис головної програми та найбільш важливих підпрограм.

Головна програма SupMain здійснює налаштування з організації розміщення файлів на диску (розпізнає біжучу директорію, створює піддиректорію для вихідних результатів, перевіряє наявність вихідних файлів, формує шляхи для вихідних файлів) та запускає підпрограму вводу початкових даних VvidDef і головну підпрограму розрахунку ElipsDef.

Підпрограма VvidDef організовує ввід та початкову підготовку вхідних даних задачі. Відкриває файл вхідних даних за назвою, яка передається символьною змінною InDate з головної програми SupMain. Далі здійснюється читання вхідних даних у фіксованому форматі.

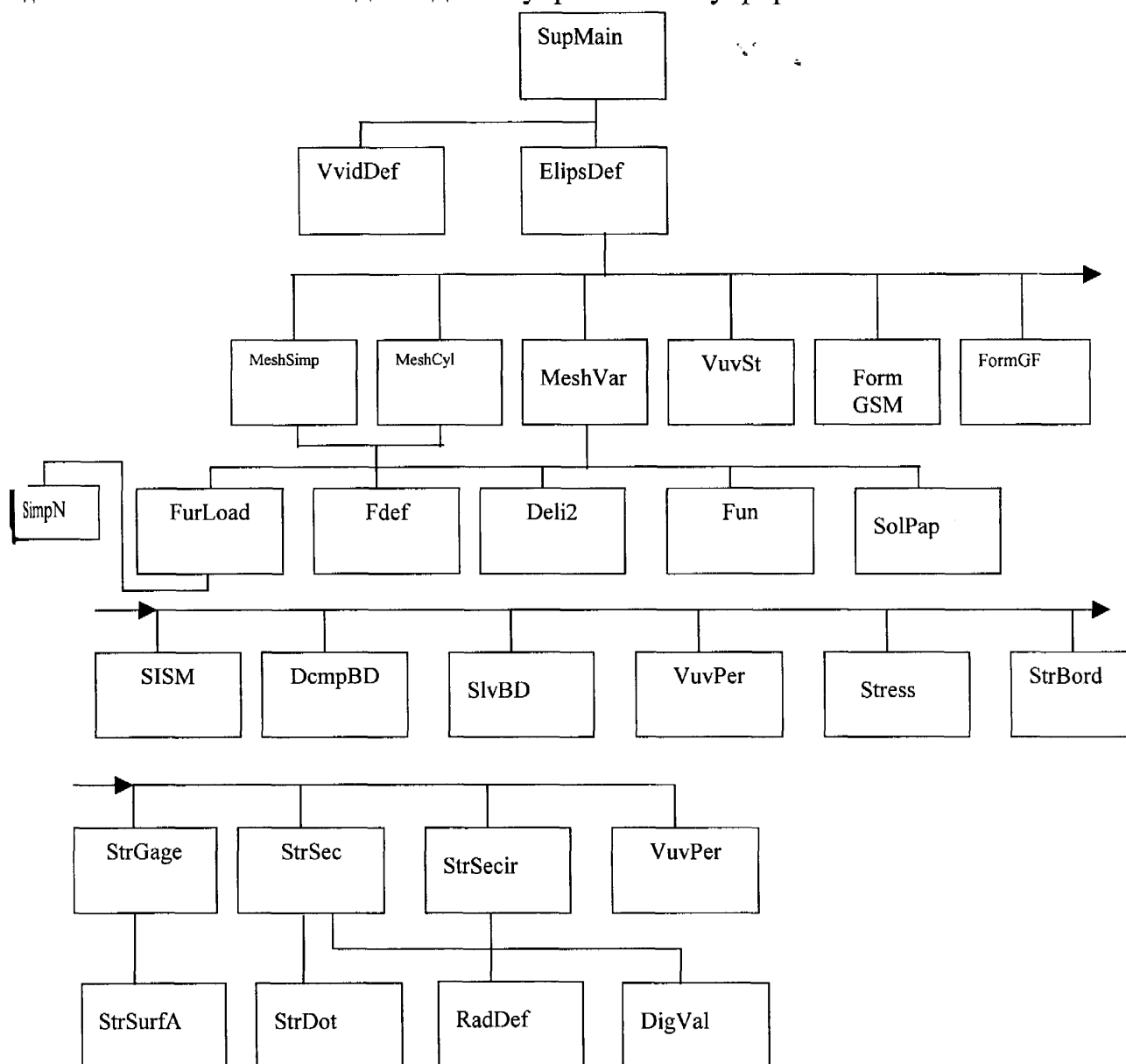


Рис. 4.4. Схема ієрархії програми

Підпрограма ElipsDef є головною. Вона послідовно викликає інші підпрограми та виконує наступне:

- Формує сітку методу скінченних елементів.
- Формує та розв'язує системи лінійних алгебраїчних рівнянь МСЕ.
- Проводить розрахунок та вивід переміщень у вузлах.
- Проводить розрахунок та вивід напружень по елементах.
- Розраховує напруження на границі.
- Організовує вивід файлів напружень по перерізах в прямокутній системі координат.

Розбиття вихідної області здійснюється на чотирикутні елементи. Залежно від розмірів дефекту, в його околі передбачене згущення сітки (рис.4.5).

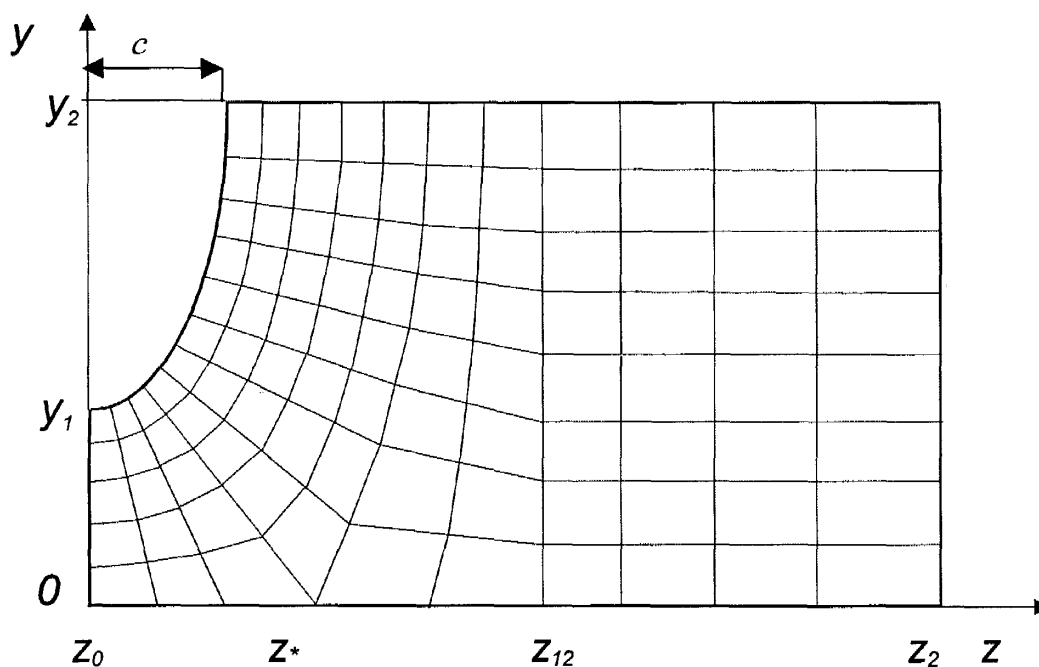


Рис. 4.5 Розбиття сітки для глибоких дефектів

Інтерфейс програми представлено на рис.4.6. Як бачимо, програма дає змогу отримувати розподіл напружень в будь-якому перерізі дефекту. Окремо виконується візуалізація результатів з використанням 3D графіки.

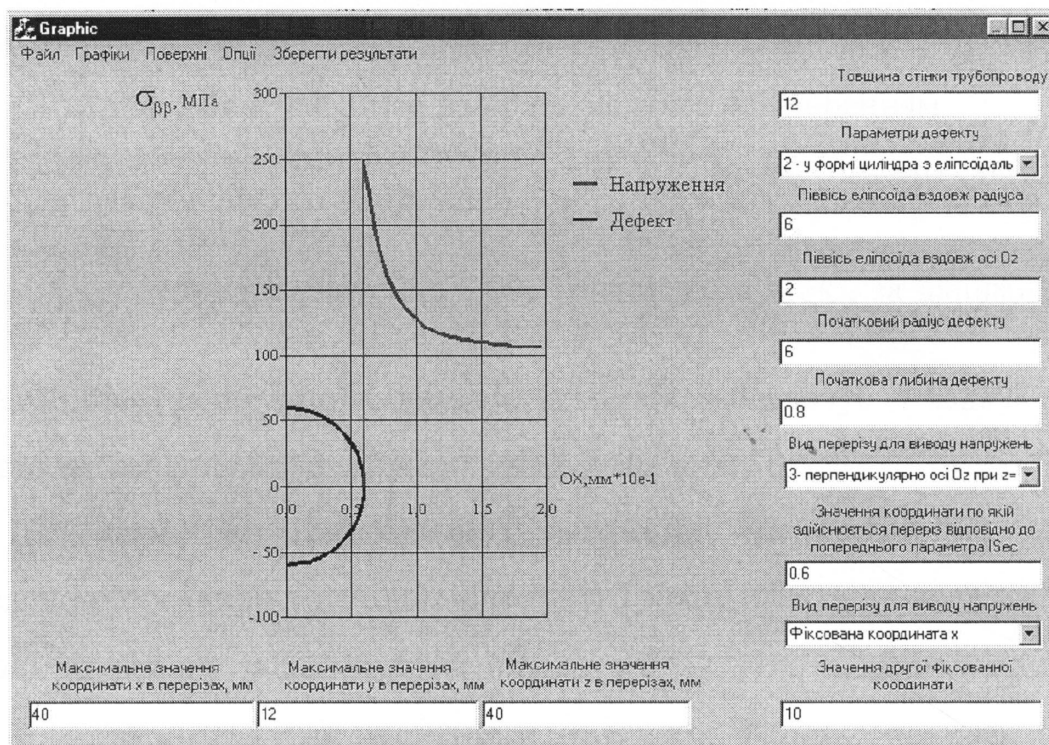


Рис. 4.6. Інтерфейс програми обчислення розподілу напружень в околі дефекту

Більш детальний опис прикладних програм розрахунку напружень в околі дефектів трубопроводів приведений в додатку А.

4.5. Аналіз числових результатів

4.5.1. Тестові задачі. Для перевірки правильності роботи програми проведено тестовий розрахунок просторових задач про напружений стан в пластині з отвором радіусом r_1 за її одноосного розтягу (просторова задача Кірша) та циліндричного згину. Аналітичний розв'язок цих задач наведено у працях [31,57].

Просторова задача Кірша розв'язувалась за наступних значень геометричних параметрів: $2h = 12$ мм, $r_1 = 6$ мм, $r_2 = 360$ мм. При цьому використовувалось рівномірне розбиття за товщиною на 20 елементів, вздовж радіуса в зоні $[r_1, 2r_1]$ – рівномірне розбиття на 40 елементів, а в зоні $[2r_1, r_2]$ – нерівномірне розбиття на 40 елементів з розширенням.

Для максимального напруження $\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\sigma_1}$, яке виникає на краю отвору при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, отримане значення 3.09. Точний розв'язок, за даними роботи [31], складає 3.08. Таким чином, вказане розбиття забезпечує в задачі розтягу точність визначення максимальних напружень вищу 0.5 %.

Для таких же геометричних параметрів та параметрів розбиття проведено розрахунок задачі циліндричного згину пластини, коли на значній відстані від отвору задані напруження $\sigma_{xx} = \sigma_1^+ (2y/H - 1)$. Для максимального напруження $\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\sigma_1^+}$, яке виникає на краю отвору при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, отримане значення 2.07. Точний розв'язок, за даними роботи [57], складає 2.05. Таким чином, вказане розбиття забезпечує в задачі згину точність визначення максимальних напружень близьку до 1 %.

4.5.2. Аналіз концентрації напружень у газопроводі з корозійним дефектом в області зварного шва. Досліджувався вплив корозійного дефекту типу виразки-каверни [78] на напружено - деформований стан магістрального газопроводу в області зварного стикового з'єднання на МГ "Івацевичі-Долина III нитка" ділянка Волинського ЛВУМГ ($D = 1220$ мм, $H = 2h = 12$ мм, $p = 4,5$ МПа, матеріал сталь 17Г1С). Розглянутий трубопровід експлуатується з 1978 р.

Залишкові напруження у стиковому зварному з'єднанні отримані розрахунково-експериментальним методом, що розглянутий в розділі 3 (п.3.4).

Розподіл залишкових напружень для цього стикового з'єднання зображено на рис.3.12.

Для зручності проведення подальших розрахунків аналітичні вирази для залишкових напружень (3.10) зображаємо у вигляді:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \sigma_{\alpha}^{+}(\alpha)[2y/(2h)-1], \quad \sigma_{\beta\beta} = \sigma_{\beta}^{0}(\alpha) + \sigma_{\beta}^{+}(\alpha)[2y/(2h)-1], \quad (4.33)$$

де σ_{α}^{+} і σ_{β}^{+} – осьові та колові напруження на зовнішній поверхні труби; σ_{β}^{0} – мембранна компонента осьових напружень.

Нижче розглянуто три випадки розташування дефектів у формі півеліпсоїда обертання в характерних зонах області залишкових напружень:

Зона 1. Центр дефекту розташований в області максимальних розтягувальних напружень на осі шва.

Розглянуто дефекти з відносним радіусом $c/(2h) = 0.4$ та глибиною $b/(2h) = 0.2; 0.4; 0.6$. Аналізувався напружений стан в області дефекту, зумовлений залишковими напруженнями. На рис.4.7 графічно зображено розподіл колових напружень вздовж осі трубопроводу і вздовж осі шва в коловому напрямку на поверхні дефекту і зовнішній поверхні труби.

Розподіл колових напружень в осьовому перерізі для дефекта $b/(2h)=0,4$ у вигляді ізоліній в МПа показаний на рис 4.8. Максимальні колові напруження досягаються в області вертикальної частини дефекту і дорівнюють $\sigma_{\beta\beta} = 372$ МПа. При цьому коефіцієнт концентрації відносно середніх залишкових напружень ($\sigma_{\beta\beta}^* = 160$ МПа) в області шва складає 2,3.

Розподіл залишкових колових напружень на поверхні труби в області дефекту вздовж осі шва в МПа поданий на рис. 4.9. З рис. 4.7 (крива-4) та рис. 4.9 видно, що колові напруження по поверхні дефекту вздовж осі шва

спадають до нуля на його краю, а на зовнішній поверхні труби збільшуються до номінальних залишкових значень.

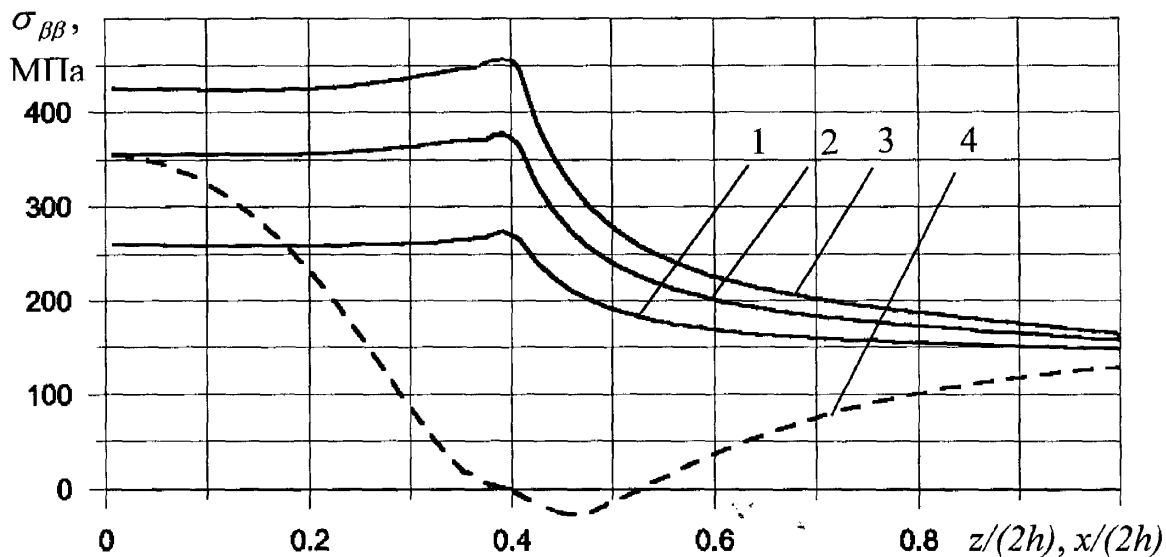


Рис.4.7. Розподіл колових напружень на поверхні дефекту і зовнішній поверхні труби: криві 1-3 вздовж осі трубопровода для глибин дефекту відповідно $b/(2h)=0,2$; $0,4$; $0,6$; крива 4 – вздовж осі шва при $b/(2h)=0,4$

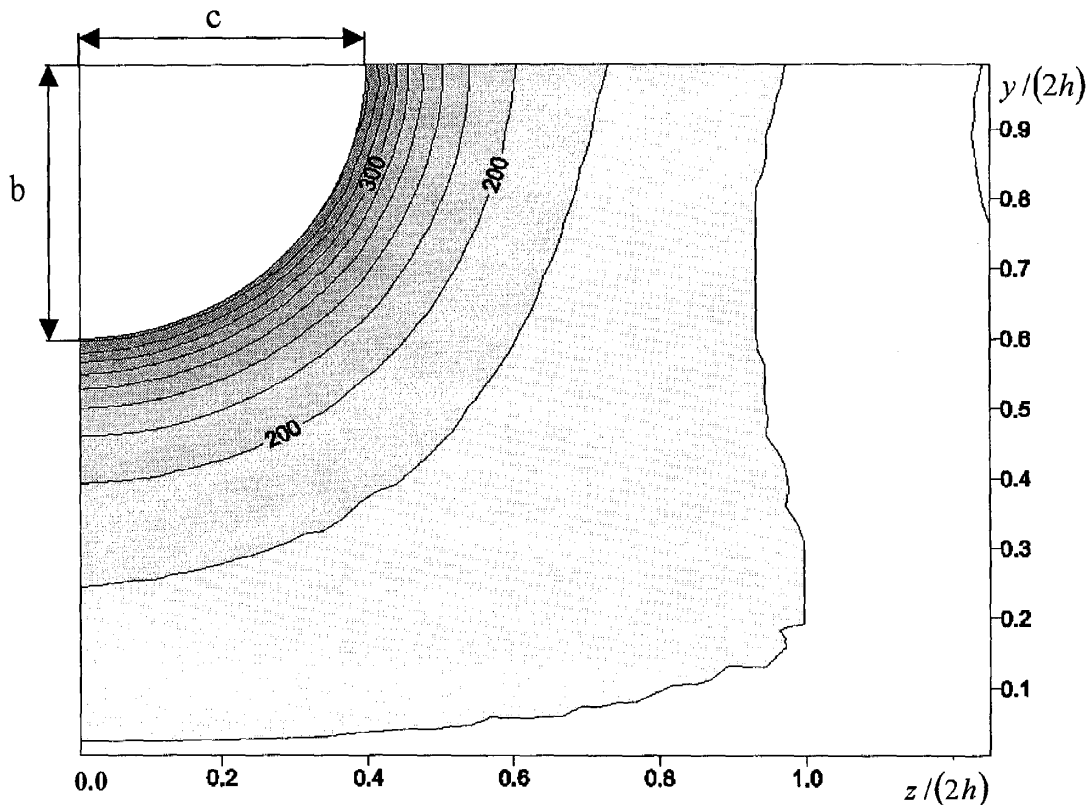


Рис.4.8. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі дефекту, центр якого розміщений на осі зварного шва при $z_0 = 0$

Аналіз напруженого стану, коли дефект знаходиться в зоні 1, виявив, що максимальними є колові напруження на поверхні дефекту в осьовому перерізі труби. Наявність дефекту на осі зварного шва приводить до перерозподілу залишкових напружень. Зокрема колові залишкові напруження на поверхні дефекту в осьовому перерізі труби зростають, а в напрямку осі шва зменшуються. Концентрація напружень зростає із збільшенням глибини дефекту.

Зона 2. Дефект радіусом $c/(2h) = 0.4$ та глибиною $b/(2h) = 0.4$ розташований в області найбільших стискальних напружень ($20 \text{ мм} \leq z \leq 70 \text{ мм}$). Лінії рівня колових напружень в МПа в осьовому перерізі дефекту показані на рис. 4.10. Максимальні залишкові стискальні напруження виникають на поверхні дефекту в осьовому перерізі при $y/(2h)=0.98$ і дорівнюють $\sigma_{\beta\beta} = -78 \text{ МПа}$.

Зона 3. Дефект радіусом $c/(2h) = 0,4$ та глибиною $b/(2h) = 0,4$ розташований в області більш рівномірного розподілу залишкових стискальних колових напружень ($70 \text{ мм} \leq z \leq 120 \text{ мм}$). Дефект знаходиться у полі як стискальних, так і згинальних колових та згинальних осьових напружень. Лінії рівня залишкових колових напружень (в МПа) в осьовому перерізі в області дефекту показані на рис.4.11. Розподіл колових напружень аналогічний як і в попередньому випадку, максимальні стискальні напруження дорівнюють $\sigma_{\beta\beta} = -37 \text{ МПа}$.

Графічні залежності розподілу залишкових колових напружень в осьовому перерізі дефекту радіуса $c/(2h) = 0,4$ та глибиною $b/(2h) = 0,4$, який розміщений в трьох вище розглянутих ділянках, наведені на рис. 4.12. Порівняльний аналіз графічних залежностей (1-3) показує, що найбільш небезпечною, з точки зору експлуатації МТ, є розташування дефекту в зоні зварного шва.

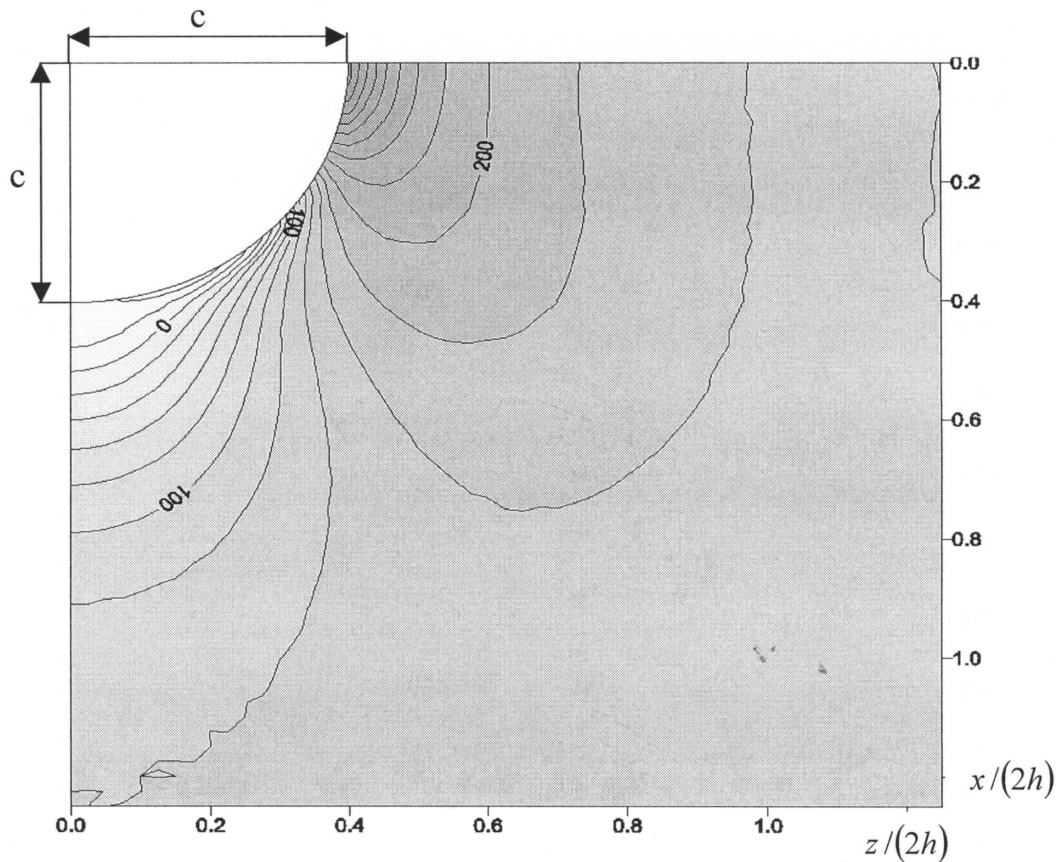


Рис.4.9. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі дефекту вздовж осі шва

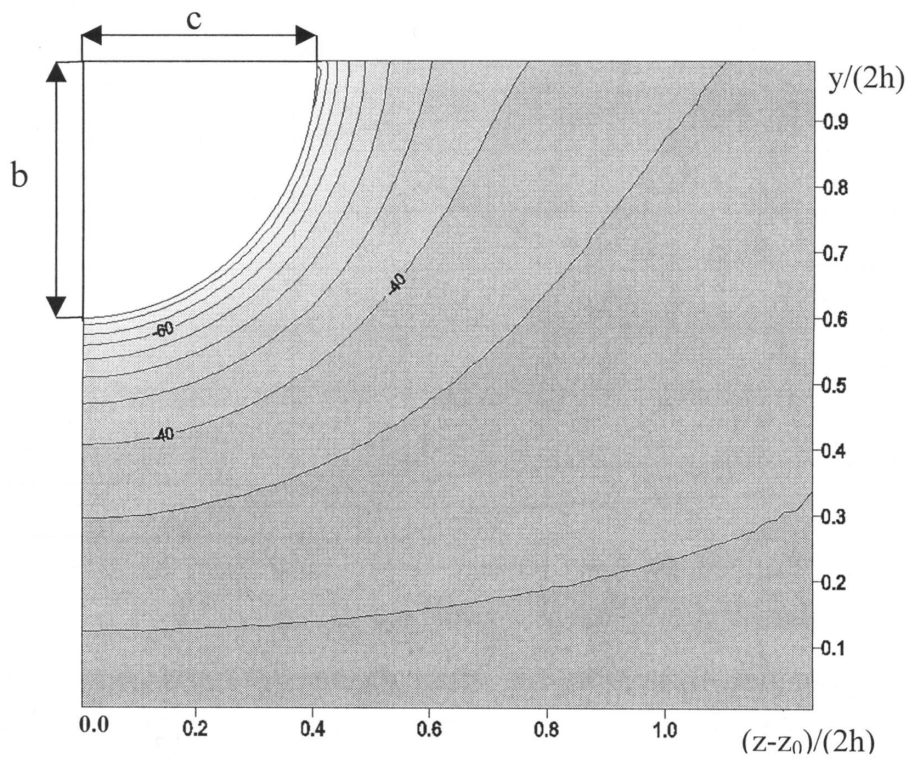


Рис.4.10. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі дефекту, центр якого розміщений на відстані $z_0=50$ мм від осі зварного шва

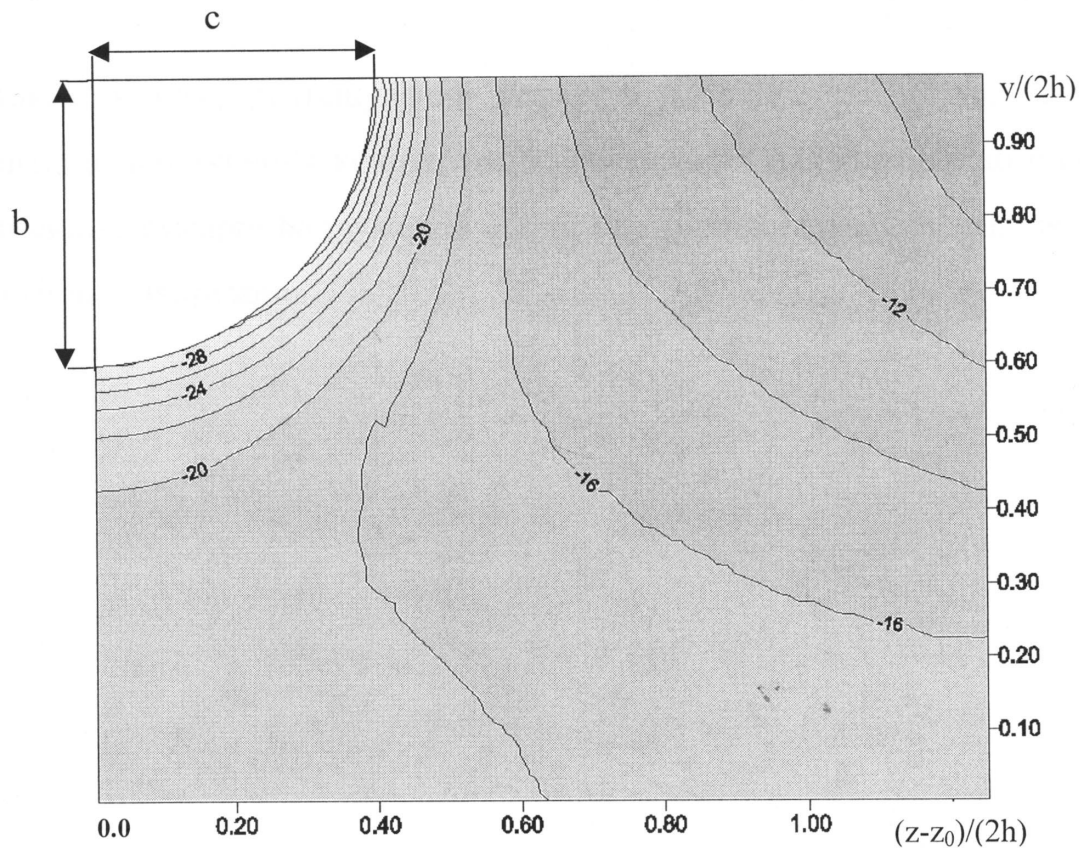


Рис.4.11. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі дефекту, центр якого розміщений на відстані $z_0 = 100$ мм від осі зварного шва

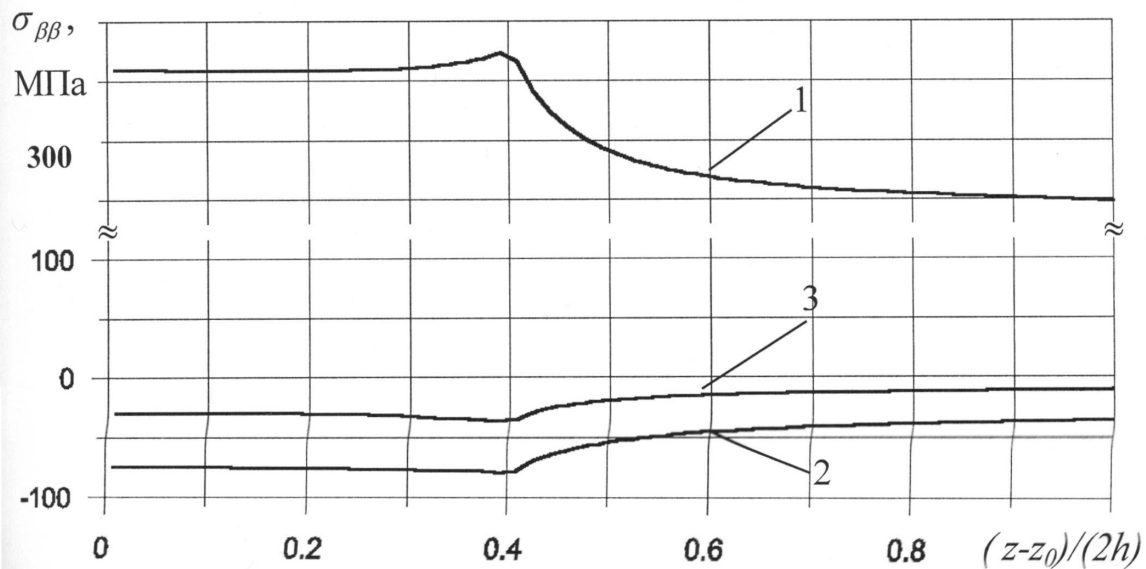


Рис.4.12. Розподіл колових напружень на поверхні дефекту і зовнішній поверхні труби (дефект радіусом $c/2h = 0,4$ та глибиною $b/2h = 0,4$, розміщений в зонах 1-3)

Таким чином, розташування дефектів в зоні 2 і 3 (криві 2 і 3) приводить до виникнення концентрації стискальних напружень, що в свою чергу зменшує сумарні напруження від дії внутрішнього тиску і залишкових технологічних напружень.

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано математичну модель для визначення концентрації напружень в околі поверхневих дефектів магістральних нафтогазопроводів типу виразки-каверни, що знаходяться під дією силових навантажень а також залишкових технологічних напружень в околі кільцевого зварного шва.

2. Розроблено чисельну методику розв'язування циклічно-симетричних тривимірних задач теорії пружності на основі напіваналітичної схеми МСЕ та здійснено її програмну реалізацію стосовно розрахунку напруженого стану в області корозійних дефектів трубопроводів.

3. У випадку, коли дефект знаходиться поза зоною дії залишкових напружень:

- напружений стан в області дефекту трубопроводу не залежить від модуля пружності E , а може залежати лише від коефіцієнта Пуассона μ , який входить в рівняння сумісності деформацій;
- при пропорційному збільшенні усіх геометричних розмірів зі збереженням крайових умов напружений стан в області дефекту не змінюється. Це дозволяє віднести геометричні параметри дефекта до товщини труби.

4. Проведено аналіз концентрації напружень в трубопроводі у випадках, коли центр дефекту знаходиться на осі зварного шва а також в околі шва. При цьому встановлено що:

- у випадку, коли дефект розташований на зварному шві в зоні розтягальних колових та стискальних осьових напружень найбільшими є колові напруження в осьовому перерізі трубопроводу по діаметру дефекту. Їх максимальне значення досягається в центрі або на краю дефекту і в

залежності від його глибини може перевищувати в 1,3-2,1 рази рівень номінальних колових залишкових напружень на зовнішній поверхні труби;

- у випадку, коли дефект знаходиться поза зварним швом в зоні стискальних колових і осьових напружень, стискальні колові напруження, які виникають на поверхні дефекту перевищують номінальні залишкові в 1,8 раз, що зумовлює нижчий рівень сумарних напружень, ніж напруження викликані дією силових факторів.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ З ДЕФЕКТАМИ ТИПУ КОРОЗІЙНИХ ВИРАЗОК

Аналіз стану магістральних нафтогазопроводів вказує на тенденцію до збільшення запланованого терміну їх експлуатації. Часто проектний ресурс роботи МТ суттєво продовжується. В таких умовах експлуатації необхідні обґрунтовані експертні висновки щодо можливості продовження роботи трубопроводів, які ґрунтуються на розрахунково-експериментальній базі. В процесі експлуатації трубопроводів врахування дефектності дає змогу проаналізувати реальний стан труб, найбільш повно відобразити вплив усіх силових чинників.

Дефекти, які мають місце в матеріалі труб, можуть виникати як при спорудженні магістральних трубопроводів, так і в процесі експлуатації. Результати аналізу внутрішньотрубного діагностування [49] та зовнішнього обстеження [34] показують, що найчастіше втрати матеріалу трубопроводу спричинені дією корозійного середовища. При цьому найбільш небезпечною є не обширна корозія (дія якої прогнозується), а наявність локальних дефектів типу виразок-каверн [78]. Рівень виникаючих при цьому напружень в коловому та осьовому напрямках регламентується відповідними нормативними документами [25, 78]. Однак, в околі таких дефектів концентрація напруженого стану значно перевищує нормативне значення і є однією з причин виходу з ладу магістральних нафтогазопроводів.

5.1. Класифікація корозійних дефектів нафтогазопроводів

Дефекти, що виникають в тілі труби під час експлуатації нафтогазопроводів можна класифікувати таким чином:

1. Вогнища корозії різного типу:

- точкові;
- видовжені вздовж осі;
- видовжені по колу;
- видовжені довільної орієнтації;
- загальної форми;
- скопища корозійних дефектів.

2. Локальне спрацювання металу.

3. Гострокінцеві дефекти (тріщини), які поділяються на наскрізні та ненаскрізні, ненаскрізні в свою чергу можуть бути поверхневими чи внутрішніми [58].

На основі аналізу нормативних документів і практики експлуатації нафтогазопроводів найбільш поширені корозійні дефекти, що виникають в МТ, можна схематизувати наступним чином (табл. 5.1).

Дефекти, що виникають в тілі труби є концентраторами напружень, що зумовлює зменшення міцності трубопроводу і при досягненні критичних розмірів пошкодження може відбутись руйнування труби. Причому, небезпека руйнування залежить від низки факторів, а саме:

1) геометрії та місця розташування дефекту:

- розмірів та форми в плані;
- профілю дефекту по товщині труби;

Таблиця 5.1

Схеми дефектів в тілі труби магістральних нафтогазопроводів

№	Назва	Схема	Характерні параметри
1	Корозія на зовнішній стінці труби		$2a^*$ - довжина, c - ширина, b - глибина дефекту $2a^* < 3H$ $c < 3H$
2	Корозія на внутрішній стінці		$2a^*$ - довжина, c - ширина, b - глибина дефекту $2a^* < 3H$ $c < 3H$
3	Місцева корозія плямами [78]		$0,2H < b < 0,4H$ $2a^* > b$
4	Виразки-каверни [78]		$0,4H < b < 0,8H$
5	Поздовжня корозія на зовнішній стінці		$2a^*$ - довжина, c - ширина, b - глибина дефекту
6	Кільцева корозія на зовнішній стінці		$2a^*$ - довжина, c - ширина, b - глибина, φ - кутовий розмір
7	Непровар зварного шва		d^* - глибина непровару, φ - кут непровару.

- наявності гострих кутів, які створюють концентрацію напружень;
- орієнтації дефекта відносно осі труби;
- відстані від місця знаходження дефекта до зварних швів, відводів, згинів труби, інших елементів трубопроводу, які можуть стати концентраторами напружень;

2) напруженого стану труби в околі дефекту:

- рівня експлуатаційних напружень, зумовлених тиском газу;
- рівня залишкових (технологічних) напружень;
- рівня напружень, обумовлених зміщенням осі трубопроводу внаслідок зміщення опор, усадки ґрунту, тощо;

3) інтенсивності протікання корозійних процесів.

5.2. Визначення розмірів корозійних дефектів трубопроводів

Визначення розмірів корозійних дефектів проводять за допомогою товщинометрії, внутрішньотрубного обстеження чи спеціальних вимірювальних пристроїв.

5.2.1. Товщинометрія трубопроводів. Визначення корозійних дефектів, які розміщені з внутрішньої сторони трубопроводу проводили за допомогою ультразвукових товщиномірів типу “Булат-ІМС”, “УТ-93ІІ”.

При проведенні товщинометрії кількість точок вимірювань вздовж периметра і в осьовому напрямках вибирається в залежності від діаметра трубопроводу, терміну його експлуатації, категорійності нафтогазопроводу і розмірів корозійних пошкоджень. Результати обстежень оформляються у вигляді протоколів вимірювань.

5.2.2. Визначення корозійних дефектів трубопроводів за результатами внутрішньотрубної діагностики. Внутрішньотрубне визначення дефектів магістральних нафтогазопроводів є найбільш вірогідним і ефективним методом виявлення корозійних дефектів труб. Внутрішньотрубну дефектоскопію нафтогазотранспортної системи України проводять для МТ з діаметром труб від 700 до 1400 мм, використовуючи інтелектуальні поршні фірми “Rosen Engineering GmbH” чи “Pipetronix” [49, 100, 154].

Результати обстежень, отримані інтелектуальним поршнем, подаються у вигляді зменшення початкової товщини стінки труби вздовж твірної труби. Положення точки А (рис. 5.1.) визначається згідно отриманого роздруку розміром L_1 (відстань від камери пуску поршня до найближчого перед точкою А за ходом руху поршня кільцевого зварного шва); розміром L_2 (відстань від найближчого за ходом руху поршня кільцевого зварного шва до точки А), розміром L_3 (відстань від камери пуску поршнів або найближчого магнітного маркера до точки А), а також положенням точки А відносно циферблату годинника. Для оперативного визначення місцезнаходження магнітного маркера, розроблена і запатентована багатоканальна електромагнітна пошуково-вимірвальна система [6]. Знаючи точне місцезнаходження магнітного маркера визначаємо значення L_1 , L_2 , і подальші параметри корозійних дефектів знаходимо безпосередньо при обстеженні трубопроводу в шурфі.

Розміри втрат металу труби визначаються довжиною $2c$ і шириною a^* дефекту, що відповідно є проекціями на повздовжню вісь труби і її циліндричну поверхню, а також h_1 – залишковою товщиною стінки і b – найбільшою глибиною корозійного пошкодження у точці S . Враховуючи великі розміри труб, діаметри яких лежать в діапазоні від 700 до 1400 мм, просторова побудова і аналіз вищевказаних корозійних пошкоджень є трудомісткою процедурою.

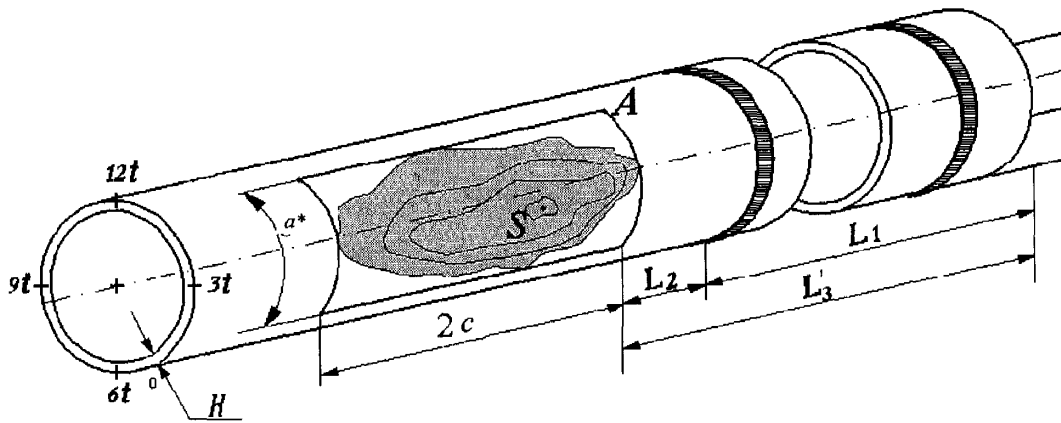


Рис. 5.1. Визначення дефектів металу труби при внутрішньотрубній діагностиці

Один з можливих варіантів корозійного дефекту та його схематизація показані на рис. 5.2.

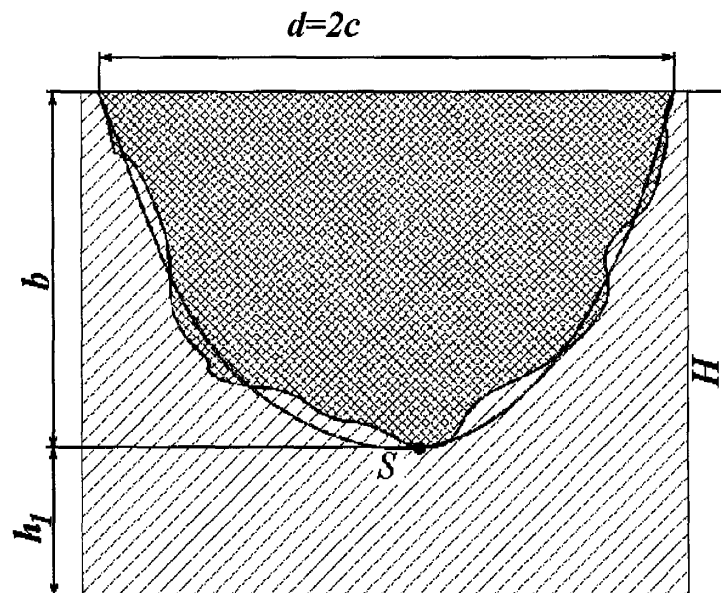


Рис. 5.2. Один з можливих варіантів корозійного дефекту та його схематизація

З метою зменшення трудозатрат, на основі об'єктно-орієнтованого принципу, розроблено програму, яка дозволяє автоматизувати побудову

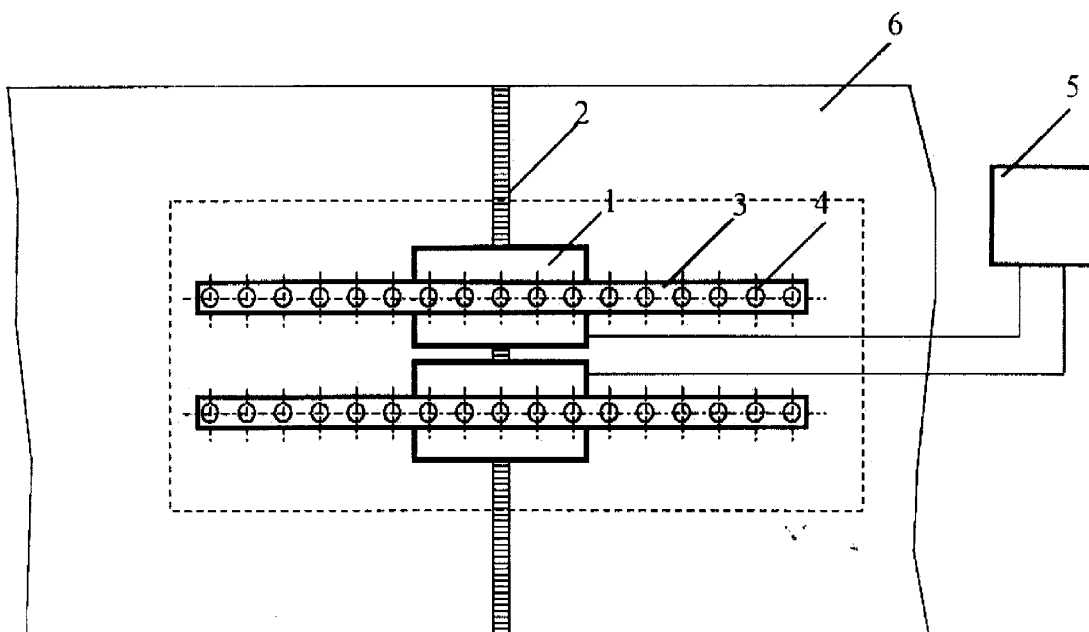
корозійного пошкодження в просторі і провести його схематизацію. Дана програма адаптується з програмою Defview, яка входить в математичне забезпечення з використанням методу скінченних елементів (МСЕ).

5.2.3. Визначення розмірів корозійних дефектів трубопроводів за допомогою спеціальних пристроїв. У даний час для визначення розмірів корозійних дефектів магістральних нафтогазопроводів застосовуються спеціальні пристрої з вимірювальною системою на базі мікрометрів чи індикаторних головок годинникового типу. Для підвищення точності обстеження корозійних пошкоджень, полегшення процедури вимірювання і її часткової автоматизації розроблений пристрій для контролю дефектів поверхні трубопроводів [36].

Запропонований пристрій для контролю дефектів поверхні (рис.5.3) складається зі сполучених між собою блоку керування 5 та блоку обстеження, встановленого з можливістю переміщення по поверхні і виконаного у вигляді пари кареток 1 із спільною ланцюговою передачею 2.

Кожна каретка 1 містить привід, узгоджувально-керуючий інтерфейс, одну і більше штанг 3 із закріпленими на ній оптичними віддалемірами 4. Блок керування містить схеми керування, обробки та збереження інформації, а також інтерфейси обміну з персональним комп'ютером та блоком обстеження.

Пристрій для контролю дефектів поверхні встановлюється на досліджувану поверхню трубопроводу 6 і працює наступним чином. Блок обстеження розміщують по середині досліджуваної поверхні трубопроводу 6. Ланцюгову передачу 2, що охоплює поверхню трубопроводу 6, закріплюють на її краях. Вмикають блок керування 5, який приводить в рух каретки 1 і вони на



5.3. Пристрій для контролю дефектів поверхні трубопроводу

маршеві швидкості розходяться до країв досліджуваної поверхні трубопроводу 6 та зупиняються. Після чого виконується робочий рух кареток 1 назустріч одна одній, при цьому оптичні віддалеміри 4, що розташовані на штангах 3, виконують вимірювання відстані до досліджуваної поверхні металу труби 6. При відхиленні визначених розмірів від номінальних, отримана інформація передається в блок керування 5, де виконується її обробка та збереження. Залежно від цього може коректуватися швидкість переміщення кареток 1, а також виконуватися один і більше робочих ходів. При скануванні криволінійної поверхні оператором, при необхідності, можуть вноситися поправки на розташування базової поверхні.

5.3. Аналіз корозійних дефектів магістральних газопроводів

Для отримання деяких статистичних даних про наявність корозійних дефектів було проведено дослідження магістрального газопроводу “Івацевичі-Долина III нитка” на ділянці від компресорної станції “Ковель” до компресорної станції “Сокаль”. Обстеження корозійних дефектів вказаного газопроводу проводили за допомогою внутрішньотрубної дефектоскопії. Крім цього проводили обстеження вище вказаного МГ на переходах через водні перешкоди та заболочені ділянки і місць корозійних пошкоджень у шурфі за допомогою ультразвукової товщинометрії і спеціальних пристроїв для контролю дефектів.

В результаті проведених комплексних обстежень корозійних дефектів МГ “Івацевичі-Долина III нитка” на ділянці КС “Ковель” - КС “Сокаль” виявлено 203 пошкодження, а саме:

- дефектів кільцевого зварного шва - 107 (що становить 52,7 %);
- поздовжнього зварного шва - 4 (2 %);
- механічних дефектів - 7 (3,5 %);
- корозійних дефектів - 85 (41,8 %).

Причому аналіз результатів внутрішньотрубної діагностики показує, що біля 23% корозійних пошкоджень можна привести до форми півеліпсоїда обертання.

5.4. Аналіз концентрації напружень в області дефекта в формі півеліпсоїда обертання

Для аналітичного дослідження концентрації напружень, зумовлених корозійними дефектами, розглянемо поверхневий дефект в формі півеліпсоїда

обертання діаметром $d=2c$ та глибиною b . Враховуючи представлення загального розв'язку задачі за двохосного розтягу залежністю (4.6) проаналізуємо напружений стан за одновісного розтягу вздовж осі Ox зусиллям σ_1 (рис.4.1).

Усі розрахунки проведено для значення коефіцієнта Пуассона $\mu=0.3$. Величина зовнішнього радіуса пластини r_2 приймалась рівною $30c$, щоб забезпечити точність 0.5 % моделювання нескінченної пластини скінченою. Розрахунок МСЕ здійснювався з точністю 0.5 %, що контролювалось послідовним згущенням сітки. Для правильного опису геометрії в зонах з малими радіусами кривини поверхні застосовувались спеціальні сітки зі згущенням.

Для розглядуваного дефекту максимальні розтягуючі напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ мають місце на поверхні дефекту в перерізі $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (рис.5.4), тобто стосовно трубопроводу максимальними є колові напруження в її осьовому перерізі в центрі заглибини. Надалі напруження $\sigma_{\varphi\varphi}$ у вказаному перерізі віднесені до основного напруження σ_1 , будемо позначати через $\bar{\sigma}_1$, тобто $\bar{\sigma}_1 = \frac{1}{\sigma_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r, z, \frac{\pi}{2})$.

Для прикладу, на рис.5.4 наведено розподіл цих напружень на поверхні дефекту вздовж радіуса при відносному радіусі дефекту $\bar{c} = c/(2h) = 2$. Криві 1-3 відповідають таким значенням глибини дефекту $\bar{b} = b/(2h) = 0.1, 0.5, 0.9$. Значна концентрація напружень спостерігається в області дефекта, далі вони поступово спадають до номінального напруження.

Наявність дефекту спричинює виникнення напружень σ_2 в перерізі $\varphi=0$. Їх відношення до основного напруження позначимо через $\bar{\sigma}_2$, тобто $\bar{\sigma}_2 = \frac{1}{\sigma_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r, z, 0)$. Розподіл напружень $\bar{\sigma}_2$ на поверхні дефекту вздовж радіуса

наведено для розглядуваного випадку на рис.5.5. Позначення аналогічні як і в попередньому прикладі.

Штриховою лінією на малюнках 5.4-5.5 показано розподіл напружень $\bar{\sigma}_1$ та $\bar{\sigma}_2$ у випадку наскрізного кругового отвору радіуса c (просторова задача Кірша).

Аналогічні графіки при відносному радіусі дефекту $\bar{c} = c/(2h) = 0.5$ зображені на рис.5.6-5.7.

Напруження $\bar{\sigma}_1$ на поверхні дефекта мають два локальних максимуми – в центрі дефекту та в зоні вертикальної ділянки його поверхні. Абсолютний максимум досягається не обов'язково в центрі. В таблиці 5.2 приводяться максимальні значення коефіцієнтів концентрації напружень $\alpha_1 = \max \bar{\sigma}_1$ для різних відносних глибин та радіусів дефекту. Якщо максимум напружень має місце не в центрі дефекту, то подаються також коефіцієнти концентрації напруження в центрі, які наведені у табл. 5.2 в знаменнику. Розподіл напружень $\bar{\sigma}_2$ на поверхні дефекту вздовж радіуса носить більш складний характер. Ці напруження для глибин $\bar{b} = b/(2h)$ дефектів менших, ніж $b/2h = 0.9$ є додатними в центрі дефекту, але ближче до його краю можуть мати значну від'ємну величину.

На основі подання (4.8) легко зробити висновок , що для дуже глибоких дефектів при двохосному розтязі величина напружень в центрі дефекту у порівнянні з одностороннім розтягом збільшується , а на краю - зменшується . Для дуже глибоких дефектів ($\bar{b} = b/(2h)$ порядку 0.9 і більше) додатковий розтяг у поперечному напрямку приводить до зменшення концентрації напружень у всій області (є повна аналогія з задачею Кірша).

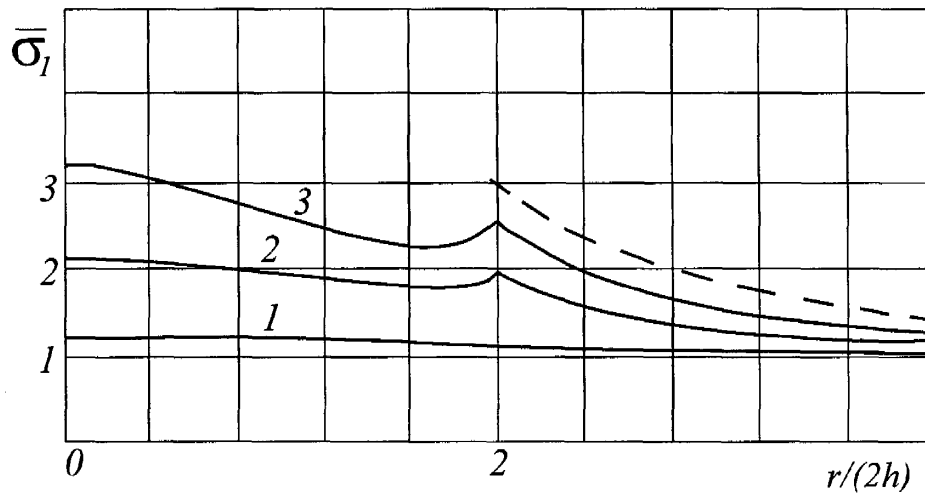


Рис.5.4. Розподіл нормованих напружень $\bar{\sigma} = \sigma_{\text{фр}}(r, z, \pi/2)/\sigma_1$ на поверхні заглибини вздовж радіуса для дефекту відносного радіуса $c/(2h) = 2$

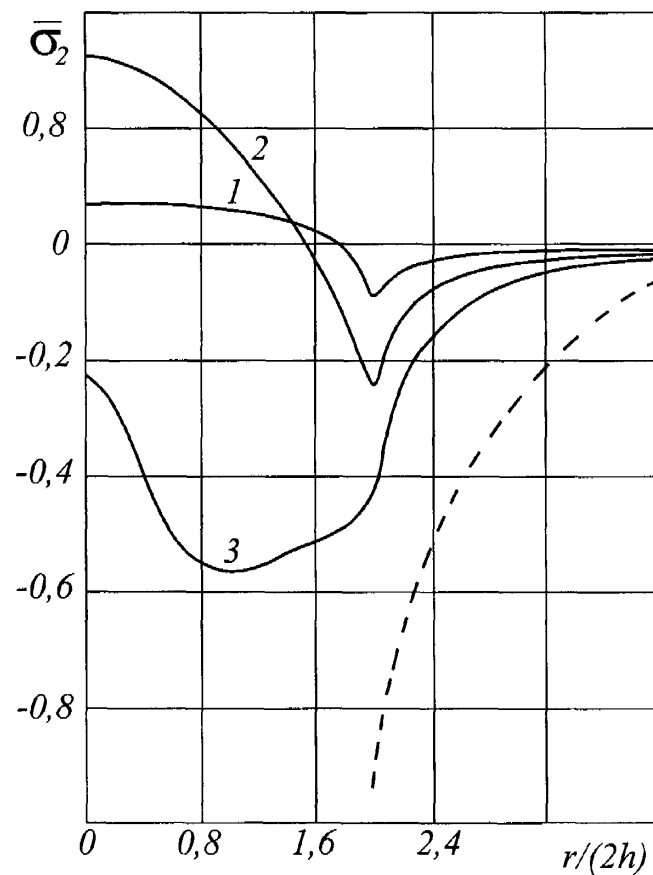


Рис. 5.5. Розподіл нормованих напружень $\bar{\sigma} = \sigma_{\text{фр}}(r, z, 0)/\sigma_1$ на поверхні заглибини вздовж радіуса для дефекту відносного радіуса $c/(2h) = 2$

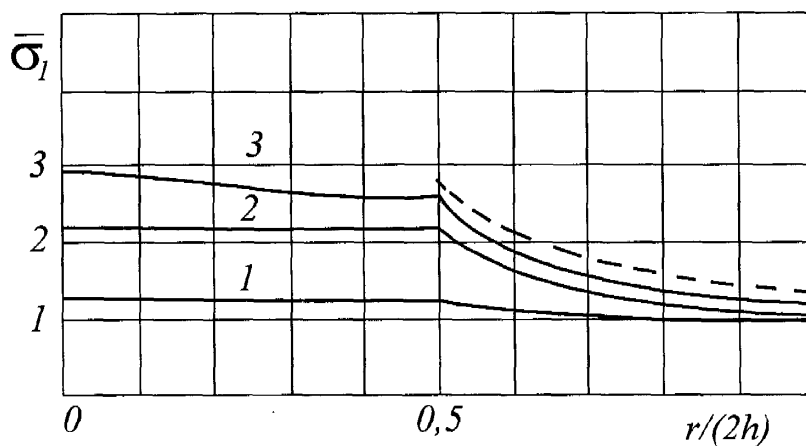


Рис.5.6. Розподіл нормованих напружень $\bar{\sigma} = \sigma_{\varphi\varphi}(r, z, \pi/2)/\sigma_1$ на поверхні заглибини вздовж радіуса для дефекту відносного радіуса $c/(2h) = 0,5$

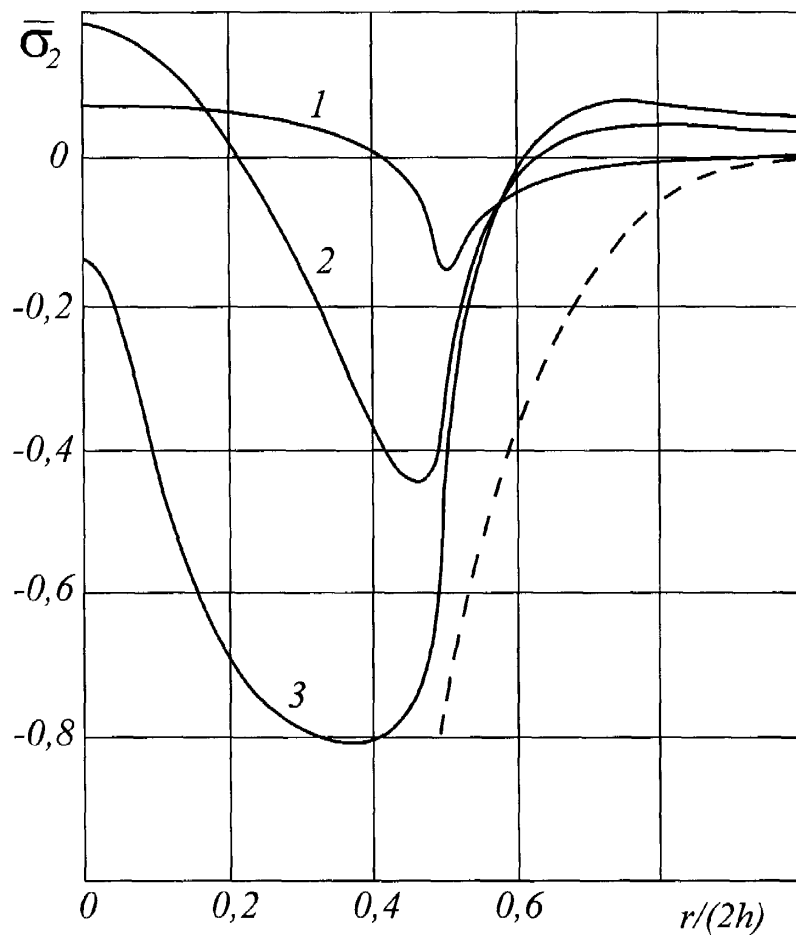


Рис. 5.7. Розподіл нормованих напружень $\bar{\sigma} = \sigma_{\varphi\varphi}(r, z, 0)/\sigma_1$ на поверхні заглибини вздовж радіуса для дефекту відносного радіуса $c/(2h) = 0,5$

Таблиця 5.2 ілюструється графічно на рис.5.8-5.9. На рис. 5.8 показана залежність величини α_1 від відносного радіуса дефекту $c/(2h)$ (криві 1-9 відповідають глибинам дефекту від 0,1 до 0,9) $b/(2h)$. На рис. 5.9 наведені графіки залежності цієї величини від глибини дефекту $b/(2h)$ при різних значеннях його радіуса. Криві 1-6 відповідають наступним значенням радіуса $c/(2h) = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$.

Аналіз таблиці 5.2 та наведених графіків дозволяє записати наступну апроксимуючу формулу для коефіцієнта концентрації напружень в кільцевому напрямку

$$\alpha_{\sigma_1} = 1 + 2 \left(\frac{b}{2h} \right)^{\left(\frac{c}{c+0,5h} \right)}, \quad \alpha_{\sigma_2} = 0,6 \frac{b}{h} \left(1 - \frac{b}{2h} \right). \quad (5.1)$$

В області відносних глибин та радіусів дефекту $c/(2h) \geq 0.2, 0 \leq b/(2h) \leq 0.8$ ця формула має відносну похибку меншу 8 % у порівнянні з табличними значеннями.

Напруження $\bar{\sigma}_2$ є значно меншими напружень $\bar{\sigma}_1$. При $c/(2h) < 0.5$ навіть при двохосному розтязі однаковим зусиллям їх внесок у сумарне максимальне напруження складає менше 10%. Тому для вказаних радіусів дефекту враховувати ці напруження недоцільно, тим більше, що в цьому випадку максимум $\bar{\sigma}_1$ має місце, як правило, не в центрі дефекту (див. табл. 5.2). При $c/(2h) \geq 0.5$ вклад напруження $\bar{\sigma}_2$ в сумарне максимальне напруження складає не більше 15%. При потребі врахування цих напружень, для їх розрахунку в центрі дефекту з запасом можна взяти формулу, яка достатньо точна для великих радіусів дефекту

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma_1} \sigma_1 + \alpha_{\sigma_2} \sigma_2, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2. \quad (5.2)$$

При цьому вираз для теоретичного коефіцієнта концентрації напружень $\alpha_{\sigma} = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{ном}}$ в даному випадку можна записати у вигляді

$$\alpha_{\sigma} = \alpha_{\sigma_1} + \mu \alpha_{\sigma_2}. \quad (5.3)$$

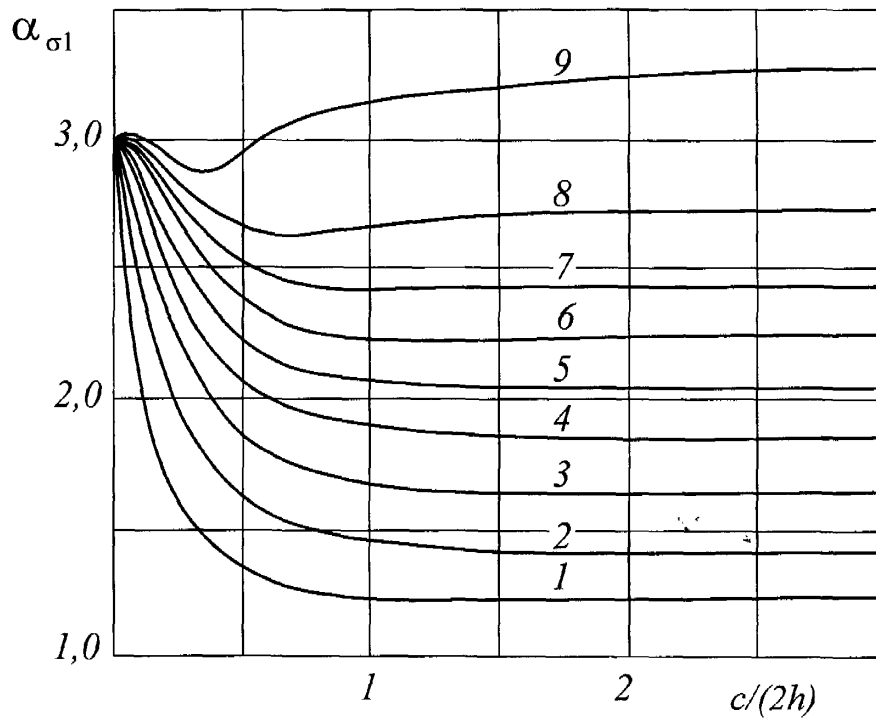


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнта концентрації напружень α_{σ_1} від радіуса дефекту $\bar{c} = c/(2h)$ для різних глибин $b/(2h)$

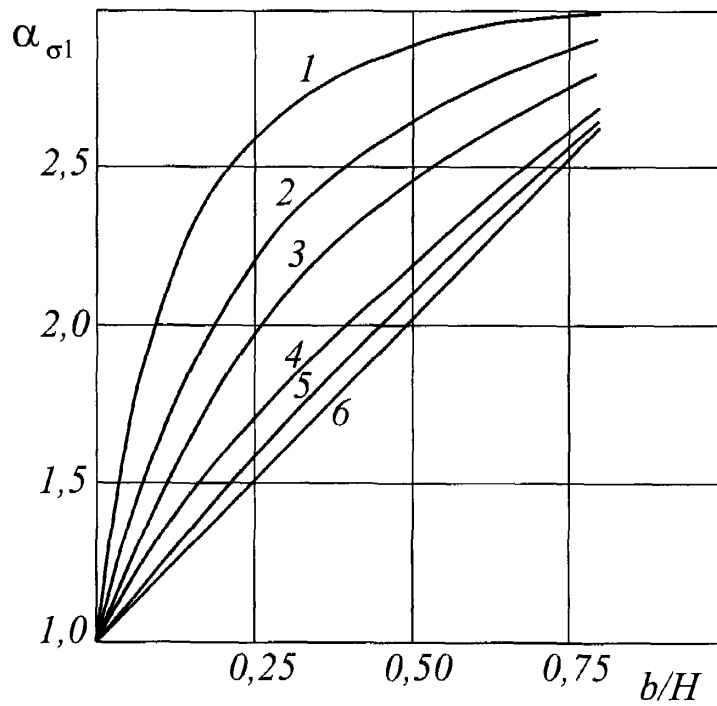


Рис. 5.9. Залежність коефіцієнта концентрації напружень α_{σ_1} від глибини дефекту

Максимальна відносна похибка цієї формули буде мати місце при $\sigma_1 = \sigma_2$ і у порівнянні з табличними значеннями складає менше 10% в області $c/(2h) \geq 0.5$, $0 \leq b/(2h) \leq 0.8$.

Зазначимо, що у вказаному діапазоні глибин $0 \leq b/(2h) \leq 0.8$, точності формул (5.1) та (5.2) зростають зі збільшенням відносного радіуса дефекту. Так при $c/(2h) \geq 2$ вони складають відповідно 4 % та 7 %.

На основі залежності (5.3) побудовані ізолінії теоретичного коефіцієнта концентрації напружень (рис. 5.10).

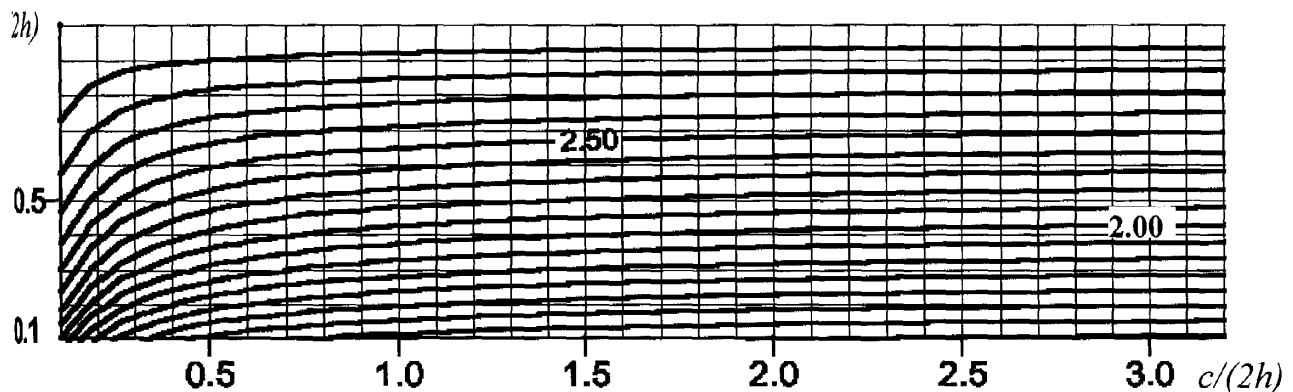


Рис.5.10. Ізолінії сумарного коефіцієнта концентрації напружень

За допомогою отриманих графічних залежностей можна оцінити максимальні напруження в центрі півеліптичного дефекту радіуса $c/(2h)$ та глибиною $b/(2h)$.

В роботі [34] наведено інженерні формули для обчислення коефіцієнта концентрації напружень в зоні гладких поверхневих дефектів трубопроводів. Узгодження результатів, отриманих за цими формулами, з даними таблиці 5.1 з точністю до 2-ох знаків має місце при $c/(2h) = 1$, $0 \leq b/(2h) \leq 0.7$. Однак в інших випадках спостерігається значне розходження результатів, особливо зі збільшенням глибини та радіуса дефекту. Для глибоких дефектів малого

радіуса вказані формули взагалі дають від'ємне значення коефіцієнта концентрації напружень.

Таблиця 5.2
Коефіцієнт концентрації напружень в коловому напрямку (α_{σ_1})

$c/(2h)$ $b/(2h)$	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
0.1	<u>2.03</u> 2.01	1.66	1.49	1.33	1.23	1.21	1.20	1.20
0.2	<u>2.50</u> 2.40	<u>2.04</u> 2.03	1.85	1.61	1.46	1.42	1.41	1.41
0.3	<u>2.72</u> 2.57	<u>2.35</u> 2.28	<u>2.11</u> 2.10	1.84	1.67	1.64	1.63	1.63
0.4	<u>2.84</u> 2.66	<u>2.54</u> 2.43	<u>2.32</u> 2.27	2.05	1.90	1.85	1.85	1.85
0.5	<u>2.91</u> 2.72	<u>2.67</u> 2.53	<u>2.48</u> 2.40	<u>2.19</u> 2.18	2.08	2.05	2.05	2.05
0.6	<u>2.95</u> 2.80	<u>2.77</u> 2.60	<u>2.61</u> 2.50	<u>2.37</u> 2.33	2.25	2.24	2.25	2.25
0.7	<u>2.99</u> 2.79	<u>2.85</u> 2.67	<u>2.71</u> 2.59	<u>2.51</u> 2.48	2.43	2.44	2.44	2.44
0.8	<u>3.00</u> 2.94	<u>2.90</u> 2.73	<u>2.79</u> 2.68	2.64	2.67	2.70	2.71	2.72
0.9	<u>3.04</u> 2.86	<u>2.94</u> 2.83	2.87	2.98	3.14	3.22	3.28	3.29

5.5. Експериментальне визначення напружень в околі дефектів трубопроводу

Перевірку адекватності розроблених математичних моделей та отриманих інженерних формул для визначення концентрації напружень в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень трубопроводів проводили шляхом порівняння результатів теоретичних досліджень з результатами експериментальних даних. З цією метою розроблено і виготовлено експериментальну установку, яка дає можливість в лабораторних умовах якісно моделювати напружено-деформований стан (НДС) в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень нафтогазопроводів.

5.5.1. Установка для моделювання НДС в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень. Установка для моделювання НДС в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень нафтогазопроводів (рис.5.11, рис.5.12) складається з резервуара 1, який виготовлений з двох труб зі сталі 17Г1С (1020x10 мм), з'єднаних між собою стиковим зварним швом і заварений в торцях сферичними днищами.

Для створення надлишкового тиску використовується одноступенева схема заповнення резервуара водою за допомогою насоса 2. Робоча речовина (вода) подається з накопичувального бачка 3 насосом 2 у середину резервуара 1. Контроль за величиною тиску здійснюється за допомогою манометра 4.

Зменшення тиску в середині резервуара досягається шляхом зворотнього перекидання води у накопичувальний бачок. Експериментальна установка дає можливість досягати максимальних внутрішніх тисків в резервуарі до 10 МПа.

Установка застосовувалася для створення напруженого стану при експериментальному визначенні концентрації напружень в околі зімітованих дефектів трубопроводу та тарування приладів магнітопружного методу.

Визначення напружень виконувалося методом електротензометрії [150]. Застосовувалися тензодавачі з базою 5 мм та електричним опором 90 Ом (марка КФ 5Ш-1-100-В-12). Давачі приклеювалися за допомогою клею “Ціакрин”, “БФ-2” до зовнішньої поверхні корпусу резервуара вздовж та поперек її осі.

5.5.2. Комп’ютерна система реєстрації даних. Для досягнення відповідної точності вимірювань в даній роботі обробка їх результатів виконувалася з використанням комп’ютера, що зумовило необхідність застосувати сучасний вимірювальний пристрій сумісний з ПК. Для цього був використаний апаратно-програмний лабораторний комплекс Uni Lab (розробка Національного університету “Львівська політехніка”). Принциповою перевагою застосування цього комплексу є можливість синтезу вимірюваних величин напружень. Двосторонній зв’язок з комп’ютером реалізується через паралельний LPT-порт комп’ютера. Формування алгоритму вимірювання і керування цим процесом та візуалізація його результатів забезпечується програмним забезпеченням UL-soft. Алгоритм вимірювання визначається кількістю каналів вимірюваних напружень, коефіцієнтом підсилення диференційного входу підсилювача, кількістю вимірювань та часовою затримкою між вимірюваннями.

Результатами вимірювань можуть бути як безпосередньо виміряні значення напруг, так і функціональні залежності синтезованих величин, які зв’язують вхідні значення та вихідні напруження. Синтезовані значення можуть виводитися на екран комп’ютера як в числовій, так і в графічній формі.

В процесі експериментальних робіт виникла необхідність забезпечити реєстрацію інформації з 16-ти і більше каналів, здійснити візуалізацію отриманих даних на екрані монітора і забезпечити їх збереження у вигляді масивів з подальшим аналізом отриманих результатів.

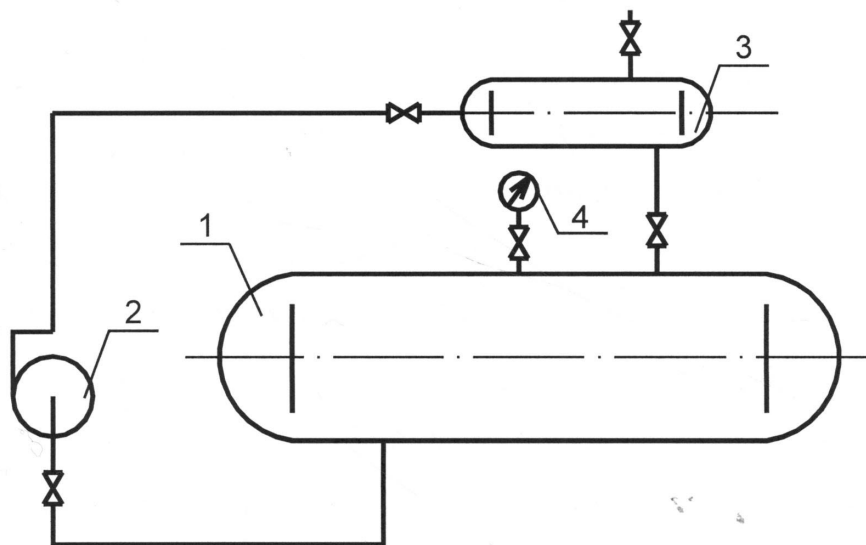


Рис.5.11. Принципова схема дослідного стенду для імітації роботи реального трубопроводу: 1 – резервуар, 2 – насос, 3 – розширювальний бачок, 4 – манометр

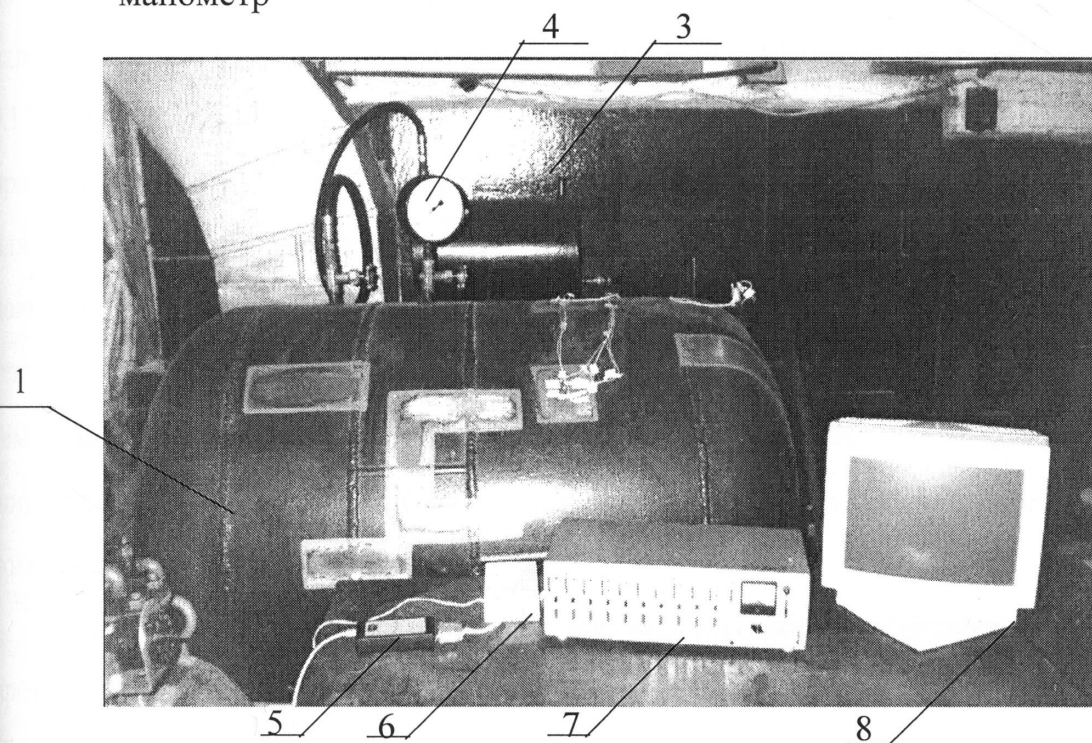


Рис. 5.12. Установка для моделювання НДС в околі зварних з'єднань та корозійних пошкоджень нафтогазопроводів: 1 – резервуар, 3 – розширювальний бачок, 4 – манометр, 5 – система Uni Lab, 6 – узгоджувальний пристрій Commutator_V_1, 7 – тензостанція, 8 – ПК

Для досягнення цієї мети був розроблений пристрій Commutator_v.1, який узгоджував вхідні сигнали від датчиків (тензорезистори, термопари тощо) з комплексом Uni-Lab. Пристрій Commutator_v.1. має автономне живлення. Комутатор дозволяє зчитувати одночасно інформацію максимально з 16 каналів та передавати дані на диференційний вхід підсилювача комплексу Uni-Lab. Це дає змогу додатково до тензометрування виконувати операції з вимірювання температури, зміщень певних елементів конструкцій трубопроводу, зафіксованих через фотодіоди або інші датчики.

Принципова електрична схема розробленого пристрою Commutator_v.1. представлена в додатку Б.

5.5.3. Методика визначення напруженого стану нафтогазопроводів за допомогою комплексу Uni Lab - Commutator_v.1. Методика визначення напруженого стану МТ передбачає наявність досліджуваного об'єкту 7 (рис. 5.13) із наклеєними тензодавачами 6, тензостанції 5 із блоком живлення 4, пристрою Commutator 3, комплексу Uni Lab 2 та ПК 1. Вимірювальний тракт для її реалізації представлений на рис.5.13. Даний вимірювальний тракт дозволяє визначати статичні і динамічні деформації за допомогою тензорезисторів, які з'єднані за півмостовою схемою. Умови експлуатації: температура навколишнього повітря від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; відносна вологість повітря від 30% до 80% . Для компенсації температурних змін встановлюється компенсаційний тензодавач.

Перед початком вимірювання на розвантаженій тарувальній установці проводиться балансування датчиків за допомогою грубого та тонкого регулювання. Після цього завантажуються комп'ютер та запускається керуюча програма комплексу Uni Lab. При попередніх випробуваннях визначається тарувальний коефіцієнт за формулою

$$c^* = \frac{\sigma}{\Delta U_{dif}}, \quad (5.4)$$

де $\Delta U_{dif} = U_2 - U_1$, U_1 – напруга при розвантаженому трубопроводі, U_2 – напруга при навантаженому трубопроводі.

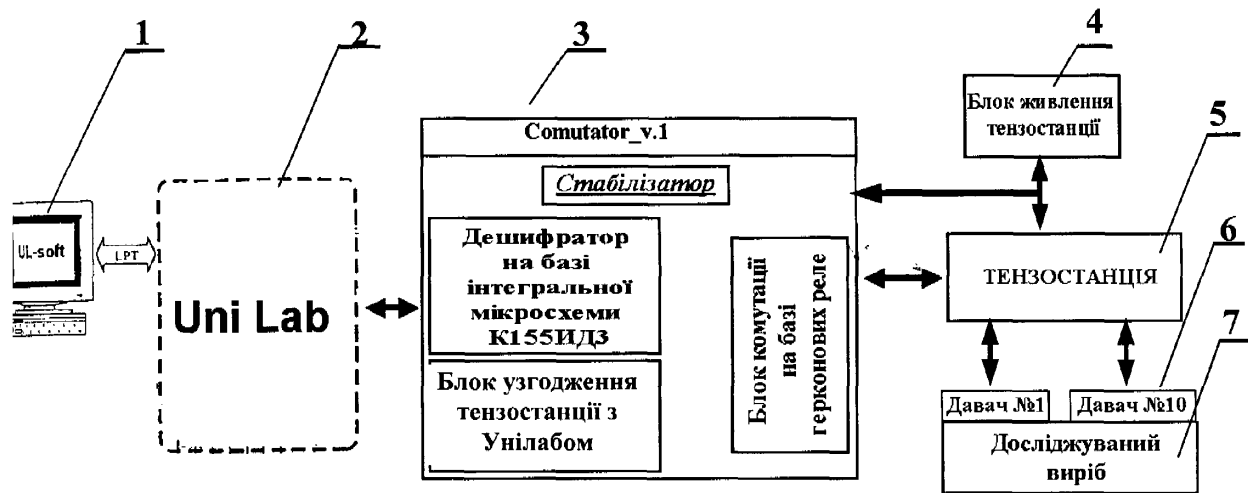


Рис.5.13. Вимірювальний тракт для визначення напружень в трубопроводах: 1 – ПК, 2 – комплекс Uni Lab, 3 – пристрій Commutator_v.1., 4 – блок живлення тензостанції, 5 – тензостанція, 6 – тензодавачі, 7 – досліджуваний об'єкт

Опір тензорезисторів, які застосовуються від 50 до 500 Ом. Максимальне число каналів вимірювання – 16. Діапазон реєструючих частот від 0 до 700 Гц.

При роботі з кабелями довжиною більше 10 м необхідно до показів приладу вводити корегуючий коефіцієнт, який залежить від величини активного опору з'єднувальних ліній або необхідно проводити тарування тензорезисторів, разом з комплектом з'єднувальних кабелів. Для проведення тарування виготовлено балку рівного опору, на яку наклеюються такі самі давачі, як і на трубопроводі.

За отриманими залежностями в часі визначаємо амплітудний та частотний спектр вимірюваних параметрів. Результати вимірювань

відображаються у вигляді графіка $U_{dif}=f(N)$ вкладка **Graph** або у вигляді таблиці - вкладка **Data**.

5.5.4. Результати тензометрування на дослідній установці. На поверхні експериментальної установки (рис. 5.12) було змодельовано дефекти, розміри яких задавалися згідно з результатами діагностування зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби магістрального газопроводу “Івацевичі-Долина Шнитка” на ділянці від КС “Ковель” до КС “Сокаль”.

Для отримання найбільш повної інформації про розподіл напружень навколо з імітованого дефекту, при перевірці розробленої математичної моделі, була вибрана наступна схема проведення досліджень. Давачі розташувалися в напрямку дії головних максимальних напружень. При цьому визначальним числом необхідної кількості давачів були розмір давача та область збурення напруженого стану в околі дефекту, що орієнтовно складає 2 діаметри дефекту. Оскільки напружений стан є симетричний відносно центру дефекту, то оптимальні кількість та розташування давачів такі: для дефекту діаметром 6 мм - 4 давачі; 10 мм – 8 давачів; а для діаметру 12 мм – 10 давачів. Схема розташування тензодавачів навколо дефекту показана на рис.5.14.

Вимірювання напружень за допомогою тензодавачів проводили в наступній послідовності: вибір типу тензодавача, перевірка якості тензодавача та їх селекція, розмітка місця наклеювання, підготовка поверхні (очищення і знежирення), вибір клею (БФ-2 чи “Ціакрин”), наклеювання тензодавачів, перевірка якості наклеювання, захист тензодавачів від попадання вологи, гарування тензодавачів та процес вимірювання напружень [150].

Визначення напружень проводилося при внутрішньому тиску в резервуарі експериментальної установки $p=4$ МПа. Результати досліджень експериментів, а саме середнє значення напружень при $p = 4$ МПа в околі дефекту з діаметром $d_c=12, 10$ і 6 мм наведені в табл. 5.3 – 5.5.

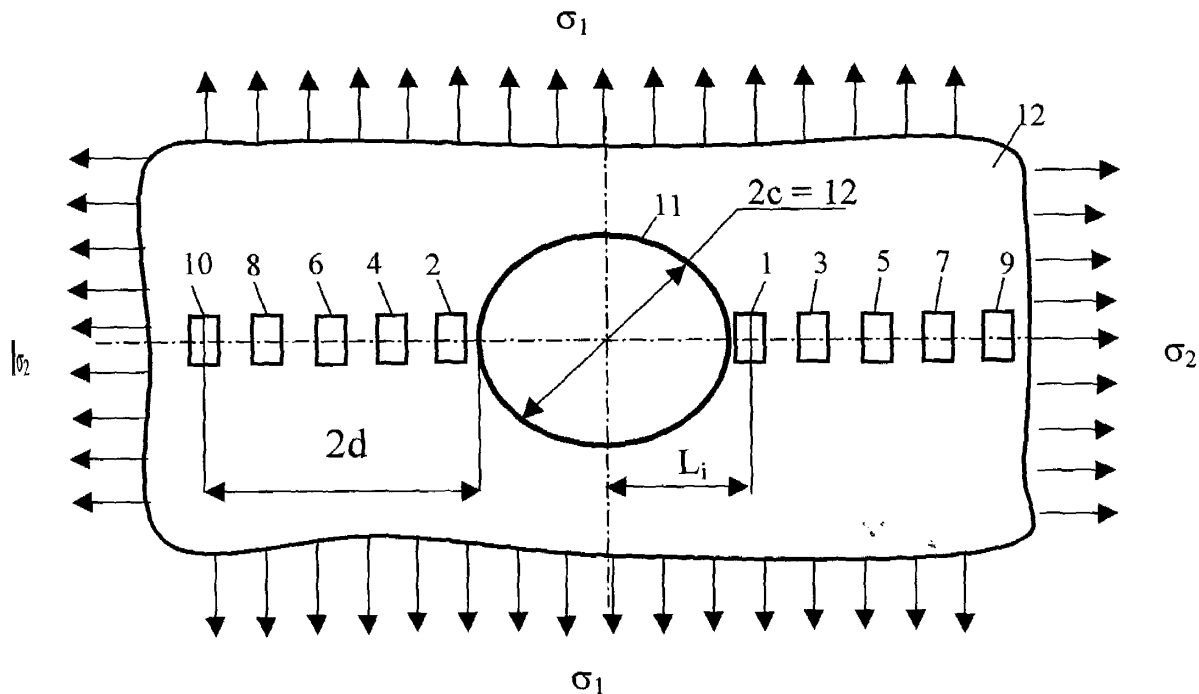


Рис. 5.14. Схема розташування тензодавачів: 1-10 – тензодавачі; 11 – дефект; 12 – резервуар; σ_1 , σ_2 – колові та осьові нормальні напруження; $d=2c$ – діаметр дефекту; L_i – відстань між центрами тензодавача та дефекту

На основі результату експериментальних вимірювань величин колових напружень (табл. 5.3 – 5.5) проведено статистичну обробку результатів досліджень відповідно до рекомендацій, які наведені в літературі [83, 142]. Після кожної серії замірів проводилася перевірка припущення прийнятої моделі нормальності розподілу випадкових величин з допомогою W -критерію. При цьому порівняння отриманого значення з процентями похибки, які наведені в роботі [83], показало, що ймовірність отримання обчисленого критерію близька до табличних значень проценталь при кількості вимірювань 4. Поле допуску для середньої величини показів тензодавачів вибиралося при довірчій ймовірності 0.95.

Таблиця 5.3
 Результати статистичної обробки вимірювань напружень в околі дефекту
 з розмірами $c=6$ мм і $b=4,5$ мм

№ да- ча	Відстань між центрами давача і дефекту, мм	Упорядковані значення виміряних величин напружень X_i , МПа				Емпіричне середнє значення напружень, \bar{X} (математич не очікування) \bar{X}	Вибір- кова диспер- сія S^2	Довірч. інтервал, МПа $I_{\text{дов}}=2\Delta \bar{X}$	Відносна похибка вимірю- вань, % $\delta, \%$
		X_1	X_2	X_3	X_4				
1	8,5	313.0	317.0	319.0	323.0	318.0	17.3	13.2	4.2
2	11,0	270.0	273.0	276.0	277.0	274.0	10.0	10.1	3.7
3	13,5	255.0	258.0	263.0	264.0	260.0	18.0	13.5	5.2
4	16	239.0	240.0	240.0	242.0	240.3	1.6	4.0	1.7
5	18,5	235.0	238.0	240.0	243.0	239.0	11.3	10.7	4.5
6	21	227.0	231.0	233.0	233.0	231.0	8.0	9.0	3.9
7	23,5	227.0	231.0	235.0	239.0	233.0	26.7	16.4	7.0
8	26	218.0	224.0	225.0	228.0	223.8	17.6	13.3	6.0
9	28,5	216.0	218.0	224.0	226.0	221.0	22.7	15.1	6.9
10	31	210.0	215.0	217.0	222.0	216.0	24.7	15.8	7.3

В усіх дослідженнях кількість повторних вимірювань (n) складала 4. Відхилення визначених величин напружень знаходилося в межах 8%. Для проведення обчислень розроблена програма, яка реалізована за допомогою математичного редактора Mathcad (див. додаток В).

Таблиця 5.4
Результати статистичної обробки вимірювань напружень в околі дефекту з розмірами $c=5$ мм і $b=5,1$ мм

№ дава-ча	Відстань між центрами давача і дефекту, мм	Упорядковані значення виміряних величин напружень X_i , МПа				Емпіричне середнє значення напружень, \bar{X} (математичне очікування)	Вибіркова дисперсія S^2	Довірч. інтервал, МПа $I_{\text{дов}}=2\Delta\bar{X}$	Відносна похибка вимірювань, % $\delta, \%$
		X_1	X_2	X_3	X_4				
		\bar{X}					S^2		
1	7,5	308.0	313.0	314.0	317.0	313.0	14.0	11.9	3.8
2	10,0	268.0	274.0	275.0	279.0	274.0	20.7	14.5	5.3
3	12,5	237.0	240.0	242.0	245.0	241.0	11.3	10.7	4.4
4	15,0	244.0	246.0	247.0	254.0	247.8	18.9	13.8	5.6
5	17,5	224.0	224.0	226.0	231.0	226.3	10.9	10.5	4.6
6	20,0	228.0	230.0	234.0	236.0	232.0	13.3	11.6	5.0
7	22,5	204.0	205.0	208.0	211.0	207.0	10.0	10.1	4.9
8	25,0	223.0	225.0	228.0	232.0	227.0	15.3	12.5	5.5

Таблиця 5.5
Результати статистичної обробки вимірювань напружень в околі дефекту з розмірами $c=3$ мм і $b=5,2$ мм

№ дава-ча	Відстань між центрами давача і дефекту, мм	Упорядковані значення виміряних величин напружень X_i , МПа				Емпіричне середнє значення напружень, \bar{X} (математичне очікування)	Вибіркова дисперсія S^2	Довірч. інтервал, МПа $I_{\text{дов}}=2\Delta\bar{X}$	Відносна похибка вимірювань, % $\delta, \%$
		X_1	X_2	X_3	X_4				
		\bar{X}					S^2		
1	5,5	275.0	278.0	284.0	287.0	281.0	30.0	17.4	6.2
2	8,0	246.0	252.0	255.0	259.0	253.0	30.0	17.4	6.9
3	10,5	236.0	239.0	245.0	248.0	242.0	30.0	17.4	7.2
4	13,0	225.0	228.0	235.0	237.0	231.3	32.3	18.1	7.8

Результати проведених експериментальних досліджень та результати отримані на основі застосування розробленої математичної моделі представлено на рис. 5.15 – 5.17. Тут розподіл за товщиною діючих в кільцевому напрямку напружень у вигляді ізоліній отримано із застосуванням розробленого програмного забезпечення. Розташування тензодавачів показано у вигляді грубих рисок, над якими вказані значення експериментально визначених напружень. Наприклад, 221 – давач, який зафіксував напруження величиною 221 МПа.

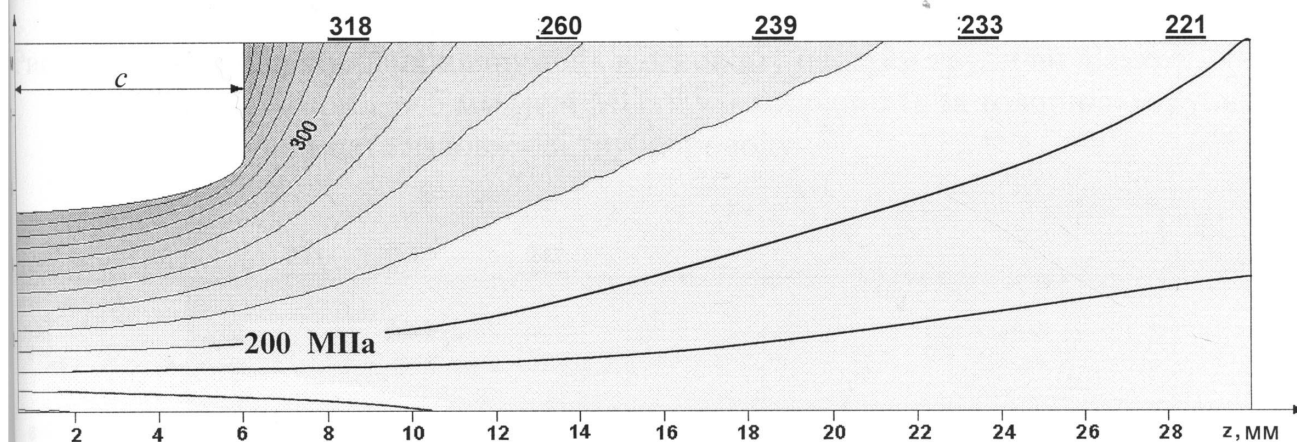


Рис. 5.15. Розподіл колдових напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекту при $c = 6$ мм ($p = 4$ МПа): u – координата за товщиною труби, z – координата вздовж осі трубопроводу

Аналіз результатів, приведених на рис 5.15 – 5.17, показує добре узгодження розрахункових та експериментальних даних (різниця між ними не перевищує 10%), що дало змогу провести чисельний аналіз концентрації напружень в околі дефекту на поверхні труби і підтвердити правомірність застосування запропонованих інженерних формул (5.1 – 5.2).

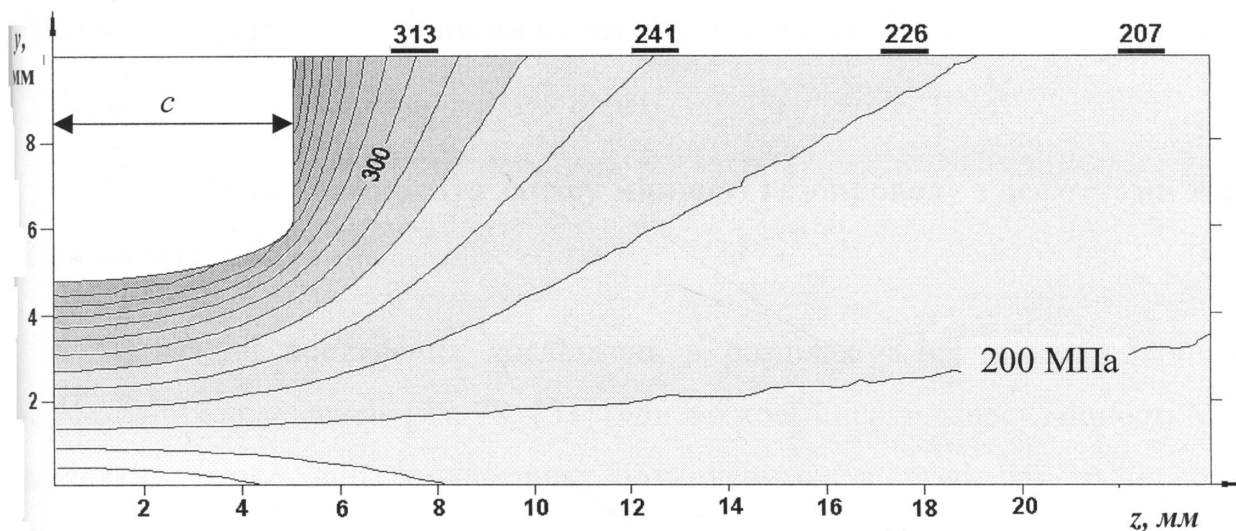


Рис. 5.16. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекту при $c = 5$ мм ($p=4$ МПа): y – координата за товщиною труби, z – координата вздовж осі трубопроводу

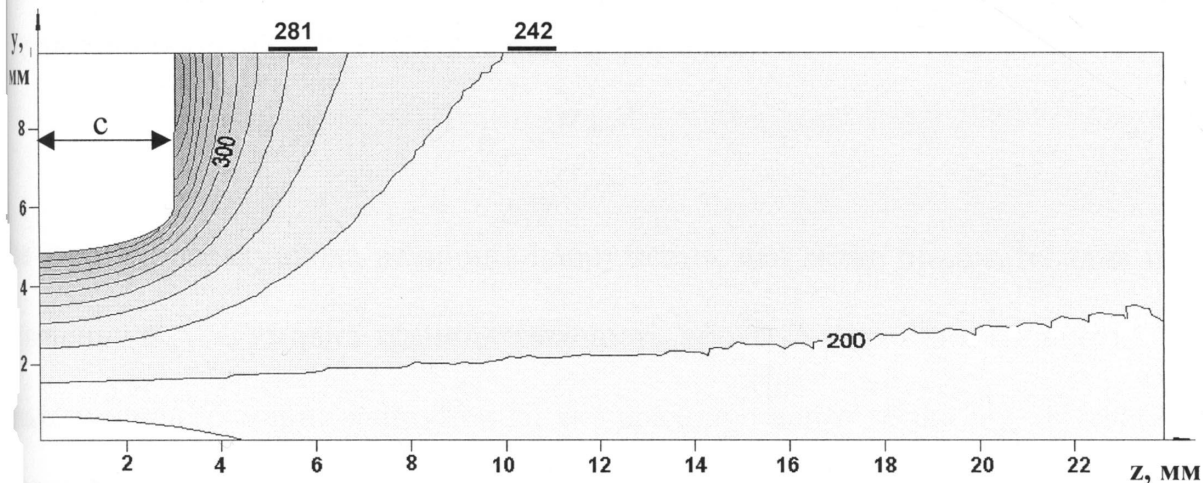


Рис. 5.17. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекту при $c = 3$ мм ($p=4$ МПа): y – координата за товщиною труби, z – координата вздовж осі трубопроводу

Наявність дефектів в матеріалі труби (магістрального трубопроводу) приводить до значної концентрації напружень. В даному випадку значення коефіцієнтів концентрації напружень для виразок-каверн складає 1,3–1,7.

Встановлено, що максимальними є колові (стосовно труби) напруження на краю дефекту.

5.6. Оцінка коефіцієнта запасу міцності газопроводу з дефектами типу виразок-каверн

На основі проведених досліджень в розділах 4 і 5 з використанням нормативних документів [25, 78, 133] оцінено коефіцієнти запасу міцності МГ з дефектами типу виразки-каверни, розміщеними в зоні дії залишкових напружень і поза цією зоною.

Для визначення коефіцієнта запасу міцності трубопроводу n_p згідно додатку Г до “Методики оцінки технічного стану металу діючого газопроводу з тривалим строком експлуатації (більше 10 років) та залишкового ресурсу його безпечної роботи” [78] можна записати формулу

$$n_p = \frac{\sigma_{роз}}{\sigma_{роб}}, \quad (5.5)$$

де $\sigma_{роз}$ – розрахункова величина напруження, яка може приймати одне із двох значень: $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, або σ_B – границя міцності; $\sigma_{роб}$ – максимальне сумарне напруження, яке враховує напруження від дії тиску σ^p і залишкові технологічні напруження $\sigma^{зал}$.

Таким чином залежність (5.5) можна подати у вигляді

$$n_p = \frac{\sigma_{роз}}{\sigma^p + \sigma^{зал}}. \quad (5.6)$$

Згідно з виразом (5.6) визначали коефіцієнти запасу МГ “Івацевичі-Долина – 3-тя нитка” (220 км) для ділянки Волинського ЛВУМГ. Усереднене за розміром локальної моделі значення залишкових напружень, що виникають в

газопроводі на одному з перерізів даної ділянки згідно результатів отриманих в п. 4.5.2. занесені в табл. 5.6. Механічні характеристики сталі 17Г1С згідно сертифікату: $\sigma_{0,2} = 410$ МПа, $\sigma_B = 550$ МПа; тиск в газопроводі $p = 4,5$ МПа. Розраховані значення коефіцієнтів запасу трубопроводу проведені з врахуванням і без врахування залишкових напружень приведені в таблиці 5.6. В чисельнику вказаний коефіцієнт запасу газопроводу, обчислений за умовною границею текучості $\sigma_{0,2}$, а в знаменнику – згідно границі міцності σ_B .

Таблиця 5.6

Коефіцієнт запасу міцності МГ з врахуванням і без врахування залишкових напружень в трубопроводі

№ Зони згідно п. 4.5.2.	Розміщення осі дефекта відносно осі зварного шва z, мм	Значення залишкових напружень $\sigma^{зал}$, МПа	Коефіцієнт запасу міцності МГ без врахування залишкових напружень n_p	Коефіцієнт запасу міцності МГ з врахуванням залишкових напружень n_p^*
1	на осі зварного шва, $z = 0$	$\sigma^{зал} = 160$	$\frac{1,79}{2,40}$	$\frac{1,05}{1,41}$
2	$20 < z \leq 70$	$-42 < \sigma^{зал} \leq -24$	$\frac{1,79}{2,40}$	$\frac{2,00 < n_p^* \leq 2,19}{2,68 < n_p^* \leq 2,94}$
3	$70 < z \leq 120$	$-24 < \sigma^{зал} \leq -8$	$\frac{1,79}{2,40}$	$\frac{1,86 < n_p^* \leq 2,00}{2,50 < n_p^* \leq 2,68}$

Таким чином, зміна величини коефіцієнта запасу газопроводу при врахуванні залишкових напружень зменшується на 40%, коли дефект розміщений на осі зварного шва (зона 1).

Коефіцієнт запасу розглянутого газопроводу за умовною границею текучості для дефекту розміщеного на осі зварного шва (ділянка 1) дорівнює 1,05 що недопустимо для подальшої експлуатації МГ, а за границею тимчасового опору – дорівнює 1,41. Такий дефект за останнім критерієм також необхідно вважати небезпечним, бо при проведенні випробувань під підвищеним тиском можливе руйнування трубопроводу по цьому дефекту.

Для дефектів, розміщених в другій і третій зонах за рахунок виникнення від'ємних в них стискальних напружень коефіцієнт запасу міцності трубопроводу, в порівнянні з його значенням для аналогічного дефекту поза зоною дії залишкових напружень збільшується відповідно на 10-18% і 4-10%.

Таким чином, при оцінці технічного стану МГ враховування залишкових технологічних напружень обумовлює зменшення коефіцієнта запасу його міцності у випадку, коли центр корозійного дефекту знаходиться на осі шва і збільшення коефіцієнта запасу міцності у випадку, коли дефект знаходиться біля шва в зоні стискальних залишкових напружень

Висновки до розділу 5

1. Розроблено та виготовлено дослідницьке устаткування, яке забезпечує умови для перевірки напруженого стану труб, їх зварних стиків та в околі корозійних дефектів типу виразок-каверн з допомогою експериментальних методів.

2. На основі проведеного в роботі числового аналізу встановлено, що найбільшими є колові розтягальні напруження в осьовому перерізі труби по діаметру дефекту. Максимум цих напружень досягається на поверхні дефекту в центрі або на його краю.

3. Для оцінки максимальних напружень, зумовлених наявністю дефекту, записана узагальнена формула у формі лінійної функції від основних колового та осьового напружень у трубопроводі. Для визначення коефіцієнтів концентрації напружень отримані формули для інженерних розрахунків, відносна похибка яких знаходиться в межах 8 - 10 %.

4. На дослідній установці виконано експериментальну перевірку розробленої математичної моделі та отримано задовільне для інженерних розрахунків узгодження між експериментальними та розрахунковими даними. Відносна похибка вимірювань не перевищує 10 %.

5. Розроблено пристрій для контролю параметрів зовнішніх корозійних дефектів магістральних нафтогазопроводів.

6. Встановлено, що врахування дії залишкових технологічних напружень обумовлює зменшення коефіцієнта запасу міцності трубопроводу у випадку, коли центр корозійного дефекту знаходиться на осі шва і збільшення цього коефіцієнта у випадку, коли дефект знаходиться біля шва в зоні стискальних залишкових напружень.

7. Для ділянки МГ (220 км) “Івацевичі-Долина 3-тя нитка” (1220x12 мм і розміром дефекту $c/2h=0,4$ та $b/2h=0,4$) отримано, що коефіцієнт запасу міцності в зоні розтягальних залишкових напружень, порівняно з зоною без технологічних напружень, зменшується не більше, ніж на 40%, а в зоні стискальних – може збільшуватись в межах 10 – 18%, якщо за розрахункове напруження прийнято умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$ і 4 – 10%, коли за розрахункове напруження прийнято границю міцності σ_B .

ВИСНОВКИ

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

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

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

– колові залишкові напруження на внутрішній і зовнішній поверхнях газопроводу в зоні завширшки двох товщин від осі шва є розтягальні і досягають найбільшого значення на внутрішній поверхні труби на осі шва; з

зіддаленням від осі шва в межах десяти товщин стінки труби вони переходять у стискальні і менші за розтягальні;

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

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

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

- на зварному шві в зоні розтягальних колових та стискальних осьових залишкових напружень, найбільшими є колові напруження в поздовжньому перерізі трубопроводу по діаметру дефекта; максимальне значення вони досягають у центрі або на краю дефекту і, залежно від його глибини, можуть перевищувати в 1,3-2,1 рази номінальні колові залишкові напруження на зовнішній поверхні трубопроводу;

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

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

5. На розробленій дослідній установці експериментально перевірено запропоновану математичну модель, яка виявилася задовільною (відносна похибка менша 10%) для інженерних розрахунків концентрації напружень у

трубах з дефектами. Розроблено пристрій для контролю параметрів зовнішніх корозійних дефектів нафтогазопроводів.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость: Справ. Пособие. – М.: Недра, 1982. – 343 с.
2. Александров А.В., Яковлев Е.И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. – М.: Недра, 1974. – 443 с.
3. Бабин Л.А., Быков Л.И., Волохов В.Я. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
4. Бакаев В.В. Технологии и оборудование компании «Розен» для диагностики объектов нефтегазовой отрасли // Материалы 3 научн. – техн. конф. “Надёжность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта”. – Минск. – 2000. – С. 120 – 123.
5. Банахевич Ю.В. Визначення концентрації напружень в околі корозійних дефектів труб при дії внутрішнього тиску // Вісник № 456 Національного університету "Львівська політехніка" "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів". – 2002. – № 456. – С. 3 – 8.
6. Деклараційний патент № 55043А. Україна, МПК⁷ G01R19/00, G01R33/02, G01V3/10. Багатоканальна електромагнітна пошуково-вимірювальна система / Ю.В. Банахевич, П.П. Драбич, О.П. Драбич, А.О. Кичма та ін. – № 2002065033; Заявл. 18.06.02; Опубл. 17.03.03. Бюл. № 3. – 5с.
7. Банахевич Ю.В., Кичма А.О., Дзюбик А.Р. Визначення напружено-деформованого стану однопрогінних безкомпенсаторних балкових переходів трубопроводів // 3б. наук. праць.– Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. –

- Вип.4. – Львів: Каменяр, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка.– Львів.– 2002. – С. 7 – 11.
8. Банахевич Ю.В., Кичма А.О., Дзюбик А.Р. Напруження в околі дефектів матеріалу оболонкових конструкцій // Зб. наук. праць.– Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Вип.5.– Львів: Каменяр, 2002. – С. 311– 315.
 9. Банахевич Ю.В., Осадчук В.А., Дзюбик А.Р. Визначення залишкових напружень в околі кільцевого зварного з'єднання труб з урахуванням структурних змін в зоні термічного впливу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1. (6). – С. 77 – 81.
 10. Банахевич Ю.В. Проблеми діагностування газопроводів при їх експлуатації в складних умовах // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. – Львів: ВКП фірма "ВМС", 1998 р. – С. 42 – 45.
 11. Банахевич Ю.В., Юськів В.М., Дзюбик А.Р. Дослідження напруженого стану в зварних з'єднаннях труб із врахуванням структурних змін // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2003. – №1 (5). – С. 118 – 121.
 12. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
 13. Березин В. Л., Шутов В. Е. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов. – М.: Недра, 1973. – 200 с.
 14. Білобран Б.С., Шлапак Л.С. Напружено-деформований стан трубопроводу при його підсадці // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1. (6). – С. 107 – 110.
 15. Биргер И.А., Козлов М.Л. Остаточные напряжения: проблемы и

- перспективы // Труды III всесоюзного симпозиума “Технологические остаточные напряжения”. – Москва: Ин-т проблем механики АН СССР, 1988. – С. 60 – 73.
16. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
 17. Будз С. В., Бурак Я. И., Ирза Е. М. Оптимизация закалочных напряжений в пластинчатых элементах // Физ. – хим. механика материалов. – 1980. – № 4. – С. 69 – 72.
 18. Бут В.С., Грецький Ю.Я., Розгонюк В.В., Коломеев В.М. Обґрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 4. – С. 33 – 39.
 19. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
 20. Ведомственные строительные нормы: ВСН 006 – 89. Сварка и контроль качества сварных соединений при сооружении магистральных газопроводов. – Утв. Миннефтегазстрой СССР 14.03.89; Введ. 01.07.89 г. – М. – 1989. – 192 с.
 21. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – К.:Наук. думка, 1986. – 544с.
 22. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
 23. Винокуров В. А., Калинин В. Н. Экспериментальное исследование временных перемещений цилиндрических обечаек при сварке кольцевого шва // Изв. вузов. Машиностроение. – 1974. – № 11 – С. 153 – 157.
 24. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения (методы их

- устранения).– М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
25. ВБН В.2.3–00018201.04–2000. Відомчі будівельні норми України. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.
 26. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С.Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
 27. Гатовский К. М., Кархии В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений: Учебное пособие. – Л.: Ленингр. кораблестроительный ин-т, 1980. – 331 с.
 28. Гатовский К. М. Определение сварочных деформаций и напряжений с учетом структурных превращений металла // Сварочное производство. – 1973. – №11. – С. 3 – 6.
 29. Говдяк Р.М. Трубопровідне транспортування природного газу в ХХІ ст. Проблеми і перспективи розвитку // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 2. – С. 29 – 32.
 30. Гончарук М.І. Корозія та розгермитизація газопроводів // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 2. – С. 56 – 57.
 31. Гринченко В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров. – К.: Наукова думка, 1978. – 264 с.
 32. Грудз В.Я., Грудз Я.В. Аналіз руху поршнів по трасі газопроводу “Братерство” // Нафта і газ України. Збірник наукових праць: Матеріали 6–ої Міжнародної науково–практичної конференції “Нафта і газ України –2000”. – Том 3. – Івано–Франківськ. – 2000. – С. 36 – 38.
 33. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – К.: Наукова думка, 1977. – 152 с.
 34. Гумеров А.Г., Гумеров К.М., Росляков А.В. Разработка методов

- повышения ресурса длительно эксплуатирующихся нефтепроводов. – М.: ВНИИОНГ, 1991. – 83 с.
35. Деркач М.П., Банахевич Ю.В., Иткін О.Ф. Досвід виконання робіт з капітального ремонту магістральних газопроводів без зупинення транспорту газу // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 51–53.
36. Деклараційний патент № 56727А. Україна, МПК⁷ G01B11/30. Пристрій для контролю дефектів поверхні /А.Р. Дзюбик, А.О. Кичма, Ю.В. Банахевич. – № 2002086950; Заявл. 23.08.02; Опубл. 15.05.03. – Бюл. № 5. – 4 с.
37. Довідник експлуатаційників газонафтового комплексу / Розгонюк В.В, Хачикян Л.А., Григіль М.А., Удалов О.С. – К.: “Росток”, 1998. – 430 с.
38. Дубов А. А., Загребельный В. И., Мозговой А. П. В., Рудаков А. Н. Диагностика стальных конструкций методом магнитной памяти // Тези доповідей Міжнародної конференції “Сварные конструкции”. – Київ. – 2000. – С.11.
39. Закон України. Про трубопровідний транспорт // Голос України. – 1996. – № 108 – С. 6 – 7.
40. Захарова И.В., Чичкарёв Е.А., Васильев В.Г. и др. Структура и свойства металла ЗТВ соединений низколегированных трубных сталей, модифицированным кальцием // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8. – С. 18 – 21.
41. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
42. Иткин А.Ф., Коваль Р.И., Банахевич Ю.В., Драгилев А.В. Анализ результатов диагностики трубопроводов и их влияние на виды и

- объемы ремонтных работ // Материалы XII Международной деловой встречи "Диагностика – 2002". – Том 3. – Часть 1. – Турция. – 2002. – С. 28 – 31.
43. Игнатъева В.С. Распределение собственных напряжений в пластинах, сваренных в стык за один проход // Сварочное производство. – 1956. – № 3. – С. 12 – 17.
44. Капцов И.И., Гончаров В.Н., Гончар В.Н. Восстановительные работы на МГ: пути повышения эффективности // Газовая промышленность. – 1990. – №4. – С. 28 – 30.
45. Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Криничний П.Я. та інші. Забезпечення експлуатаційної надійності магістральних газопроводів //Тезиси докладов научно-технічного семінара “Повышение эксплуатационной надежности линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы ДК “Укртрансгаз”. – Киев. – 2002. – С. 38 – 39.
46. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. – К.: Вища школа, – 1987. – 246 с.
47. Кир'ян В. І. До продовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів, які відпрацювали свій нормативний строк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр. – 1998. – В. 3. – С. 608 – 614.
48. Кичма А.О., Коваль Р.І., Зубик Й.Л. Діагностика газопроводів з довготривалим терміном експлуатації // Зб. наук. пр. "Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій". – В.2. – Львів: Каменяр. – 2000. – С. 50 – 58.
49. Кичма А., Коваль Р., Банахевич Ю.В., Винник О.Й. Оцінка корозійного стану газопроводу за результатами внутрішньотрубної

- діагностики // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спец. випуск №3. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2002. – Т. 2. – С. 802 – 806.
50. Кичма А. О. Оцінка дефектів металу труб за результатами внутрішньотрубної дефектоскопії трубопроводів // Вісник НУ "Львівська політехніка": "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів". – Львів: ДУ "Львівська політехніка". – 1999. – № 434. – С. 58 – 61.
51. Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу. – Київ: Українські енциклопедичні знання, – 2001. – 288 с.
52. Коваль В.М., Сидор Ю.М., Розганюк В.В., Банахевич Ю.В. Дослідження корозійного стану газопроводів на складних ділянках траси // Матеріали наук.-тех. конф. “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”. – Івано-Франківськ. – 1996. – С. 40 – 42.
53. Коваль Р., Зубик Й., Банахевич Ю.В., Кичма А.О. та інші. Проблеми діагностування та паспортизації магістральних газопроводів ДП "Львівтрансгаз" // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. – Львів: ВКП фірма "ВМС", 1998. – С. 67 – 73.
54. Коваль Р.И., Банахевич Ю.В., Зубик Й.Л., Кичма А.А. и др. Диагностика технического состояния магистральных газопроводов УМГ “Львовтрансгаз” // Материалы XII Международной деловой встречи "Диагностика – 2002". – Том 3. – Часть 2. – Турция. – 2002. – С. 134 – 138.

55. Коваль Р.І., Банахевич Ю.В., Зубик Й.Л. Кичма А.О. Проблеми паспортизації та комплексного обстеження технічного стану лінійної частини магістральних газопроводів // Збірник наукових праць "Нафта і газ України" Матеріали 6-ої науково-практ. конф. "Нафта і газ України – 2000". – Том 3. – Івано-Франківськ. – 2000. – С. 87 – 89.
56. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
57. Космодамианский А.С., Шалдырван Г.Г. Изгиб толстой плиты, ослабленной полостью // Прикладная механика. – 1947. – Т.10, Вып. 5. – С. 27 – 32.
58. Красовский А.Я., Красико В.Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. Киев: Наукова думка, 1990. – 173 с.
59. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 5. – С. 33 – 38.
60. Кудрявцев П. И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение, 1964. – 95 с.
61. Кузьминов С.А. Сварные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1974. – 286 с.
62. Куркин С. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. – М.: Машиностроение, 1959. – 184 с.
63. Лінчевський М.П., Сарнісов В.О., Лерман М.Г. Вибір та атестація технологічних процесів зварювання // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №4. – С. 40 – 41.
64. Лобанов Л. М., Міходуй Л. І., Міходуй О. Л. Залишкові напруження

- в зварних з'єднаннях високоміцних сталей // Праці міжнародної конференції “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Том 1. – Випуск 2. – Львів: Каменяр, 1999. – С. 21 – 31.
65. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., В. В., Кротенко П. Д. та інші. Компьютерная система для определения остаточных напряжений методом отверстий в сочетании голографической интерферометрией // Тези доповідей Міжнар. конф. “Сварные конструкции”. – К. – 2000. – С.51.
66. Лобанов л. м., Пивторак В. А., Киянец ·И. В., Олейник В. М. Неразрушающий контроль качества композитных труб методом электронной ширографии // Тези доповідей Міжнар. конф. “Сварные конструкции”. – К. – 2000. – С.14.
67. Лобанов Л. М., Санченко Н. А., Павловський В. И., Пащин Н. А. Математическая модель для определения взаимных, продольных смещений элементов конструкций при сварке // Автоматическая сварка. – 1998. – № 3 (540). – С. 5 – 9.
68. Лобанов Л., Гиренко В., Рабкіна М. Деякі результати технічної діагностики трубопроводів і посудин у нафтохімічній промисловості // Машинознавство. – 1999. – № 7 – С. 3 – 7.
69. Макаренко В.Д., Чернов В.Ю., Крижанівський Є.І., Прохоров М.М. Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів // Нафт. і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 47 – 50.
70. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Шекера В. М., Розынка Г. Ф. и др. Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали // Автоматическая

- сварка. – 1998. – № 11 – С. 32 – 39.
71. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Махненко О.В. и др. Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб // Автоматическая сварка. – 2000. – № 5 – С. 3 – 8.
72. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
73. Махненко В. И. Тепловые и деформационные процессы в шве и околошовной зоне при сварке. – К.: Наукова думка, 1976. – 48 с.
74. Махненко В. И., Шекера В. М., Избенко Л. А. Некоторые особенности в распределении напряжений и деформаций от кольцевых швов в цилиндрических оболочках // Автоматическая сварка. – 1970. – № 12. – С. 43 – 47.
75. Махненко В. И., Шекера В. М. Исследование напряжений и деформаций при сварке цилиндрических оболочек с кольцевыми ребрами жесткости // Автоматическая сварка. – 1981. – № 8. – С. 1 – 7.
76. Махорт Ф. Г. О теории деформирования поляризующихся и намагничивающихся тел // Прикладная механика. – 1980. – № 3. – С. 22 – 31.
77. Махорт Ф. Г. О теории распространения магнитоупругих волн в проводящих телах с начальными напряжениями // Прикладная механика. – 1985. – № 6. – С. 3 – 11.
78. 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.

79. Методы расчёта оболочек. – Т.1. – Теория оболочек ослабленных отверстиями / А.Н. Гудзь, И.С. Чернищенко, В.Н. Чехов и др. – Киев: Наукова думка, 1980. – 636 с.
80. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
81. Нафтогаз України: перші кроки у третє тисячоліття // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 2 – С. 1 – 7.
82. Недосека А. Я. Влияние деформаций по толщине на остаточное напряжение в пластине со сварной точкой // Автоматическая сварка. – 1973. – № 7. – С. 30 – 34.
83. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Индпром, 1998. – 640 с.
84. Николаев Г.А. Исследование внутренних напряжений при сварке пластин встык // Тр. ЦНИИТМАШ. Новые режимы сварки и прочность сварных соединений. – 1937. – С. 163 – 270.
85. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
86. Николаев Г.А. Сварные конструкции. – М.: Машгиз, – 1962. – 552 с.
87. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
88. Окерблом Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке. – М. – Л. ГНТИМЛ: Машгиз, 1955. – 214 с.
89. Ориняк В.І., Розгонюк В.В., Тороп В.М. Ресурс, довговічність і надійність трубопроводів. Огляд сучасних підходів і проблеми нормативного забезпечення в Україні // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 54 – 57.
90. Осадчук В.А., Банахевич Ю.В. Концентрація напружень у

трубопроводі з поверхневою заглибиною у формі півеліпсоїда обертання // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 37 – 42.

91. Осадчук В.А, Кирян В.І., Базилевич Л.В. Обернена умовно-коректна задача визначення залишкових напружень у складних зварних оболонках обертання // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 1996. – №1. (40) – С. 130 – 134.
92. Осадчук В. А., Кушнір Р. М., Прокопович І. Б., Чекурін В. Ф. Розв'язувальні рівняння механіки тіл з власними напруженнями // Доп. НАН України. – 1993. – № 2. – С.60 – 64.
93. Осадчук В. А., Николишин М. М. К расчету остаточных напряжений в композиционных слоистых цилиндрических оболочках // В кн.: Композиционные материалы и новые конструкции.–Київ: Наук. думка, 1977. – С.79 – 85.
94. Осадчук В. А. Розрахунково–експериментальний метод визначення залишкових напружень в оболонках обертання // Праці наук. товариства ім. Т. Шевченка. – Т.1.– Львів. – 1997. – С. 560 – 565.
95. Осадчук В., Большаков М., Палаш В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках // Машинознавство. – 1997. – №1. – С.5 – 9.
96. Осадчук В., Большаков М. Розрахунково – експериментальний метод визначення залишкових напружень в зварних оболонках // Тези доповідей 3–го Міжнар. симп. українських інженерів–механіків у Львові. – Львів: Львівська політехніка, 1997. – С. 145 – 146.
97. Осадчук В.А. Определение остаточных напряжений в стеклооболочках расчетно–експериментальным методом // Мат. методы и физ.-мех. поля. –1992. – № 35. – С. 36 – 39.

98. Палаш В., Юськів В., Дзюбик А. Дослідження напруженого стану металоконструкцій ультразвуковим методом // Тези доповідей IV Міжнар. симп. українських інженерів-механіків у Львові. – Львів: Кінпатрі ЛТД, 1999. – С. 111.
99. Палцан И. Г., Банахевич Ю. В., Драгелев А. В., Шлапак Л. С. Проблемы надежности газопроводов в сложных условиях // XI-я Международная деловая встреча «Диагностика - 2001». – Москва: ИРЦ Газпром – 2001. – С. 186 – 190.
100. Палцан И.Г., Банахевич Ю.В., Зубик Й.Л., Кычма А.А. Проблемы паспортизации и оценки технического состояния магистральных газопроводов УМГ "Львовтрансгаз" // Материалы XI Международной деловой встречи "Диагностика - 2001". – Том 2. – Часть 2. – Тунис. – 2001. – С. 18 – 22.
101. Палцан И.Г., Коваль Р.И., Перун И.В., Олийнык А.П., Банахевич Ю.В. Компьютеризованная система диагностики напряженно-деформированного и коррозионного состояния газопроводов // Шестая Международная деловая встреча "Диагностика-96" (доклады и сообщения). Том 1. Диагностика трубопроводов.– Москва: Ротапринт ИРЦ Газпром, 1996. – С. 167 – 169.
102. Панасюк В. В., Андрейків О. Є. Нові підходи до оцінки довговічності зварних з'єднань // Автоматическая сварка. – 2000. – № 9–10. – С. 92 – 96.
103. Патент 30516 А Україна, МПК G 01 L1/20, H 01L 35/28, 35/30, 35/32. Спосіб визначення напружень в поверхневому шарі металевого виробу і пристрій для його реалізації: Пат. 30516 А Україна, МПК G 01L 1/20, H 01L 35/28, 35/30, 35/32/ Палаш В. М., Юськів В. М., Дзюбик А. Р. (Україна); Заявлено 19.05.98; Опубліковано 15.11.2000,

Бюлетень № 6-II. – 3 с.

104. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Диагностика сварных конструкций и обеспечение безопасности окружающей среды // Праці Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Том 3. – Випуск 2. – Львів: Каменяр, 1999. – С. 38 – 52.
105. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Концепция технической диагностики трубопроводного транспорта // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 3 – С. 3 – 13.
106. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Новый подход к оценке состояния сварных конструкций // Автоматическая сварка. – 2000. – № 9 – 10. – С. 97 – 99.
107. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Об обеспечении безопасности эксплуатации сварных конструкций и сооружений // Автоматическая сварка. – 1998. – № 11. – С. 20 – 25.
108. Патон Б. Е., Недосека А. Я. О развитии работ по диагностике состояния конструкций и сооружений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – № 1 – С. 3 – 10.
109. Патон Б. Е., Недосека А. Я., Фомичев С. К., Яременко М. А. Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. – № 1 – С. 3 – 12.
110. Патон Б. Е. О состоянии работ в Украине по технической диагностике промышленного оборудования, конструкций и сооружений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1997. – № 1 – С. 3 – 7.
111. Патон Б. Е., Труфяков В. И., Гуца О. И., Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Ультразвуковой неразрушающий метод измерения напряжений в

- сварных конструкциях // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1986. – № 2. – С. 13 – 19.
112. Патон Є.О., Горбунов Б.М., Бернштейн Д.І., Дзевалтовський К.І. Усадкові напруги при зварюванні циліндричних посудин / під. ред. Є.О. Патона. – К.: Видавництво Академії наук УРСР, 1936. – 166 с.
113. Перун Й.В. Магистральные трубопроводы в горных условиях. – М.: Недра, 1987. – 175 с.
114. Перун Й.В., Шлапак Л.С., Розгонюк В.В., Банахевич Ю.В. Досвід дослідження напружено–деформованого стану газопроводів акустичними та магнітними методами // Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики та неруйнівного контролю нафтогазового, хімічного та енергетичного обладнання. Сучасний підхід до підготовки фахівців з НК і ТД. Матеріали наук.–тех. конф. – Івано–Франківськ. – 1996. С. 33 – 37.
115. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 302 с.
116. Петров Н. Г., Халиков Р. Р., Кузнецов А. Н. Аналитические подходы к решению задачи прогнозирования безаварийной эксплуатации ЛЧ МГ // XI-я Международная деловая встреча «Диагностика – 2001». – М.: ИРЦ Газпром – 2001. – С. 50 – 63.
117. Підстригач Я. С., Ярема С. Я. Температурні напруження в оболонках. – К.: Видавництво АН УРСР, 1961. – 212 с.
118. Подстригач Я. С., Осадчук В. А. Исследование напряженного состояния цилиндрических оболочек, обусловленного заданным тензором несовместных деформаций и его приложения к определению сварочных напряжений // Физ. – хим. механика материалов. – 1968. – № 4. – С. 400 – 407.

119. Подстригач Я. С., Осадчук В. А., Карасев Л. П. Приближенный расчет остаточных сварочных напряжений в цилиндрических оболочках // Пробл. прочности. – 1975. – № 7. – С. 8 – 13.
120. Подстригач Я. С., Осадчук В. А., Марголин А. М., Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наукова думка, 1991. – 296 с.
121. Подстригач Я. С., Пляцко Г. В., Осадчук В. А. К определению остаточных сварочных напряжений в цилиндрических оболочках // Автоматическая сварка. – 1971. – № 3 – С. 50 – 58.
122. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов / Редкол. Чистяков А. И. и др. / Утв. М-вом газовой промышленности СССР 22.03.88. – М.: Недра, 1989. – 142 с.
123. Прокопенко А. В., Торгов В. Н. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщение 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя // Проблемы прочности. – 1986. – № 4. – С. 28 – 33.
124. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа / Гутман Э.М., Зайкуллин Р.С., Шаталов А.Т. и др. М.: Недра, 1984. – 76 с.
125. Розгонюк В. В. Удосконалення методики діагностування технічного стану та способів ремонту магістральних газопроводів: Дис...канд. техн. наук: 05.15.13.– Івано-Франківськ, 2000. – 147 с.
126. Розгонюк В. В., Шлапак Л. С., Коваль В. М. Про створення централізованої системи технічного нагляду і діагностування лінійної частини магістральних газопроводів України // Нафтова і газова промисловість. – 1998. – № 5. – С. 38 – 41.
127. Савін Г.М., Тульчій В.І. Довідник з концентрації напружень. – Київ: Вища школа, 1976. – 412 с.

128. Савула С.Ф., Банахевич Ю.В., Кичма А.О. Технічна діагностика магістральних газопроводів УМГ "Львівтрансгаз" // 3-я наук.-тех. конф. і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання", Івано-Франківськ. – 2002. – С. 40 – 43.
129. Сагалевич В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
130. Сварные строительные конструкции. Типы конструкций: В 2-х т. Т. 2 / Под ред. Л. М. Лобанова – К.: ИЭС им. Патона, 1997 – 680с.
131. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Наука, 1975. – 392 с.
132. Середюк М.Д., Люта М.В. Розробка математичних моделей для ефективного коефіцієнта змішування у зоні гідравлічно гладких труб // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Т.1., Вип. 35. – 1998. – С.183 – 198.
133. СНиП 2.05.06-85. Строительные нормы и правила «Магистральные трубопроводы». Госкомитет СССР по делам строительства. – М., – 1985. – 53 с.
134. Талыпов Г.В. Сварочные деформации и напряжения. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 278 с.
135. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
136. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 256 с.
137. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машиностроение, 1964. – 247 с.
138. Трубопровідний транспорт / за ред. М.П. Ковалка. – Київ: Агенство з

- раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
139. Федоров Е.И., Мегибоев И.М. К вопросу оценки надежности трубопроводов на основе накопления опыта // Сб. научн. трудов – Оценка надежности магистральных трубопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1987. – С. 18 – 24.
 140. Фомичев С.К., Минаков С.Н., Данильчик А.В., Татарников В.Г., Яременко М.А. Измеритель механических напряжений серии MESTR – 41х // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – № 1 – С. 58 – 60.
 141. Фомичев С.К., Осламовский Ю.А., Великоиваненко Е. А. Экспериментально – расчетный метод определения остаточных напряжений в зоне кольцевых швов оболочечных конструкций // Автоматическая сварка. – 1998. – № 5 – С. 14 – 18.
 142. Хан. Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 224 с.
 143. Харионовский В. В. Магистральные газопроводы: концепция конструктивной надежности линейной части // Газовая промышленность. – 1992. – № 2. – С. 30 – 32.
 144. Шип В.В., Муравин Г.Б., Чабурнин В.Ф. Вопросы применения акустической эмиссии при диагностике сварных трубопроводов // Дефектоскопия. – № 8. – 1993. – С. 17 – 23.
 145. Шлапак Л. С. Исследование напряженно–деформированного состояния сложных участков трубопроводов в условиях горных Карпат с целью повышения их эксплуатационной надежности // Методы и средства технической диагностики. – Ивано-Франковск. – 1992. – С. 166 – 172.
 146. Шлапак Л.С., Коваль В.М., Олійник А.П. та інші. Вплив анізотропії

- трубних сталей на оцінювання напруженого стану трубопроводу ультразвуковим методом // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 3. – С. 41 – 43.
147. Шлапак Л. С Концепція діагностування технічного стану надземних нафтогазопроводів // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр. – 1998. – В. 3. – С. 650 – 652.
148. Шлапак Л. С. Науково-методичні основи діагностування напружено-деформованого стану надземних ділянок нафтогазопроводів: Автореф. дис... д.-ра техн. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський держ. техн. університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 1996. – 46 с.
149. Шлапак Л.С., Розгонюк В.В. Разработка концепции исследования технического состояния надземных участков газонефтепроводов // Нефтяная и газовая промышленность. – 1996. – № 4. – с. 35–37.
150. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А. и др. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.
151. Adamski M., Lubkiewicz J. Ocena stanu napreżeń i grubości ścianek w rurociągach metoda ultradźwiękowa //Materialy. II Krajowej Konferencji Technicznej. “Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów. – Plock (Poland). – 1999. – S. 119 – 128.
152. Allen D.B., Sayers C.M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique // Ultrasonic. – 1984. – 22. – № 4. – P. 179– 188.
153. Banachewich J., Koval R., Kychma A. Nondestructive stress monitoring of gas pipelines. // Badania nieniszczące. Zeszyty problemowe, 2002 №7.

- Materiały 31 Krajowej Konferencji Badan Nieniszczących. – Szczyrk (Polska), – 22–24.X.2002. – Warszawa. – 2002. – S. 253 – 257.
154. Banahevyh Ju., Kichma A. Inside gas pipelines diagnostics in enterprice “Lvivtransgaz” by intelligence pistons // Materiały II Krajowej Konferencji Technicznej “Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów”. – Plock (Poland). – 1999 r. – S.63 – 65.
155. Engineering Sciences Data Unit, Stress Concentration Data Sheet No 79008, Issue 3 (ESDU, July 1979).
156. Engineering Sciences Data Unit, Stress Concentration Data Sheet No 85045, Issue 3 (ESDU, December 1985).
157. Hardy S.J., Malik N.H. A survey of post-Peterson stress concentration factor data. – Int. J. Fatigue. – 1992. – N 3 (14). – P. 147–153.
158. Hicks Dave J. Guidelines for welding on pressurized pipe // Pipeline and Gas J. – 1983. – № 3. – P. 17 – 19.
159. Jones B.L., Huuskonen E., Erdbrink K. Ocena integralności spoin obwodowych na podstawie wyników inspekcji wewnętrznej gazociągu w odniesieniu do możliwości podniesienia ciśnienia eksploatacyjnego w stosunku do jego wartości projektowej//Materiały II krajowej Konferencji Technicznej “Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów”. – Plock (Poland). – 1999. – S.165 – 175.
160. Marvin C.W. Determining the Strength of Corroded Pipe // Materials Protection and Performance. – 1972. – № 11. – P. 34 – 40.
161. Masubuchi K. Numerical Modelling of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding // Numerical Modelling of Manufacturing Processes // The American Society of Mechanical Engineers, PVP-PB-025. – 1977. – P. 1 – 18.
162. Masubushi K. Analysis of Welded Structures. – New York: Pergamon

Press, 1980. – 642 p.

163. R. Koval, J. Banachewicz, J. Zubik, A. Kichma. Inside gas pipelines on the territory of Ukraine // *Materiai i krajovei i krajovei Konferenciji Technichnei "Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów"*. – Plock (Poland). – 1998. – S. 117 – 120.
164. Radeker W. Eine neue Methodik zum Nachweis von Schweißbeigenspannungen // *Sweißen und Schneiden*. – 1958. – № 9. – P. 5 – 9.
165. Ueda J., Jamakawa F. Analysis of Thermal Elastik-Plastik stress and strain During Welding by Finite Element and Method // *Trans. J. Weld. Soc.* – 1971. – P. 24 – 36.
166. Zubik J., Kychma A., Kowal R., Banachewicz J. Monitorowanie stanu technicznego gazociągów przesyłowych na terenie Ukrainy // *Materiały XI międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej "Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wietnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie"*. – Kraków (Poland). – 2000. – S. 275 – 277.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**Програма розрахунку напружень в області
кругового в плані дефекту трубопроводу
(DefWiev)**

Загальні відомості

Програма ElipsDef призначена для знаходження циклічно-симетричного напружено-формованого стану круглої пластини з поверхневим круговим в плані дефектом під дією тягуючих розподілених зусиль, прикладених на її боковій поверхні. Для розв'язування цієї задачі використовується пів-аналітична схема методу скінченних елементів, яка базується на складі переміщень в ряд Фур'є по кутовій координаті та їх білінійній апроксимації на трикутних елементах в осьовому перерізі.

Програма написана на мові Fortran 77. Складається з основної програми SupMain, та 27 підпрограм ElipsDef, FurLoad, SimpN, VvidDef, MeshSimp, MeshCyl, MeshVar, Deli2, SolPar, FDef, VuvSt, FrmGSM, FormGF, SISM, DcmpBD, SlvBD, VuvPer, Stress, StrBord, StrDot, StrSurfA, StrGage, StrSec, StrSecIr, DigVal, RadDef.

А.1 Функціональне призначення програми

Програма ElipsDef призначена для розрахунку методом скінченних елементів концентрації напружень в області поверхневого кругового в плані дефекту пластини за умов двовісного тягу.

За заданих геометричних параметрів пластини та дефекту, механічних константах матеріалу і навантаженнях програма автоматично генерує сітку методу скінченних елементів і рахує:

- переміщення в вузлах сітки,
- напруження на елементах,
- максимум по елементах еквівалентних напружень за енергетичною теорією формозміни,
- напруження в точках границі області,
- інтегральні напруження для заданого тензодавача, розміщеного на поверхні,
- напруження по заданих перерізах у вихідній прямокутній системі координат.

Програма дозволяє проводити розрахунок для довільної в осьовому перерізі форми дефекту, шляхом задання відповідної функції форми. Стандартно задані форми дефекту – пів-коїд обертання та циліндрична порожнина з еліпсоїдальним дном.

А.2 Опис логічної структури

Програма написана на мові Fortran 77. Складається з основної програми та 27 підпрограм. Підпрограми можна розділити на наступні групи:

- Підпрограми стандартних чисельних методів:
 - розв'язування нелінійних рівнянь методом парабол – SolPar,
 - обчислення еліптичних інтегралів - Deli2,
 - прямого та оберненого ходу методу Гауса розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь для стрічкових матриць - DcmpBD, SlvBD.
- Підпрограми методу скінченних елементів:
 - опису геометрії дефекту, формування та виводу сітки скінченних елементів – Fdef, RadDef, MeshSimp, MeshCyl, MeshVar, Fun, VuvSt,
 - формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь та правої частини - FrmGSM, FormGF,
 - модифікації системи рівнянь для врахування кінематичних крайових умов - SISM,
 - розрахунку та виводу переміщень в вузлах – VuvPer, напружень на елементах - Stress, напружень в вузлах границі – StrBord, напружень тензометра StrDot, StrSurfA, StrGage, напружень по перерізах – StrSec, StrSecIr.
- Підпрограма вводу вихідних даних – VvidDef.
- Допоміжних підпрограм DigVal,

2.1. Головна програма SupMain.

Організує налаштування по організації розміщення файлів на диску (розпізнає текучу директорію, створює піддиректорію для вихідних результатів, перевіряє наявність вихідних файлів, формує шляхи для вихідних файлів) та запускає підпрограму вводу початкових даних VvidDef і головну підпрограму розрахунку ElipsDef.

Програма організовує ввід трьох імен:

- назви файлу вхідних даних (передається символьною змінною InDate),
- назви піддиректорії для виводу результатів (символьна змінна RezSubDir),
- назви файлу для виводу результатів для заданого перерізу (символьна змінна SxyzName).

Зауваження: Назви вхідного та вихідного файлів, піддиректорії для виводу результатів не можуть перевищувати 20 символів, а повні шляхи до файлів – 80-ти символів.

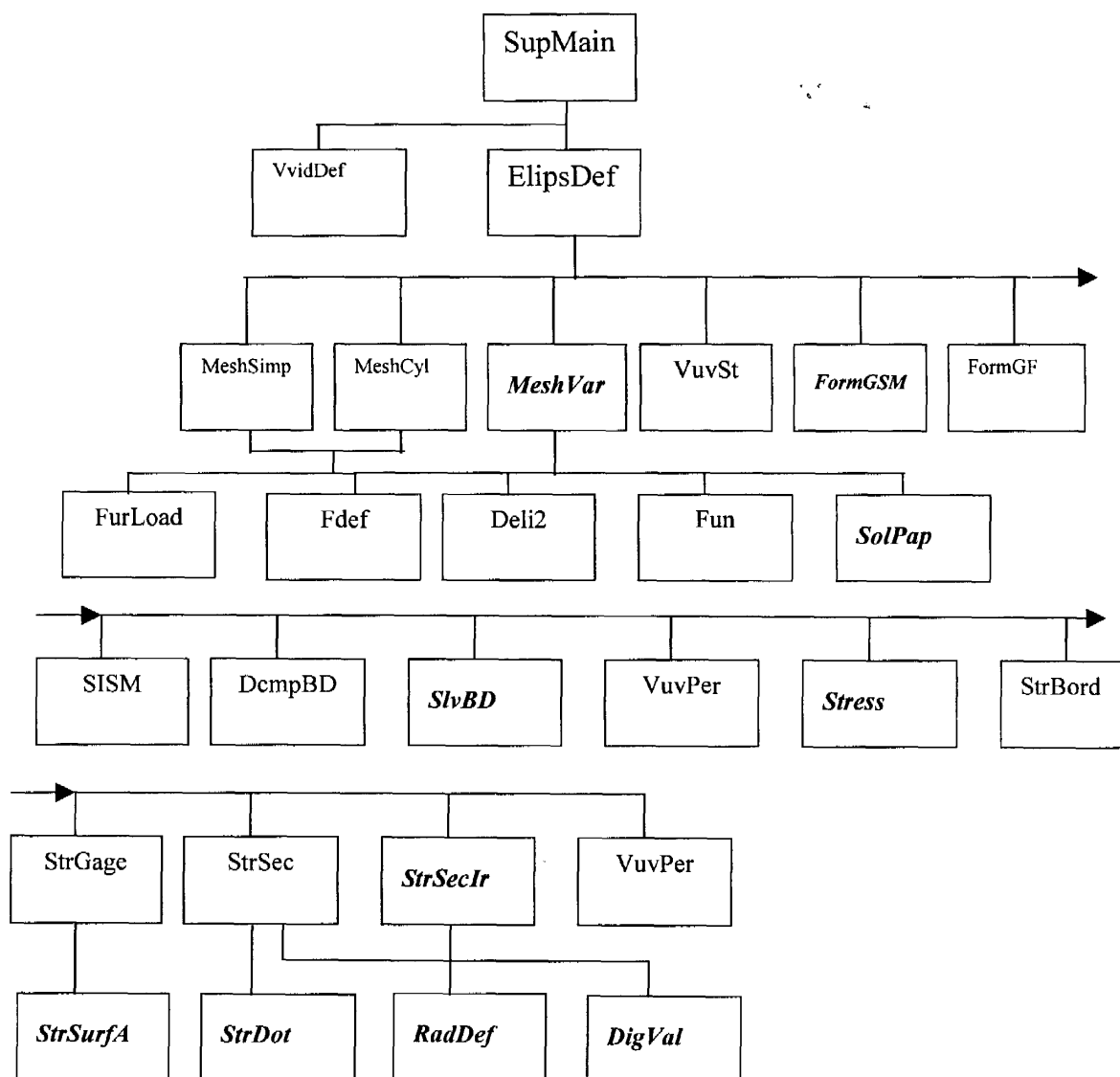


Рис. А.1. Схема ієрархії програми.

2. Підпрограма VvidDef

Організує ввід та початкову підготовку вхідних даних задачі. Відкриває файл вхідних даних з виводом, яка передається символьною змінною InDate з головної програми *SupMain*. Далі відбувається читання вхідних даних у фіксованому форматі.

У піддиректорії результатів (передається текстовою змінною RezSubDir) відкриває основний ASCII-файл вихідних результатів 'Vα.DEFGEN', здійснює додаткове формування даних вивід вхідних даних у цей файл для контролю.

13. Підпрограма ElipsDef

Є головною підпрограмою. Послідовно викликаючи інші підпрограми виконує наступне:

- Формує сітку методу скінченних елементів,
- Формує та розв'язує системи лінійних алгебраїчних рівнянь МСЕ,
- Проводить розрахунок та вивід переміщень у вузлах,
- Проводить розрахунок та вивід напруження по елементах,
- Розраховує напруження на границі та інтегральні напруження тензодавача,
- Організовує вивід файлів напружень по перерізах в прямокутній системі координат.

14. Підпрограма MeshSimp

Здійснює просте розбиття вихідної області на чотирикутні елементи для неглибоких ектів.

Отримувана сітка показана на рис. А.2.

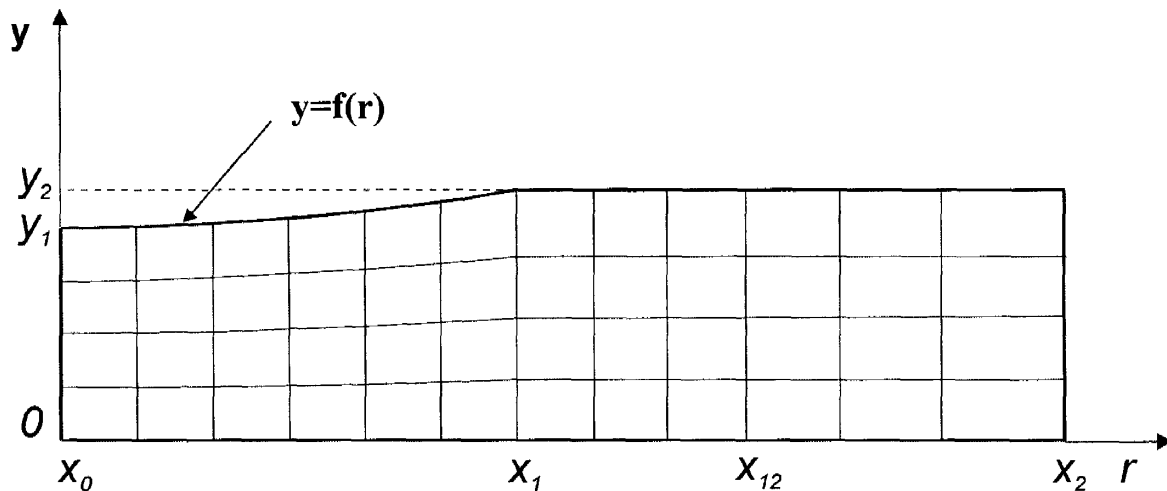


Рис. А.2

На проміжку $[x_0, x_{12}]$ здійснюється рівномірне розбиття по радіусу на NXA елементів, а по OY – на NZ елементів. В області дефекту координати вузлів вираховуються наступним чином: $x_0 + i(x_{12} - x_0)/NXA$, $y^i = f(x^i)/NZ$, $i = 0, \dots, NXA$. На проміжку $[x_{12}, x_2]$ здійснюється рівномірне розбиття по осі OY на NZ елементів, та нерівномірне розбиття вздовж радіуса на NXB елементів арифметичною прогресією.

Величини $x_0 = X0$, $x_2 = X2$, $y_2 = Y2$, NZ – є вхідними, $x_1 = X1$, $x_{12} = X12$, $y_1 = Y1$, NXA , NXB – вираховуються в основній програмі наступним чином: $X12 = 2*(X1+Y1)$, $Y1=Y2 - DDEF$, $NXA = NxDef + NxRin$, $NXB = [NZ*(X1-X0)/Y2]$, $NxRin = [NZ*(X12-X1)/Y2]$, $NXB = 2*NXA$.

Для такої сітки просто розраховується кількість скінченних елементів $= NZ*(NXA+NXB)$, кількість вузлів $NU = (NZ+1)*(NXA+NXB+1)$, розмірність матриці $NP = NU$, півширина стрічки $NB3=3*(NZ+3)$, кількість граничних вузлів $= 2*(NXA+NXB+NZ)$.

2.5. Підпрограма MeshCyl

Здійснює просте розбиття вихідної області на чотирикутні елементи для дефекту у формі циліндра з еліпсоїдальним дном (рис. А.5).

Отримувана сітка показана на рис. А.3.

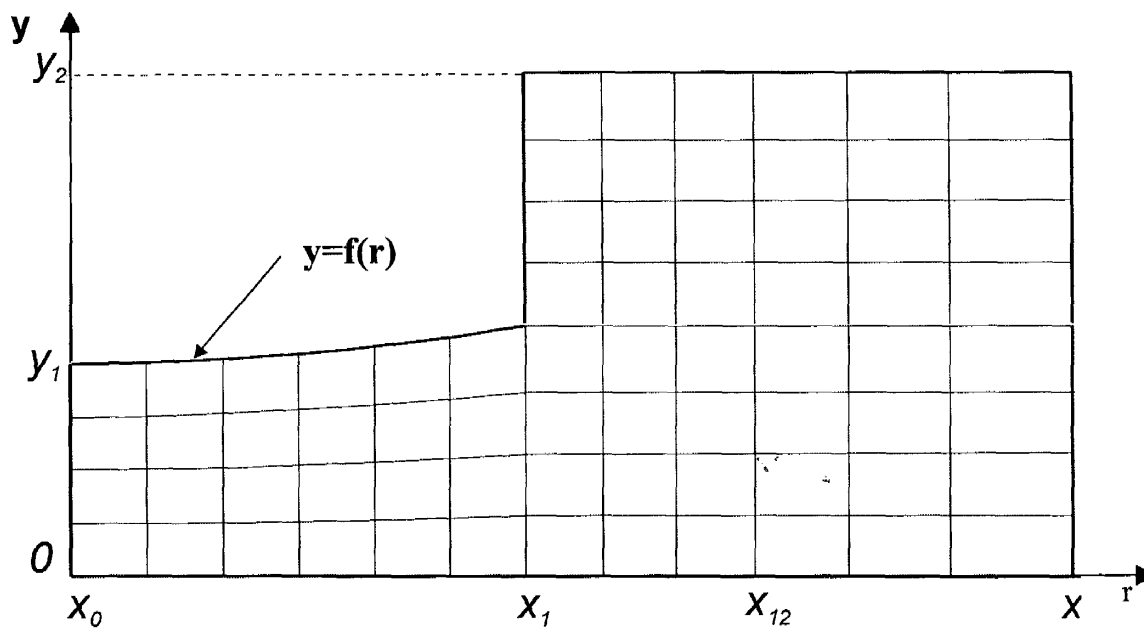


Рис. А.3

Розбиття здійснюється подібним чином, як і у попередньому випадку.

А. 2.6. Підпрограма MeshVar

Здійснює розбиття вихідної області на чотирикутні скінченні елементи зі згущенням сітки дефекту в формі півеліпсоїда обертання.

Отримувана сітка показана на рис. А.4.

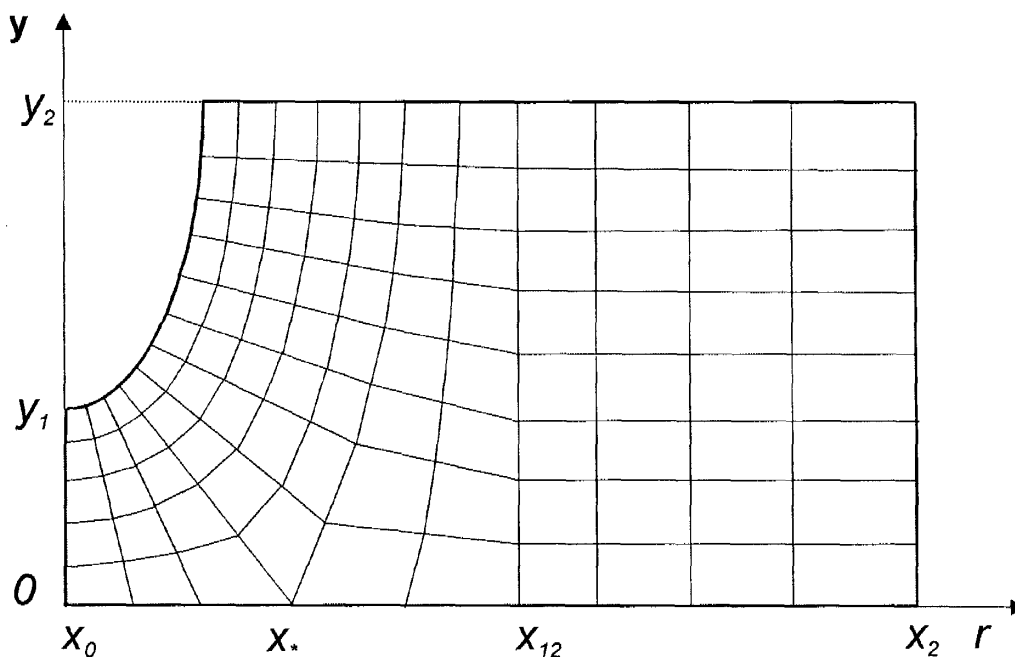


Рис. А.4. Розбиття для глибоких дефектів зі згущенням сітки

Позначимо: a, b – півосі еліпсоїда ($a = RDEF$, $b = DDEF$), r_a, r_b – відповідні радіуси вини, $H = Y2$ – товщина пластини. Основні параметри сітки розраховуються за формулами:

- кількість участків розбиття по товщині в центрі дефекту

$$KN = \max\{NZ, (Y2-DDEF)/RDEF\}$$
- кількість участків розбиття вздовж дуги еліпса

$$KS = \left\lfloor \frac{(\pi/2) * NXA}{RDEF} \right\rfloor \text{ при } RDEF > DDEF,$$

$$KS = \left\lfloor \frac{(\pi/2) * NXA * DDEF}{RDEF} \right\rfloor \text{ при } RDEF < DDEF,$$
 позначення див. п. А.2.

Сітка автоматично згущується в зоні меншого радіуса кривини r_a чи r_b . В зоні $x > x_{12}$ біття здійснюється аналогічно програмі MeshSimp.

1.7. Підпрограма-функція Fdef(x)

Задає форму дефекту в осьовому перерізі. Дефект має форму циліндра з еліпсоїдальним м (рис.А.5). Позначимо: a та b - півосі еліпсоїда в осьовому перерізі, $\delta = DDEF$ – глибина екту, $x_1 = RDEF$ – його радіус. Форма дефекту розраховується за наступною формулою $y=f(r) = b(1-(1-r^2/a^2)^{1/2})$.

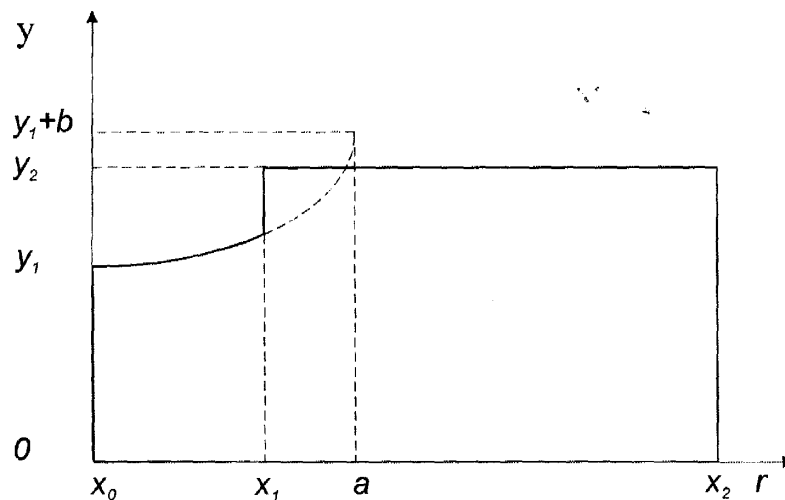


Рис. А.5. Форма дефекту в осьовому перерізі

Величини $x_0 = X0$, $x_2 = X2$, $y_2 = Y2$, $a = AEL$, $b = BEL$, $\delta = DDEF$ – є вхідними, y_1 – вираховується в основній програмі $y_1 = Y2 - DDEF$.

1.8. Підпрограма SolPar

Реалізує метод парабол розв'язування нелінійного рівняння $FUN(X) = 0$.

Вхідні параметри:

- FUN – назва підпрограми-функції, яка задає праву частину рівняння,
- X1, X2 – відрізок зміни знаку функції,
- Y1, Y2 - значення функції в точках X1, X2,
- EPS – абсолютна похибка визначення кореня.

Вихідні параметри:

- X1 – корінь рівняння,
- Y1 – значення функції $FUN(X)$,
- KIT – кількість ітерацій.

1.9. Підпрограма DELI2

Розраховує нормальні еліптичні інтеграли першого та другого роду.

Вхідні параметри:

- X – тангенс кута (кут – межа інтегрування),
- СК – доповняльний модуль,

- A, B – постійні, при $A = 1, B = 1$ розраховує еліптичний інтеграл першого роду, при $A = 1, B = 1 - CK^{*2}$ – другого роду.

Вихідні параметри:

- R – результат.

11.10. Підпрограма-функція FUN(X)

Допоміжна підпрограма-функція, яка використовується при розбитті дуги еліпса.

11.11. Підпрограма VuvSt

Здійснює вивід параметрів сітки. Повнота виводу задається параметром *kpmesh*.

Значення параметра <i>kpmesh</i>	Рівень роздруку
-1	Виводиться лише сітка без дальших розрахунків
0	Ніяка інформація про сітку не виводиться
1	Мінімальний вивід інформації про сітку
>1	Повний вивід інформації про сітку: <ul style="list-style-type: none"> • Топологія сітки (нумерація вузлів та елементів) • Координати вузлів • Інформація про граничні вузли та крайові умови

11.12. Підпрограма VuvPer

Розраховує переміщення в вузлах сітки в циліндричній системі координат (r, z, φ) та здійснює їх вивід.

Рівень друку задається параметром *kpdis*, який передається через загальний блок NPRINT. При *kpdis* > 0 виводяться номери вузлів, їх координати та переміщення. При *kpdis* = 0 переміщення не виводяться.

11.13. Підпрограма Stress

Здійснює розрахунок та вивід напружень по елементах сітки. Здійснюється вивід номера елемента e , координат його центра маси (r_e, z_e) , еквівалентного напруження σ_e та усіх компонент тензора напружень в циліндричній системі координат (r, z, φ) для $\varphi = 0$ ($\Delta\varphi$) $\pi/2$, де $\Delta\varphi = (\pi/2)/NFI$ – вхідний параметр.

Рівень виводу задається параметром *kpse*.

Значення параметра <i>kpse</i>	Рівень виводу
0	Напруження по елементах не виводяться
1	1 – напруження виводяться для $r < xsig$ – вхідний параметр.
>1	Виводяться всі напруження.

11.14. Підпрограма StrBord

Здійснює розрахунок та вивід напружень в точках границі тіла шляхом екстраполяції на площу напружень по двох найближчих елементах.

Для кутів $\varphi = 0$ ($\Delta\varphi$) $\pi/2$, де $\Delta\varphi = (\pi/2)/NFI$ (NFI – вхідний параметр), здійснюється вивід напружень в граничному вузла g , координат точки границі (r_g, z_g) , та усіх компонент тензора

ружень. Для прямолінійних ділянок границі напруження задаються в циліндричній системі координат (r, z, φ) . Повнота виводу задається параметром *kpsu*.

Значення параметра kpsu	Рівень роздруку
0	Напруження в вузлах границі елементах не виводяться
1	Виводяться напруження на границі в зоні $x \leq X1$.
2	Виводяться напруження на границі в зоні $x \leq X12$.
>2	Виводяться напруження на всій границі.

2.15. Підпрограма StrGage

Здійснює розрахунок та вивід інтегральних напружень для тензодавача.

2.16. Підпрограма StrSec

Проводить розрахунок напружень по вузлах рівномірної сітки для заданого перерізу та вивіду їх вивід у текстовий та бінарний файли.

Вузли сітки, наприклад для перерізу $z = \text{const}$, задаються формулами

$$x^i = i * X_{\text{Par}} / N_{xv}, \quad y^j = j * Y_{\text{Par}} / N_{yv}, \quad i = 0, \dots, N_{xv}, \quad j = 0, \dots, N_{yv}.$$

A.3 Організація роботи програми

Робота з програмою здійснюється в середовищі Fortran Power Station v.1.0 або більш новому середовищі для програмування цією мовою (Fortran Power Station v.4.0, Digital Visual tap 6.0, Compaq Visual Fortran 6.5 тощо).

Створюється робоча директорія на диску, куди переписуються файли програми та файли вхідних даних (indat). Компіляція програми, побудова exe-файлу здійснюються стандартними командами вихідного середовища.

При запуску програми на виконання з командної стрічки допускається три параметри до 20 символів кожний:

1. назва файлу вхідних даних (передається символьною змінною InDate),
2. назва піддиректорії для виводу результатів (символьна змінна RezSubDir),
3. назва файлу для виводу результатів для заданого перерізу (символьна змінна SxyzName).

Програма сама розпізнає текучу директорію. Якщо третій параметр командної стрічки – символічний, то програма розмістить бінарний файл результатів для заданого перерізу з назвою, яку вказує символічна змінна SxyzName в текучу директорію. Якщо третій параметр командної стрічки – не заданий, то назва бінарного файлу результатів покладесться наступною – 'SxyzBin' і файл поміститься в піддиректорію для виводу результатів.

Якщо не заданий також 2-й параметр командної стрічки, то програма просить ввести його з клавіатури. Коли це запрошення ігнорується, програма формує піддиректорію для виводу результатів наступним чином: RezSubDir = 'REZ' // InDate. Якщо не заданий жоден з параметрів, програма просить ввести з клавіатури назви файлу вхідних даних та піддиректорії для виводу результатів.

У піддиректорію результатів виводяться наступні файли:

- 'VαDEFGEN' – ASCII-файл загального виводу,
- 'VαSx00_0.dat' – ASCII-файл напружень в перерізі x00_0 ($x=00.0$) на рівномірній сітці (x00_0 - підстрічка виду перерізу та його координати формуються автоматично),
- 'VαSnx00_0.dat' – ASCII-файл напружень в перерізі x00_0 ($x=00.0$) на нерівномірній сітці,

- 'V α SxyzBin' – бінарний файл напружень в перерізі на рівномірній сітці (якщо 3-й параметр командної стрічки – не заданий) , повністю аналогічний файлу 'V α Sx00_0.dat'.

Параметр α визначає номер варіанту і вибирається автоматично від 0 до 9 , відповідно до наявних файлів.

A.4 Вхідні та вихідні дані

A.4.1. Вхідні дані.

Вхідні дані задаються у ASCII-файлі , ім'я якого вводиться в командній стрічці першим аргументом або з клавіатури – при відповідному запиті

'# a name of data file ' , назва цього файлу зберігається в символьній змінній *InDate*.

Зміст вхідних даних, розміщених в цьому файлі пояснює наступна таблиця.

Таблиця А.1

Вхідна величина	Формат	Пояснення та рекомендації
RNU	D 14.6	Модуль Юнга матеріалу труби
E	D 14.6	Модуль пружності матеріалу труби
X0	D 14.6	Внутрішній радіус трубопроводу. Для кругової пластини покладається $X0 = 0$. Якщо, $X0 < 0$ то на границі $z=0$ задаються умови симетрії.
X2	D 14.6	Зовнішній радіус труби
Y2	D 14.6	Товщина труби
idef	I3	<ul style="list-style-type: none"> • Параметр дефекта: idef = 1 – дефект – циліндрична порожнина, • idef = 2 – у формі циліндра з еліпсоїдальним дном, • idef = 3 – півеліпсоїд обертання.
ael	D 14.6	Піввісь еліпсоїда вздовж радіуса .
bel	D 14.6	Піввісь еліпсоїда вздовж осі Oz.
rdef0	D 14.6	Початковий радіус дефекту
drd	D 14.6	Приріст радіуса дефекту
rdeff	D 14.6	Кінцевий радіус дефекту
ddef0	D 14.6	Початкова глибина дефекту
ddd	D 14.6	Приріст глибини дефекту
ddeff	D 14.6	Кінцева глибина дефекту
RrGage	D 14.6	Радіус центра тензодавача в циліндричній системі координат (Рис. 3.2)
ZzGage	D 14.6	Координата z центра тензодавача
FiGage	D 14.6	Кут ϕ центра тензодавача
AnGage	D 14.6	Кут осі тензодавача (відносно кута ϕ)
RLGage	D 14.6	Довжина тензодавача
WiGage	D 14.6	Ширина тензодавача
ISec	I3	Вид перерізу для виводу напружень: <ul style="list-style-type: none"> • перпендикулярно осі Ox при $x = Tsec$, • перпендикулярно осі Oy при $y = Tsec$, • перпендикулярно осі Oz при $z = Tsec$
Tsec	D 14.6	Значення координати по якій здійснюється переріз відповідно до попереднього параметра ISec
XPar	D 14.6	Максимальне значення координати x в перерізах

Продовження табл. А.1

24	YPar	D 14.6	Максимальне значення координати у в перерізах
25	ZPar	D 14.6	Максимальне значення координати z в перерізах
26	Nxv	I3	Параметр розбиття по перерізу вздовж осі Oх, крок сітки має величину XPar/Nxv (додатково див. опис підпрограми StrSec)
27	Nyv	I3	Параметр розбиття по перерізу вздовж осі Oу, крок сітки має величину YPar/Nyv
28	IHole	I3	Вивід напружень для порожнини: <ul style="list-style-type: none"> • IHole = 0 - у текстовий файл виводяться стрічки '1.70141e+038', в бінарний – величини 3.33333D+33 • IHole < 0 ніяка інформація для точок порожнини не виводиться
29	Nzv	I3	Параметр розбиття по перерізу вздовж осі Oz, крок сітки має величину ZPar/Nzv
30	sigma1	D 14.6	Розподілене навантаження вздовж осі Oх
31	sigma2	D 14.6	Розподілене навантаження вздовж осі Oz
32	NZ	I3	Мінімальне розбиття по товщині (в центрі дефекта)
33	MeshCond	I3	Параметр згущення сітки.
34	NFI	I3	Параметр розбиття по кутовій координаті для виводу напружень та деформацій
35	KPmesh	I3	Параметр виводу сітки: <ul style="list-style-type: none"> • -1 – виводиться лише інформація про сітку, • 0 - ніяка інформація про сітку не виводиться, • 1 – мінімальний вивід основних параметрів сітки, • >1 – повний вивід інформації про сітку.
36	KPdis	I3	Параметр виводу переміщень: 0 – переміщення не виводяться.
37	KPse	I3	Параметр виводу напружень по елементах: <ul style="list-style-type: none"> • 0 – напруження по елементах не виводяться, • 1 – напруження виводяться для $r < xsig$ • >1 – вивід усіх напружень.
38	xsig	D 14.6	Задає межу виводу напружень по радіусу за для $Kpse=1$
39	KPsu	I3	Параметр виводу напружень в вузлах : <ul style="list-style-type: none"> • 0 – напруження в вузлах не виводяться, • 1 – напруження в точках границі для $r < X1$, • 2 – напруження в точках границі для $r < X12$.

2. Вихідні результати

У піддиректорію результатів виводяться наступні файли:

- 'VαDEFGEN' – ASCII-файл загального виводу ,
- 'VαSx00_0.dat' – ASCII-файл напружень в перерізі x00_0 (x=00.0) на рівномірній сітці (x00_0 - підстрічка виду перерізу та його координати формується автоматично),
- 'VαSnx00_0.dat' – ASCII-файл напружень в перерізі x00_0 (x=00.0) на нерівномірній сітці,
- 'VαSxyzBin' – бінарний файл напружень в перерізі (якщо 3-й параметр командної стрічки – не заданий).

Параметр α вибирається автоматично послідовно від 0 до 9 , відповідно до вже наявних шів.

У вихідний файл 'V α DEFGEN' послідовно виводяться (в найбільш загальному випадку) :

- Астрономічний час та дата початку роботи програми
- Вхідні дані та додаткові початкові дані (крайові умови тощо)
- Варіант геометрії дефекту
- Параметри побудованої сітки
- Час формування та розв'язування систем рівнянь для гармонік ряду Фур'є
- Переміщення у вузлах
- Напруження по елементах
- Файл координат центру елемента та компонент напружень на елементі StrBody
- Напруження на границі
- Файл координат точок поверхні та компонент напружень StrBord
- Напруження тензодавача
- Загальний час рахунку та астрономічний час

ASCII-файл 'V α Sx00_0.dat' – містить координати рівномірної сітки для відповідного ерізу ((x,z) або (y,z) або (x,y)) та компоненти напружень в цих точках sxx, szz, suy , sxz, szy, є пристосований для дальшого використання програмою **SURFER** .

Файл 'V α Snx00_0.dat' – містить аналогічні величини на нерівномірній сітці – для центрів чених елементів.

Файл послідовного доступу 'V α SxyzBin' – це файл 'V α Sx00_0.dat' записаний у бінарній мі. Наприклад, для перерізу x=const він послідовно містить записи y,z, sxx, szz, suy, sxz, szy, Для вузлів сітки, які лежать в області порожнини всі напруження мають величину 333E+33.

Фрагменти лістингу виводу результатів наводяться у наступному розділі.

A.5 Контрольні приклади.

A.5.1. Задача Кірша

Для перевірки правильності роботи програми здійснено тестовий розрахунок просторової (ці про напружений стан в пластині з отвором радіуса r_1 при її одноосному розтязі (просторова задача Кірша). Ця задача розв'язувалась для значення коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.25$ наступних значеннях геометричних параметрів: $H = 1, r_1 = 1, r_2 = 60.0$, при $z=0$ задавались в симетрії.

При цьому використовувалось рівномірне розбиття по товщині на 40 елементів, вздовж уса в зоні $[r_1, 2r_1]$ - рівномірне розбиття на 80 елементів, а по зоні $[2r_1, r_2]$ - нерівномірне биття на 40 елементів з розширенням.

Для максимального напруження $\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{\sigma_1}$, яке виникає на краю отвору при $\varphi = \frac{\pi}{2}$, отримано

ення 3.09 . Точний розв'язок складас 3.08. Таким чином, вказане розбиття забезпечує ість визначення максимальних напружень вищу 0.5 %.

A.5.1.1. Файл вхідних даних

0.250000D+0	RNU	механічні параметри
1.000000D+0	E	
1.000000D+0	X0	параметри прямокутника
60.000000D+0	X2	
1.000000D+0	Y2	
1	idef	параметри дефекта

```

2.000000D+0    ael
0.000000D+0    bel
1.500000D+0    rdef0
0.100000D+0    drd
1.500000D+0    rdeff
0.000000D+0    ddef0
0.100000D+0    ddd
0.000000D+0    ddeff
1.051000D+0    RrGage
1.000000D+0    ZzGage
0.000000D+0    FiGage
1.000000D+0    AnGage
0.100000D+0    rLGage
0.100000D+0    Wigage
1              ISec
0.000000D+0    Tsec
2.000000D+0    XPar
2.000000D+0    YPar
1.000000D+0    ZPar
40             Nxv
40             Nyv
20             Nzv
1              IndHole
1.000000D+0    sigma1 навантаження
0.000000D+0    sigma2
10             NZ
4              MeshCond
2              NFI параметри рівня виводу результатів
0              KPmesh сітка
0              KPdis переміщень
0              KPse напружень по елементах
2.001000D+0    xsig
2              KPsu напружень по вузлах

```

1.2. Фрагмент виводу результатів

Фрагмент виводу результатів подано нижче.

```

PROGRAM ElipsDef
DATE - 2001.11.11
TIME - 21.34.46
SubPROGRAM VVIDEF
    Mechanical parameters  RNU= .250000      E= 1.00000
    Geometry of rectangle  X0= 1.00000      X2= 60.0000
z2= 1.00000
Defect type  idef = 1
    ael = 2.00000      bel = .000000
    Variants  rdef0 = 1.50000      drd= .100000      rdeff= 1.50000
    ddef0 = .000000      ddd= .100000      ddeff= .000000
    Load stresses  sigma1= 1.00000      sigma2= .000000
    Type of mesh  imesh= 1  MeshCond= 4
    Thickness partitioning  Nz= 10
PRINT parameters
kpmesh= 0  kpdis= 0  kpse= 0  kpsu = 2
xsig = 2.00100
Symmetrical boundary condition on the border z=0 !!!
Fourier series par.  KFUR= 2  increment  KKD= 2
Angles of normal in corner points
1.57080      1.57080      .000000      .000000
Boundary condition
    0              0              0
    .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
    .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00

```

```

      0          0          0
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
      0          0          0
    .500000D+00 .000000D+00 .000000D+00
    .500000D+00 .000000D+00 -.500000D+00
      1          0          1
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
      1          0          1
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
      0          0          0
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00
    .000000D+00 .000000D+00 .000000D+00

```

Calculation parameters par= .100000E+17

kintm = 4 kints = 4

***** ElipsDef Geometry Varianf *****

RDEF= 1.50000 DDEF= .000000

AEL= 2.00000 BEL= .000000

SubPROGRAM MeshSimp

Partitioning NxDef= 20 NxOut= 40 Nx=120 Nz= 40

DIMENSIONS !!!

NU= 4961 NE= 4800 NP= 14883

NB= 43 NB3= 129 NG= 320

JJE=1949673 NPK= 29766

FORMING OF MATRIX time= 1.48 sec

SOLVING OF SYSTEM time= 58.0 sec

FORMING OF MATRIX time= 1.37 sec

SOLVING OF SYSTEM time= 59.0 sec

SubPROGRAM StrBord

Border STRESSES for fi= 1.57

NOTCH CENTER

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s13
41	1.00	1.00	.360588E-02 .157800E-02	-.592832E-02 -.104911E-17	2.75696 -.153065E-17

BORDER STRESSES

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s31
1	1.00	.125E-01	.387356E-02 .351402E-07	.267707 -.313697E-18	3.09525 -.573251E-18
2	1.00	.375E-01	.387355E-02 .122090E-06	.267358 -.941124E-18	3.09513 -.573198E-18
3	1.00	.625E-01	.387352E-02 .259256E-06	.266658 -.156865E-17	3.09487 -.573093E-18
4	1.00	.875E-01	.387349E-02 .480811E-06	.265608 -.219632E-17	3.09449 -.572935E-18
5	1.00	.112	.387344E-02 .821978E-06	.264205 -.282417E-17	3.09397 -.572722E-18
6	1.00	.137	.387337E-02 .131948E-05	.262446 -.345220E-17	3.09332 -.572455E-18
7	1.00	.163	.387328E-02 .201200E-05	.260329 -.408036E-17	3.09252 -.572130E-18
8	1.00	.188	.387316E-02 .294067E-05	.257850 -.470857E-17	3.09157 -.571747E-18
9	1.00	.212	.387301E-02 .414962E-05	.255005 -.533666E-17	3.09046 -.571303E-18
10	1.00	.238	.387282E-02 .568652E-05	.251790 -.596440E-17	3.08918 -.570796E-18
11	1.00	.262	.387259E-02 .760326E-05	.248198 -.659147E-17	3.08772 -.570223E-18

12	1.00	.287	.387230E-02 .995658E-05	.244225 -.721743E-17	3.08607 -.569581E-18
13	1.00	.312	.387194E-02 .128088E-04	.239865 -.784174E-17	3.08420 -.568866E-18
14	1.00	.338	.387149E-02 .162289E-04	.235110 -.846367E-17	3.08210 -.568075E-18
15	1.00	.363	.387095E-02 .202929E-04	.229955 -.908234E-17	3.07976 -.567203E-18
16	1.00	.387	.387027E-02 .250856E-04	.224393 -.969666E-17	3.07715 -.566246E-18
17	1.00	.413	.386944E-02 .307010E-04	.218416 -.103053E-16	3.07424 -.565198E-18
18	1.00	.438	.386843E-02 .372439E-04	.212019 -.109067E-16	3.07101 -.564054E-18
19	1.00	.463	.386719E-02 .448311E-04	.205193 -.114988E-16	3.06742 -.562809E-18
20	1.00	.488	.386567E-02 .535927E-04	.197934 -.120793E-16	3.06345 -.561456E-18
21	1.00	.513	.386381E-02 .636733E-04	.190236 -.126454E-16	3.05904 -.559989E-18
22	1.00	.538	.386153E-02 .752335E-04	.182095 -.131937E-16	3.05416 -.558402E-18
23	1.00	.563	.385874E-02 .884506E-04	.173508 -.137203E-16	3.04877 -.556690E-18
24	1.00	.588	.385533E-02 .103519E-03	.164475 -.142203E-16	3.04279 -.554847E-18
25	1.00	.613	.385113E-02 .120651E-03	.154999 -.146880E-16	3.03617 -.552870E-18
26	1.00	.637	.384598E-02 .140070E-03	.145085 -.151165E-16	3.02885 -.550757E-18
27	1.00	.662	.383962E-02 .162012E-03	.134746 -.154974E-16	3.02074 -.548512E-18
28	1.00	.687	.383177E-02 .186709E-03	.123999 -.158208E-16	3.01174 -.546144E-18
29	1.00	.712	.382205E-02 .214374E-03	.112870 -.160744E-16	3.00177 -.543673E-18

2. Циліндричний дефект з еліпсоїдальним дном

2.1. Вхідні дані

0.300000D+0	RNU	механічні параметри
1.000000D+0	E	
0.000000D+0	X0	параметри прямокутника
36.000000D+0	X2	
1.000000D+0	Y2	
2	idef	параметри дефекта
0.600000D+0	ael	
0.200000D+0	bel	
0.600000D+0	rdef0	
0.100000D+0	drd	
0.600000D+0	rdeff	
0.800000D+0	ddef0	
0.100000D+0	ddd	
0.800000D+0	ddeff	
0.600000D+0	RrGage	

```

0.800000D+0      ZzGage
1.000000D+0      FiGage в долях Pi/2
1.000000D+0      AnGage в долях Pi/2
0.100000D+0      rLGage
0.100000D+0      Wigage
3                ISec
0.800000D+0      Tsec
2.000000D+0      XPar
2.000000D+0      YPar
1.000000D+0      ZPar
40              Nxv
40              Nyv
20              Nzv
1              IndHole
1.000000D+0      signal навантаження
0.000000D+0      sigma2
10             NZ   параметри сітки
4              MeshCond
2              NFI  параметри рівня виводу результатів
0              KPmesh сітка
0              KPdis переміщень
1              KPse  напружень по елементах
1.001000D+0      xsig
1              KPsu  напружень по вузлах

```

2.2. Фрагмент виводу результатів

```

PROGRAM ElipsDef
DATE - 2001.11.11
TIME - 21.28.14

SubPROGRAM VVIDEF
  Mechanical parameters  RNU= .300000      E= 1.00000
  Geometry of rectangle  X0= .000000      X2= 36.0000
  z2= 1.00000
  Defect type  idf = 2
    ael = .600000      bel = .200000

  Variants  rdef0 = .600000      drd= .100000      rdef= .600000
            ddef0 = .800000      ddd= .100000      ddef= .800000

  Load stresses  signal= 1.00000      sigma2= .000000

  Type of mesh  imesh= 2  MeshCond= 4

  Thickness partitioning  Nz= 10
  PRINT parameters
  kpmesh= 0  kpdis= 0  kpse= 0  kpsu = 2
  xsig = 1.00100

  Fourier series par.  KFUR= 2  increment  KKD= 2
  Angles of normal in corner points
  1.57080      1.57080      .000000      .000000

  Boundary condition
  1              0              0
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  0              0              0
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  0              0              0
  .500000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  .500000D+00    .000000D+00    -.500000D+00
  0              0              0
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  0              1              0
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00
  .000000D+00    .000000D+00    .000000D+00

```

0	1	0
.000000D+00	.000000D+00	.000000D+00
.000000D+00	.000000D+00	.000000D+00
0	0	0
.500000D+00	.000000D+00	.000000D+00
.500000D+00	.000000D+00	-.500000D+00
0	1	1
.000000D+00	.000000D+00	.000000D+00
.000000D+00	.000000D+00	.000000D+00

Calculation parameters par= .100000E+17

kintm = 4 kints = 4

***** ElipsDef Geometry Varianf *****

RDEF= .600000	DDEF= .800000
AEL= .600000	BEL= .200000

SubPROGRAM MeshCyl

Partitioning NxDef= 24 NxOut= 48 Nx= 96 Nz= 40

DIMENSIONS !!!

NU= 3401 NE= 3264 NP= 10203

NB= 43 NB3= 129 NG= 272

JJE=1336593 NPK= 20406

FORMING OF MATRIX time= 1.10 sec

SOLVING OF SYSTEM time= 22.2 sec

FORMING OF MATRIX time= .830 sec

SOLVING OF SYSTEM time= 24.3 sec

SubPROGRAM StrBord

Border STRESSES for fi= 1.57

NOTCH CENTER

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s13
17	.000	.200	.104429	.160101E-02	2.25943
.606361E-02	.162219E-18	-.132114E-15			

BORDER STRESSES

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s31
1	.000	.625E-02	-.670546	-.102100E-02	1.06312
.685091E-02	.188043E-18	-.106059E-15			
2	.000	.187E-01	-.614130	-.343126E-03	1.13550
.764967E-02	.184972E-18	-.107091E-15			
3	.000	.312E-01	-.562423	.282084E-02	1.20483
.764177E-02	.186113E-18	-.108182E-15			
4	.000	.437E-01	-.513146	.708396E-02	1.27295
.758762E-02	.184942E-18	-.109344E-15			
5	.000	.562E-01	-.465512	.119390E-01	1.34068
.755015E-02	.184124E-18	-.110581E-15			
6	.000	.687E-01	-.419016	.170685E-01	1.40859
.752622E-02	.183172E-18	-.111898E-15			
7	.000	.812E-01	-.373253	.221666E-01	1.47717
.750816E-02	.182048E-18	-.113301E-15			
8	.000	.937E-01	-.327850	.269230E-01	1.54687
.749036E-02	.180711E-18	-.114796E-15			
9	.000	.106	-.282440	.310147E-01	1.61817
.746963E-02	.179120E-18	-.116388E-15			
10	.000	.119	-.236651	.341032E-01	1.69153
.744478E-02	.177239E-18	-.118083E-15			
11	.000	.131	-.190095	.358312E-01	1.76746
.741669E-02	.175039E-18	-.119890E-15			
12	.000	.144	-.142353	.358192E-01	1.84649
.738878E-02	.172483E-18	-.121814E-15			
13	.000	.156	-.929518E-01	.336583E-01	1.92921
.736733E-02	.169566E-18	-.123864E-15			

14	.000	.169	-.412999E-01	.288862E-01	2.01633
	.735484E-02	.166343E-18	-.126047E-15		
15	.000	.181	.134953E-01	.208418E-01	2.10881
	.729606E-02	.161503E-18	-.128373E-15		
16	.000	.194	.738375E-01	.807393E-02	2.20876
	.647822E-02	.161978E-18	-.130856E-15		
17	.125E-01	.200	.998264E-01	.135773E-02	2.25588
	.347343E-02	-.792620E-18	-.132002E-15		
18	.375E-01	.200	.914621E-01	.693210E-03	2.25018
			.171833E-02	-.270229E-17	-.131812E-15
19	.625E-01	.201	.853011E-01	.108438E-02	2.24452
			.255539E-02	-.455752E-17	-.131475E-15
20	.875E-01	.202	.768736E-01	.112959E-02	2.23764
			.317530E-02	-.640894E-17	-.130981E-15
21	.113	.204	.660934E-01	.118633E-02	2.22920
			.343971E-02	-.826783E-17	-.130331E-15

3. Дефект у формі пів-еліпсоїда обертання

3.1. Вхідні дані

Вхідні дані для цього випадку наступні (файл InDatE1)

0.300000D+0	RNU	механічні параметри
1.000000D+0	E	
0.000000D+0	X0	параметри прямокутника
36.000000D+0	X2	
1.000000D+0	Y2	
3	idef	параметри дефекта
0.600000D+0	ael	
0.800000D+0	bel	
0.600000D+0	rdef0	
0.100000D+0	drd	
0.600000D+0	rdef1	
0.800000D+0	ddef0	
0.100000D+0	ddd	
0.800000D+0	ddef1	
0.651000D+0	RrGage	Параметри тензодатчика
1.000000D+0	ZzGage	
1.000000D+0	FiGage	
1.000000D+0	AnGage	
0.100000D+0	rLGage	
0.100000D+0	Wigage	
3	ISec	
0.100000D+0	Tsec	
2.000000D+0	XPar	
2.000000D+0	YPar	
1.000000D+0	ZPar	
40	Nxv	
40	Nyv	
20	Nzv	
1	IndHole	
1.000000D+0	sigma1	навантаження
0.000000D+0	sigma2	
10	NZ	параметри сітки
4	MeshCond	
2	NFI	параметри рівня виводу результатів
0	KPmesh	сітка
0	KPdis	переміщень
0	KPse	напружень по елементах
1.001000D+0	xsig	

§3.2. Фрагмент виводу результатів:

```

PROGRAM ElipsDef
DATE - 2001.11.11
TIME - 21.31.41
SubPROGRAM VVIDEF
    Mechanical parameters RNU= .300000      E= 1.00000

    Geometry of rectangle X0= .000000      X2= 36.0000
    Z2= 1.00000
    Defect type idef = 3
        ael = .600000      bel = .800000

    Variants rdef0 = .600000      drd= .100000      rdeff= .600000
            ddef0 = .800000      ddd= .100000      ddeff= .800000

    Load stresses sigma1= 1.00000      sigma2= .000000

    Type of mesh imesh= 3 MeshCond= 4

    Thickness partitioning Nz= 10
    PRINT parameters
    kpmesh= 0 kpdis= 0 kpse= 0 kpsu = 2
    xsig = 1.00100

    Fourier series par. KFUR= 2 increment KKD= 2
    Angles of normal in corner points
    1.57080      1.57080      .000000      .000000

    Boundary condition
        1          0          0
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        0          0          0
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        0          0          0
        .500000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .500000D+00      .000000D+00      -.500000D+00
        0          0          0
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        0          1          0
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        0          1          0
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        0          0          0
        .500000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .500000D+00      .000000D+00      -.500000D+00
        0          1          1
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00
        .000000D+00      .000000D+00      .000000D+00

    Calculation parameters par= .100000E+17
    kintm = 4 kints = 4
    ***** ElipsDef Geometry Varianf *****
        RDEF= .600000      DDEF= .800000

        AEL= .600000      BEL= .800000

    SubPROGRAM MeshVar
    Partitioning Nhmin= 8 Ks= 49
    Relative uniform thickness division kh00= 7
    Quarter of Elips division
        x          y
        .000000      .200000
        .220693E-01      .200541
        .441079E-01      .202165
        .660301E-01      .204859
        .877963E-01      .208611
        .109358      .213400

```

.130670	.219202
.151689	.225988
.172376	.233726
.192698	.242381
.212621	.251915
.232120	.262292
.251170	.273470
.269752	.285411
.287849	.298075
.305447	.311424
.322536	.325419
.339106	.340024
.355153	.355203
.370671	.370922
.385658	.387148
.400113	.403850
.414036	.420998
.427427	.438564
.440289	.456521
.452625	.474844
.464436	.493510
.475726	.512495
.486500	.531778
.496760	.551339
.506511	.571159
.515757	.591220
.524502	.611504
.532749	.631995
.540561	.652836
.547928	.674015
.554844	.695522
.561302	.717346
.567293	.739476
.572810	.761902
.577845	.784613
.582389	.807598
.586434	.830846
.589972	.854347
.592992	.878088
.595487	.902059
.597445	.926248
.598857	.950642
.599712	.975231
.600000	1.000000

Real thickness division kh= 8
Parameters of division kll= 19 ny= 31

Division of C-zone

DIMENSIONS !!!

NU= 2370 NE= 2252 NP= 7110
NB= 50 NB3= 150 NG= 234

JJE=1080720 NPK= 14220

FORMING OF MATRIX time= .660 sec
SOLVING OF SYSTEM time= 28.3 sec
FORMING OF MATRIX time= .770 sec
SOLVING OF SYSTEM time= 27.8 sec

SubPROGRAM StrBord

Border STRESSES for fi= 1.57

NOTCH CENTER

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s13
9	.000	.200	.471571E-01	.192928E-01	2.61804
	.659370E-02	.270759E-18	-.157916E-15		

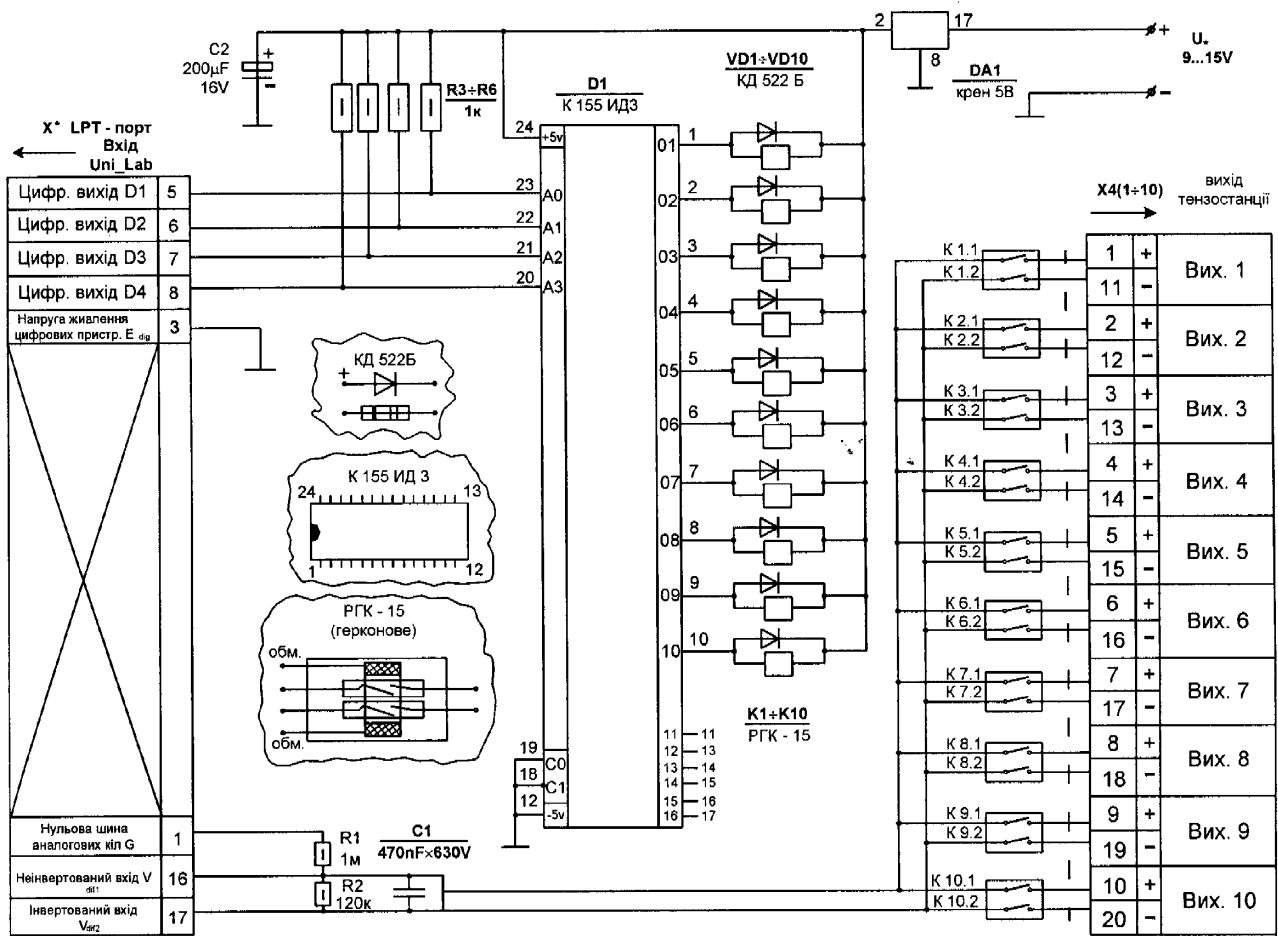
BORDER STRESSES

IG	X	Y	s11 s12	s22 s23	s33 s31
1	.000	.145E-01	-.680880	.420441E-02	.876846
	.104894E-01	.582823E-18	-.951779E-16		
2	.000	.429E-01	-.558441	.215290E-01	1.08214
	.112198E-01	.578157E-18	-.100341E-15		
3	.000	.702E-01	-.460889	.532021E-01	1.26466
	.109642E-01	.572388E-18	-.105598E-15		
4	.000	.962E-01	-.375688	.867281E-01	1.44470
	.107038E-01	.552900E-18	-.111454E-15		
5	.000	.121	-.295470	.113480	1.63712

	.103480E-01	.522798E-18	-.118376E-15		
6	.000	.145	-.213335	.124456	1.85678
	.984330E-02	.477602E-18	-.126863E-15		
7	.000	.167	-.121884	.108412	2.12057
	.913077E-02	.405780E-18	-.137515E-15		
8	.000	.189	-.926690E-02	.490399E-01	2.45199
	.744055E-02	.315828E-18	-.151106E-15		
9	.110E-01	.200	.427966E-01	.201035E-01	2.61086
	.479909E-02	-.347838E-17	-.157118E-15		
10	.331E-01	.201	.368958E-01	.202402E-01	2.60480
	.117061E-02	-.109735E-16	-.155864E-15		
11	.551E-01	.204	.328878E-01	.197732E-01	2.59850
	.109397E-02	-.181468E-16	-.153623E-15		
12	.769E-01	.207	.285916E-01	.189384E-01	2.59188
	.173078E-02	-.249601E-16	-.150408E-15		
13	.986E-01	.211	.239389E-01	.178301E-01	2.58440
	.276171E-02	-.313216E-16	-.146326E-15		

Додаток Б

Принципова електрична схема розробленого пристрою Commutator_v.1



Додаток В

Розрахунок похибки при експериментальних вимірюваннях напружень в околі дефекту

Вихідні дані для 4 експериментів

$nt = 4$ - кількість експериментів $i := 0..nt - 1$

$xt := (225 \ 228 \ 235 \ 237)$ - результати вимірювань

Обробка результатів

$$\alpha.st := \frac{\sum_{i=0}^{nt-1} xt_{0,i}}{nt} \quad \alpha.st = 231.25 \quad \text{- математичне очікування або середнє значення}$$

$$st := \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{nt-1} (xt_{0,i} - \alpha.st)^2}{nt - 1}} \quad st = 5.679 \quad \text{- середньоквадратичне відхилення}$$

$$st2 := st^2 \quad st2 = 32.25 \quad \text{- дисперсія}$$

$$\alpha.nt10 := \begin{pmatrix} 0.6872 \\ 0.1677 \end{pmatrix} \quad \text{- коефіцієнти для визначення характеристичного числа b}$$

$$bt10 := \alpha.nt10_0 \cdot (xt_{0,3} - xt_{0,0}) + \alpha.nt10_1 \cdot (xt_{0,2} - xt_{0,1})$$

$$bt10 = 9.42 \quad \text{- характеристичне число b}$$

$$wt := \frac{bt10^2}{\sum_{i=0}^{nt-1} (xt_{0,i} - \alpha.st)^2} \quad wt = 0.917 \quad \text{- критерій нормального розподілу}$$

$$tt = 3.18 \quad \text{- критерій Стюдента}$$

$$\Delta x := tt \cdot \frac{st}{\sqrt{nt}} \quad \Delta x = 9.029 \quad \text{- довірчий інтервал}$$

$$\delta t := \frac{\Delta x \cdot 2}{\alpha.st} \cdot 100 \quad \delta t = 7.809 \quad \text{- похибка вимірювань}$$

$$TAB := (xt_{0,0} \ xt_{0,1} \ xt_{0,2} \ xt_{0,3} \ \alpha.st \ st2 \ \Delta x \ \delta t)$$

TAB =		0	1	2	3	4	5	6	7
	0	225	228	235	237	231.3	32.3	9	7.8

Додаток Г

Акти впровадження наукових досліджень у виробництво

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор

Філії УМГ “Прикарпаттрансгаз”

ДК “Укртрансгаз”

НАК “Нафтогаз України”

В.П. Рудко

“21” 2003 р.

АКТ

про впровадження методики визначення напруженого стану магістральних газопроводів з дефектами типу корозійних виразок-каверн в околі зварних стикових з'єднань

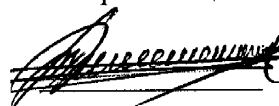
Національний університет “Львівська політехніка” разом з Філією УМГ “Прикарпаттрансгаз” ДК “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України” застосували методику визначення напруженого стану магістральних газопроводів з дефектами типу корозійних виразок, розроблену здобувачем Банахевичем Ю.В. під керівництвом проф., д.ф-м.н. Осадчука В.А. при оцінці технічного стану магістральних газопроводів.

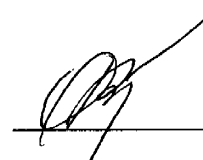
Запропонована методика і пакет прикладних програм Def Wiew використовувались для визначення максимальних напружень і коефіцієнтів концентрації в околі поверхневих дефектів типу виразок-каверн магістрального газопроводу “Союз”, що були виявлені під час внутрішньотрубного діагностування інтелектуальним поршнем фірми “Rosen Engineering GmbH”.

Проведені дослідження та розрахунки з оцінки технічного стану МГ “Союз” (км 2566,5) на ділянці УМГ “Прикарпаттрансгаз”. Оцінено технічний стан ділянок МГ з корозійними дефектами розміщеними в зоні зварного кільцевого шва, визначені коефіцієнти запасу міцності газопроводу з врахуванням залишкових технологічних напружень та обґрунтовані рекомендації щодо технології та черговості проведення ремонтів небезпечних ділянок МГ “Союз”.

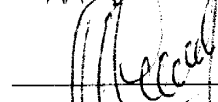
Очікуваний економічний ефект від впровадження розробленого методу та пакету прикладних програм Def Wiew для визначення напруженого стану трубопроводів в околі дефектів типу виразок-каверн біля зварних стикових з'єднань при оцінці технічного стану ділянки МГ “Союз”–2566,5 км складає 189,6 тис.грн.

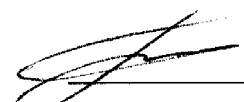
Заступник директора
з виробництва

 Степюк М.Д.

 Осадчук В.А.

Начальник виробничого
Відділу з експлуатації МГ і ГРС

 Сидор М.Д.

 Банахевич Ю.В.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор

Філії УМГ “ Прикарпаттрансгаз”

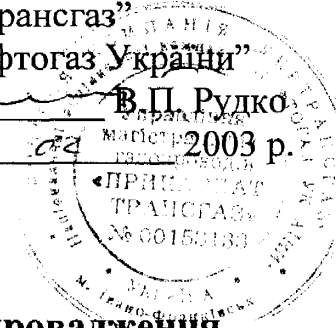
ДК “Укртрансгаз”

НАК “Нафтогаз України”

В.П. Рудко

“ 21 ”

2003 р.



РОЗРАХУНОК

очікуваного економічного ефекту від впровадження методики визначення напруженого стану магістральних газопроводів з дефектами типу корозійних виразок-каверн в околі зварних стикових з'єднань

Економічний ефект від впровадження методики визначення напруженого стану магістральних газопроводів з дефектами типу корозійних виразок-каверн в околі зварних стикових з'єднань досягається за рахунок скорочення витрат газу за час проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Застосування запропонованої методики і програмного забезпечення Def View дозволило визначити напружений стан в околі корозійного дефекту, що знаходився в зоні зварного стикового шва з врахуванням залишкових напружень і завчасно провести ремонтні роботи без стравлювання газу в МГ „Союз”.

Економія за рахунок виключення втрат газу за час проведення ремонтно-відновлювальних робіт на газопроводі „Союз” (Км 2566.5), виражається формулою:

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

де $C_{\text{пр}}$ - діюча оптова ціна промисловості на газ, (200 грн./тис.м³);

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

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

де D - внутрішній діаметр дільниці (1,383 м.);

L - протяжність дільниці, що відключається (15,8 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 - 1,033 кгс/см²;

$Z_{\text{сер}}$ - середній коефіцієнт стискання газу на дільниці, що відключається (0,901);

$P_{\text{сер}}$ - середній тиск в дільниці, що стравлюється (КС „Богородчани” – КС „Хуст”)-40 кгс/см².

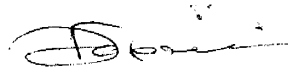
$$Q_{\text{вип.}} = \frac{3,14 \times 1,383^2}{4} \times 15,8 \times 10^3 \times 40 \times 10^{-4} \times \frac{273,15}{293,76 \times 1,033 \times 10^{-4} \times 0,901} = 948 \times 10^3 \text{ м}^3.$$

Тоді

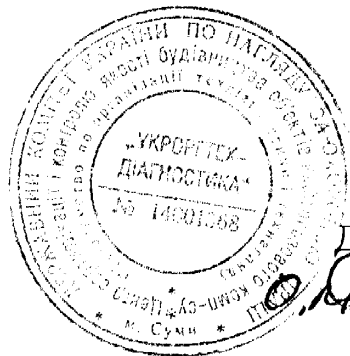
$$E_{\text{втр}} = 948,0 \times 200 = 189600 \text{ грн.}$$

Таким чином, очікуваний економічний ефект від впровадження методики визначення напруженого стану МГ з дефектами типу корозійних виразок-каверн в околі зварних стикових з'єднань на ділянці 2566,5 км. МГ „Союз" складе 189,6 тис. грн. (Сто вісімдесят дев'ять тисяч шістсот гривень).

Начальник
планово-економічного відділу



Салижин Р.М.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор

ДП “Укроргтехдіагностика”

О.В. Медведик

“ 7 ” лютого 2003 р.

АКТ

про впровадження методики визначення напруженого стану в стикових з'єднаннях магістральних трубопроводів з врахуванням структурно-фазових змін матеріалу в околі зварних швів

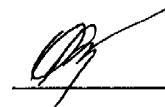
Національний університет “Львівська політехніка” разом з Державним підприємством “Укроргтехдіагностика”, застосував методику визначення напруженого стану в стикових з'єднаннях магістральних трубопроводів з врахуванням структурно-фазових змін матеріалу в околі зварних швів, розроблену здобувачем Банахевичем Ю.В. під керівництвом проф., д.ф-м.н. Осадчука В.А. при проведенні технічного нагляду під час будівництва нафтопроводу “Одеса-Броди”.

Застосування запропонованої методики і програмного забезпечення для її реалізації у промислових умовах дозволило оперативно контролювати залишкові напруження в околі стикових зварних швів з врахуванням неоднорідності їх розподілу під давачами приладів для вимірювань і структурно-фазових перетворень в зоні термічного впливу під час монтажу нафтопроводу “Одеса-Броди”. На основі досліджень з використанням теоретичних засад методу умовних пластичних деформацій і експериментальної інформації, отриманої за допомогою електромагнітного методу було оцінено вплив різних технологічних факторів на величину залишкових напружень в околі зварних стикових з'єднань і запропоновані рекомендації з їх зменшення.


Зменшення залишкових напружень в околі зварних з'єднань дозволить знизити ризик непередбачених аварійних ситуацій і продовжити термін експлуатації стикових з'єднань нафтопроводу “Одеса-Броди”. Очікуваний економічний ефект від реалізації запропонованих рекомендацій складає 170 тис. грн.

Заступник директора

 І.І. Бойко

 Осадчук В.А.

Завідуючий лабораторією

 Б.В. Слободян

 Банахевич Ю.В.