



**ТИМЧИК Григорій Семенович**  
докт. техн. наук, професор,  
декан приладобудівного факультету  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського».

**Сфера наукових інтересів:**  
створення спеціалізованих лазерних  
інформаційно-вимірювальних систем  
для контролю технічного стану і параметрів  
динамічних об'єктів, створення нового класу  
спектрально-кореляційних систем  
на основі пасивних резонаторів  
фабри-Перро для оперативного контролю  
параметрів якості деталей і  
стану технологічного обладнання  
у прецизійному приладобудуванні.  
Автор понад 463 наукових публікацій,  
43 наукових монографій  
та підручників, і 78 винаходів.



**ПОДОЛЯН Олександр Олександрович**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедри виробництва приладів  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського».

**Сфера наукових інтересів:** технології ремонту  
магістральних трубопроводів,  
прилади та системи неруйнівного контролю.  
Автор понад 200 наукових публікацій.

**Контроль якості монтажу муфт на магістральний трубопровід**

**О.О.Подольан  
Г.С.Тимчик**

**О.О.Подольан  
Г.С.Тимчик**

# **КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ МОНТАЖУ МУФТ НА МАГІСТРАЛЬНИЙ ТРУБОПРОВІД**

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**О. О. Подолян, Г. С. Тимчик**

# **Контроль якості монтажу муфт на магістральний трубопровід**

***Монографія***

*Рекомендовано Вченою радою  
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

*Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 2 від 10 лютого 2020 р.)*

**Рецензенти:**

*В. П. Квасніков*, д-р техн. наук, проф., заслуж. метролог України,  
Національний авіаційний університет

*В. П. Приміський*, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., заслуж. винахідник України  
Товариство з обмеженою відповідальністю «Автоекоприлад»

**Відповідальний редактор**

*В. С. Антонюк*, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Подолян О. О.**

П44      Контроль якості монтажу муфт на магістральний трубопровід :  
монографія / О. О. Подолян, Г. С. Тимчик. – Київ : КПІ ім. Ігоря  
Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2020. – 180 с.

**ISBN 978-966-622-984-0**

Наведено аналіз сучасного стану методів муфтового ремонту діючих трубопроводів, методів математичного опису напружено-деформованого стану трубопроводів, зміцнених муфтою з наповненням, методів контролю якості робіт під час муфтового ремонту трубопроводів і, зокрема, магістральних газопроводів високого тиску.

Результати досліджень присвячено розробленню і обґрунтуванню способу контролю якості монтажу муфти на діючому трубопроводі за допомогою порівняння поточних значень інформаційних параметрів у процесі виконання робіт, які характеризують фактичний стан контрольованої системи із значеннями, що забезпечують максимальну ефективність муфтового ремонту.

Удосконалено системи контролю якості монтажу муфти на діючому магістральному трубопроводі, розроблено рекомендації щодо вдосконалення способів ремонту магістральних трубопроводів, які відповідають вимогам з організації контролю і підвищення ефективності посилення труби.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, фахівців нафтогазової галузі, а також студентів та аспірантів закладів вищої освіти з технологічного та інженерного напрямку підготовки.

**УДК 621.643.413:620.179**

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА .....</b>	<b>6</b>
<b>1. АНАЛІЗ СТАНУ МЕТОДІВ МУФТОВОГО РЕМОНТУ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПОСИЛЕННЯ ТРУБОПРОВОДІВ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Аналіз стану та перспектив розвитку муфтового ремонту діючих трубопроводів.....	8
1.2. Контроль якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі.....	18
1.2.1. Ділянка трубопроводу, що посилена муфтової конструкцією, як об'єкт контролю.....	18
1.2.2. Методи контролю якості робіт при муфтовому ремонті трубопроводів.....	19
1.2.3. Система контролю якості монтажу муфти на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском.....	20
<b>2. ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ КЛЕЄЗВАРНОЇ МУФТИ НА ДІЮЧОМУ ТРУБОПРОВОДІ.....</b>	<b>22</b>
2.1. Розробка структурної схеми системи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском.....	22
2.2. Теоретичні дослідження ділянки трубопроводу, посиленого клеєзварною муфтою, як об'єкта контролю.....	23
2.2.1. Вибір критерію оцінки ефективності посилення трубопроводу за допомогою муфти з внутрішнім заповненням.....	23
2.2.2. Розробка математичної моделі напружено-деформованої ділянки трубопроводу, посиленого муфтою з внутрішнім наповненням.....	25
2.2.3. Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу технологічних параметрів процесу формування підмуфтового шару.....	31
2.2.4. Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу геометричних параметрів трубопроводу і муфтової конструкції.....	46



2.2.5.	Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу формованого підмуфтового шару.....	49
2.3.	Розробка вимог до обсягу контролю якості монтажу клеєзварної муфти на трубопроводі.....	51
2.4.	Розробка способів контролю якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском.....	54
2.4.1.	Контроль тиску.....	54
2.4.2.	Контроль механічних кільцевих напружень.....	58
2.4.3.	Спосіб контролю якості монтажу зварної муфти, що заповнюється розплавленим металом.....	61
2.5.	Розробка алгоритму обробки даних в обчислювачі системи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском.....	65
<b>3.</b>	<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ КОНТРОЛЮ, НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОСИЛЕННЯ ТРУБОПРОВОДУ.....</b>	<b>71</b>
3.1.	Методи експериментальних досліджень.....	71
3.2.	Загальна характеристика експериментальних досліджень.....	71
3.2.1.	Випробувальний стенд.....	72
3.2.2.	Розробка клеєзварної муфти для експериментальних досліджень.....	73
3.2.3.	Розробка технології монтажу клеєзварної муфти на стенді для експериментальних досліджень.....	79
3.2.4.	Розробка методики проведення експерименту.....	82
3.2.5.	Виготовлення та монтаж на резервуарі стенду розробленої клеєзварної муфти.....	85
3.2.6.	Вимірювальні прилади, використовувані для випробувань.....	86
3.2.7.	Використовувані матеріали.....	89
3.3.	Проведення експериментальних досліджень.....	89
3.4.	Результати експериментальних досліджень.....	98
3.5.	Обробка результатів експерименту.....	100
<b>4.</b>	<b>РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВДОСКОНАЛЕННЮ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ КЛЕЄЗВАРНОЇ МУФТИ ТА СПОСОБІВ МУФТОВОГО РЕМОНТУ НА ДІЮЧОМУ ТРУБОПРОВОДІ.....</b>	<b>110</b>

4.1.	Розробка способів контролю якості заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною.....	110
4.1.1.	Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору муфт British Gas.....	111
4.1.2.	Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю.....	112
4.1.3.	Експериментальна перевірка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю.....	121
4.1.4.	Експериментальні дослідження можливості контролю якості формування підмуфтового шару розплавленим металом за допомогою ЕМА-методу неруйнівного контролю.....	122
4.1.5.	Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору муфт з діамантного матеріалу за допомогою магнітного методу неруйнівного контролю.....	139
4.1.6.	Розробка способу контролю герметичності підмуфтового простору.....	143
4.2.	Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім наповненням.....	147
4.2.1.	Підвищення ефективності муфтового посилення трубопроводу шляхом зменшення глибини підмуфтового простору.....	147
4.2.2.	Підвищення ефективності посилення протяжних ділянок трубопроводу шляхом встановлення складових муфт з мінімізованою глибиною підмуфтового простору.....	149
4.2.3.	Підвищення ефективності посилення трубопроводу шляхом збільшення модуля пружності підмуфтового шару.....	154
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>		<b>163</b>

## ПЕРЕДМОВА

Довжина магістральних трубопроводів, що експлуатуються на території України, перевищує 42 000 км, основну частину з яких (близько 35 000 км) становлять магістральні газопроводи, меншу – нафтопроводи (3 700 км) і продуктопроводи (3 400 км).

Система транзитних газопроводів України, яка з'єднана з магістральними газопроводами Білорусії, Угорщини, Молдови, Польщі, Росії, Румунії, Словаччини, донедавна забезпечувала постачання більш як 93 % російського газового експорту в країни Європи. І, хоча після здачі в експлуатацію «Північного потоку» обсяги транзиту газу по території України знизилися, вона залишається важливою ланкою в системі енергетичної безпеки Євросоюзу.

Значна частина магістральних газопроводів експлуатується понад 30 років і потребує відновлювального ремонту. При періодичній діагностиці стану газопроводів виявляється 50–60 дефектів на 1 км довжини, значна частина з яких є неприпустимими. Класичний метод ремонту, що передбачає зупинку трубопроводу з наступною заміною його дефектної ділянки, вимагає значних фінансових витрат і пов'язаний з вимушеним простоєм трубопроводу і екологічними порушеннями. Останнє обумовлює розвиток методів ремонту газопроводів під тиском без виводу їх з експлуатації. Основним методом, що не вимагає припинення транспортування газу є ремонт за допомогою муфт із наповненням (клеєзварних муфт), від правильності монтажу яких залежить ефективність, безпека експлуатації, надійність і довговічність відремонтованого трубопроводу високого тиску.

В даний час практично відсутній єдиний підхід до організації оперативного контролю якості монтажу клеєзварних муфт на діючому магістральному трубопроводі, що забезпечує досягнення муфтовою конструкцією поставлених цілей щодо посилення трубопроводу, практично відсутні науково обґрунтовані вимоги до оптимізації технологічних параметрів процесу монтажу даних муфт.

У зв'язку з цим проведення досліджень і розробки систем контролю якості монтажу клеєзварних муфт на діючому магістральному трубопроводі, оптимізації параметрів технологічних операцій і конструкцій муфт, є важливим і актуальним завданням.

Запропоновані в монографії обґрунтовані і експериментально підтверджені способи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючий трубопровід, що дозволяють досягти максимальної ефективності посилення трубопроводу без виведення його з експлуатації.

Розроблені муфтові конструкції, що забезпечують якісний контроль їх встановлення, технології їх монтажу, способи контролю запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір під оптимальним тиском, спосіб контролю герметичності підмуфтового простору увійшли до галузових будівельних норм ГБН В.3.1-00013741-12: 2011 «Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації», «Технологічний регламент підвищення несучої здатності труби та категорійності діляниць магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт», «Муфти ремонтні. Герметизація муфт поліуретановим складом. Технологічна інструкція» і набули широкого поширення при виконанні ремонтних робіт на магістральних газопроводах в підрозділах ДК «Укртрансгаз » НАК «Нафтогаз України».

# 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МУФТОВОГО РЕМОНТУ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ПОСИЛЕННЯ ТРУБОПРОВОДІВ

## 1.1. Аналіз стану та перспектив розвитку муфтового ремонту трубопроводів

Як і практично будь-який технічний об'єкт магістральні трубопроводи України, з точки зору теорії надійності [59], характеризуються трьома етапами (рис. 1.1.1) [28, 33, 60, 61].

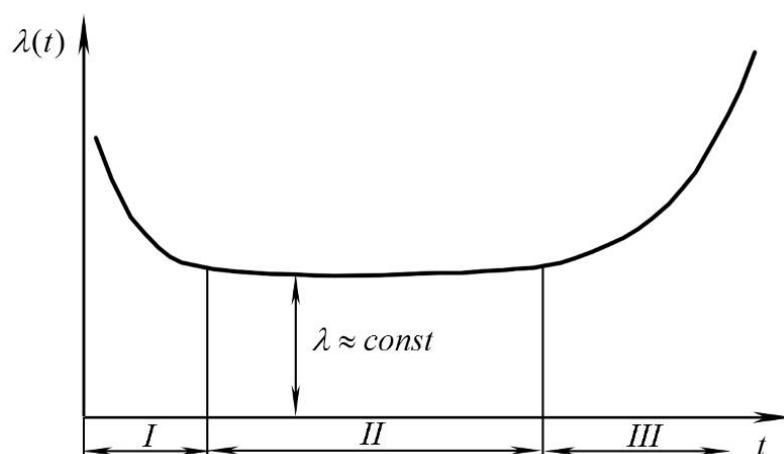


Рис. 1.1.1. Типова залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації об'єкта

На першому етапі, що зветься періодом приробітки або періодом ранніх відмов, спостерігається спадна інтенсивність відмов, що викликаються, в основному, конструктивними або виробничими дефектами. Другий етап, так званий етап нормальної експлуатації, характеризується постійністю інтенсивності відмов. На третьому етапі під кінець нормативного терміну служби трубопроводів (33 роки), так званому періодом старіння, зносу або пізнім етапом експлуатації [28], інтенсивність відмов різко зростає. Відмови на третьому етапі, в основному, обумовлені проявом корозійних або втомних дефектів [181].

За даними [28, 181] 80 % аварій спостерігається на газопроводах, що експлуатуються понад 20 років (рис. 1.1.2). У той же час, велика частина таких техногенних об'єктів як магістральні газопроводи експлуатується понад 20 років [14] і, за термінами експлуатації мають такий вигляд, що проілюстрований на рис. 1.1.3 (експлуатуються менше 10 років – 9 %, від 11 до 20 років – 27 %, від 21 до 32 років – 31 %, понад 33 років (перевищення нормативного терміну експлуатації) – понад 33 %).

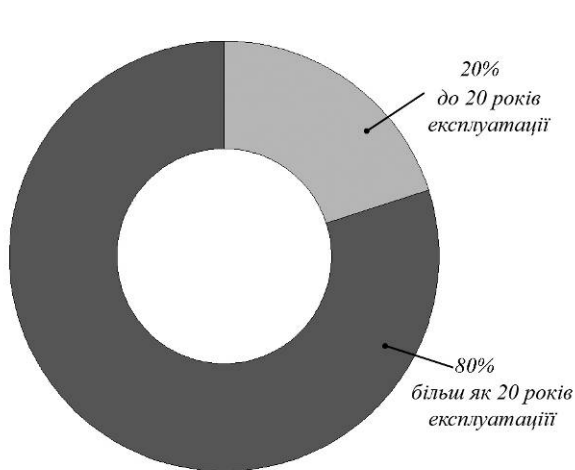


Рис. 1.1.2. Залежність кількості аварій від терміну експлуатації труб

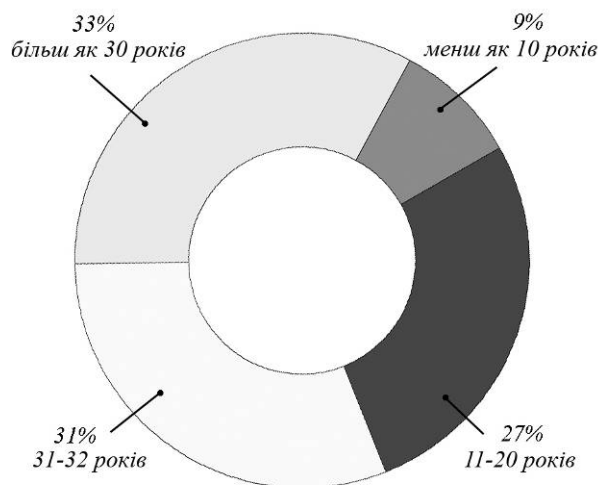


Рис. 1.1.3. Структура магістральних газопроводів України щодо термінів експлуатації (на 2008 рік)

Таким чином, можна вважати, що в цілому система магістральних газопроводів України знаходиться або близька до знаходження на пізньому етапі експлуатації, що характеризується загальним погіршенням стану трубопроводів, що викликано посиленням ролі чинників «зносового» характеру, обумовлених циклічними та корозійними впливами продукту, що перекачується, і навколишнього середовища [ 181]. Під впливом зазначених дії на цьому етапі експлуатації трубопроводів окремі пошкодження в металі труб та зварних швах розвиваються до критичного рівня, що призводить до відмов [20]. Осередками зазначених ушкоджень, як правило, служать різні дефекти, допущені при виробництві труб та при виконанні будівельно-монтажних робіт [181].

Темпи протікання процесів накопичення і розвитку пошкоджень для різних ділянок трубопроводів можуть істотно відрізнятися. Це залежить від дефектів різних типів з різним ступенем небезпеки, використання різних матеріалів труб і ізоляційних покриттів, відмінностей в термінах і режимах експлуатації, природно-кліматичних умов, корозійної активності ґрунтів. У зв'язку з цим стан одних ділянок може виявитися цілком задовільним, інших – може бути близьким до критичного [28, 181].

У будь-якому випадку проведення всебічного контролю з метою виявлення дефектів і організація ремонту дефектних ділянок є найважливішим завданням для безперебійного транзиту продукту трубопровідним транспортом України.



Основним методом оцінки стану трубопроводів є гідравлічні випробування [22, 146, 150], проведення яких в умовах перекачування продукту, що транспортується, без виведення трубопроводу з експлуатації ускладнено, а в більшості випадків і неможливо. У зв'язку з цим на магістральних трубопроводах України великого поширення набули внутрішньо-трубні методи неруйнівного контролю, які проводяться за допомогою інтелектуальних поршнів [25, 67, 174]. Методи внутрішньо-трубної діагностики характеризуються високою продуктивністю, гарною роздільною здатністю, що дозволяє не тільки виявляти, але і вимірювати дефекти, можливість проведення розрахунків на міцність за даними діагностичної інформації та ранжирування дефектів за ступенем небезпеки, можливість проведення вибіркового ремонту, можливість визначення швидкості розвитку дефектів на основі порівняння даних, отриманих в різні періоди часу [181].

Визначення залишкового ресурсу трубопроводів з використанням даних внутрішнього трубного сканування і застосування методів вирішення завдань міцності (надійності), які застосовуються в машинобудуванні, дозволяє найбільш точно визначити ступінь небезпеки стану трубопроводів [181].

Більшість експлуатаційних руйнувань (відмов) магістральних трубопроводів обумовлено недостатнім опором сталі труб і зварних з'єднань зародженню і розвитку тріщин [50, 181].

Традиційний розрахунок на міцність визнає конструкцію прийнятною, якщо еквівалентні максимальні напруження в трубопроводі не перевищують межі міцності матеріалу або межі текучості з урахуванням відповідних коефіцієнтів запасу [181]. Реальна конструкція завжди містить дефекти, які в процесі експлуатації призводять до зародження і росту втомних тріщин, що ініціюють руйнування [181].

При виявленні дефектів ремонт проводиться наступними способами:

1. Вирізка дефектної ділянки з подальшою установкою котушок (при наявності локально згрупованих дефектів або заміна всієї ділянки при великих ураженнях стінки труби (регламентовано [19, 133]);
2. Заплавлення корозійних виразок і раковин (регламентовано [155]);
3. Встановлення бандажів і муфт в місцях витоку, стиків і на дефектних ділянках (регламентовано [19, 24, 136, 158]).

В якості тимчасового заходу посилення стінки трубопроводу при наявності поздовжньо-орієнтованих дефектів широкого поширення набуло встановлення

бандажів і хомутів [34]. Бандажі, які не мають жорсткого кріплення до тіла труби, дозволяють збільшити стійкість труби і, в разі їх встановлення при зниженому тиску в трубопроводі, частково підвищити міцність ремонтної труби, знизивши в її стінці рівень кільцевих напружень відповідно до широко відомим виразом [43, 154]:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{P_y}{P_p} + \frac{1 - \frac{P_y}{P_p}}{1 + \frac{\delta_M}{\delta_T}}, \quad (1.1.1)$$

де  $\sigma_{T0}$  – кільцеві напруження розтягання в стінці труби без бандажа (муфти) з робочим тиском  $P_p$ ,  $\sigma_{Tp}$  – кільцеві напруження розтягання в стінці труби з встановленим бандажем (муфтою) при робочому тиску  $P_p$ ,  $P_p$  – робочий тиск всередині трубопроводу,  $P_y$  – тиск в трубопроводі, при якому встановлювався бандаж,  $\delta_T$  – товщина стінки труби,  $\delta_M$  – товщина стінки бандажа (муфти).

На рис. 1.1.4 і рис. 1.1.5 наведені графіки зміни ступеня зниження окружних напружень в стінці труби при установці муфти і зміни тиску в просторі між трубою і бандажем від тиску  $P_p$  в трубі.

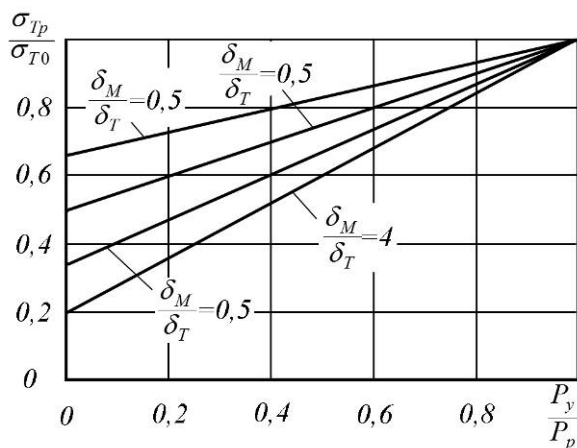


Рис. 1.1.4. Залежність ступеня зниження напруження в трубі від відносного тиску встановлення бандажа (графік взятий з [154])

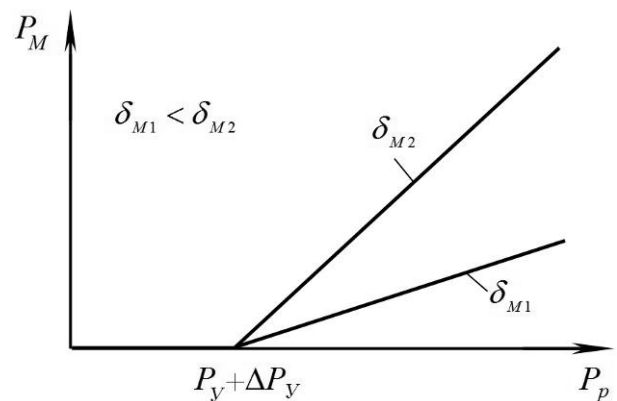


Рис. 1.1.5. Залежність тиску між трубою і бандажем від тиску  $P_p$  в трубопроводі

Значення  $\Delta P_y$  на графіку (1.1.5) визначається величиною зазору, з яким встановлено бандаж, тобто,  $\Delta P_y$  – це величина збільшення тиску в трубопроводі

від значення  $P_y$ , при досягненні якого зовнішній діаметр труби стає рівним внутрішньому діаметру бандажа. При щільній установці бандажа на трубопровід  $\Delta P_y \approx 0$ .

Бандажі (повноохоплюючі муфти) дозволяють посилити трубу тільки в окружному напрямку. На відміну від них, герметичні ремонтні муфти мають кріплення з трубопроводом, чим забезпечується зниження не тільки кільцевих, але і поздовжніх напружень. У найпростішому випадку ремонтна муфта являє собою бандаж, торці якого зварені з поверхнею трубопроводу кутовими швами. У вісімдесяті роки використання таких муфт на трубопроводах було частим і використовується до цих пір деякими компаніями, наприклад, фірмою Т. Д. Вільямсон [139]. Разом з тим, за даними [40] в кутовому зварному шві простої герметичної муфти діють напруження, що в 1,815 разів перевищують напруження в стінці труби, яка не посилена муфтою. Крім того, міжшаровий зазор між конструктивним елементом і трубопроводом є природним концентратором напружень в місцях переходу від наплавленого до основного металу, що призводить до зниження технологічної міцності, а також до зменшення ресурсу роботи зварних з'єднань за рахунок зниження їх опірності крихкому руйнуванню [175]. Це висуває підвищені вимоги до якості кутового зварного шва [171], особливо при ремонті магістральних трубопроводів великого діаметру високого тиску, і підвищує ймовірність гільйотинного розриву трубопроводу по шву. Показовою в цьому випадку є аварія на магістральному трубопроводі, описана в [4], причиною якої був визнаний кутовий зварний шов муфти. Дане питання досліджено і в [35].

У 1981 році в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона була розроблена і запатентована [8] технологія встановлення герметичної ремонтної муфти за допомогою приставних кілець. З двох сторін встановленого на трубопровід бандажа з зазором монтувалися приставні технологічні кільця, після чого торці бандажа разом з внутрішніми торцями відповідних технологічних кілець зварювалися з поверхнею трубопроводу в зазор між ними. За даними [40] така конструкція з'єднання дозволила знизити напруження в зварному шві в два рази у порівнянні з напруженнями в кутовому шві. Крім того, неминуче в процесі зварювання нагрівання труби не призводить до втрати її стійкості, так як розташований з одного боку шва бандаж, а з іншого технологічне кільце, притиснене до трубопроводу, створюють додаткову жорсткість. Згодом

розроблена в ІЕЗ ім. Є. О. Патона конструкція герметичної муфти стала традиційною і отримала широке поширення при ремонті магістральних трубопроводів України, Росії та інших країн. Надалі [9] запропонован спосіб ремонту протяжних ділянок трубопроводів шляхом встановлення розробленої герметичної муфти кроковим способом.

Разом з тим, метод посилення ділянок трубопроводів за допомогою бандажів або герметичних муфт, що обжимають трубу, має ряд недоліків. Аналіз виразу (1.1.1) і графіків (рис.1.1.4 і рис.1.1.5) дозволяє зробити висновок про те, що ефективність посилення труби визначається товщиною стінки муфти та тиском в трубопроводі, при якому встановлювалася муфта і величиною зазору між трубою і муфтою. При установці муфти при робочому тиску в трубопроводі, труба, що ремонтується, не посилюється (збільшується тільки її стійкість).

З графіків видно, що висока ступінь зниження окружних напружень в трубі може бути досягнута декількома способами. По-перше, муфта може бути встановлена на трубопровід без підмуфтового зазору при зниженому тиску в трубопроводі, тобто мати мінімальний діаметр. В цьому випадку, при підвищенні внутрішнього тиску і пов'язаного з цим збільшення діаметра трубопроводу, муфта обжимає трубу, беручи на себе частину навантаження. Однак при цьому необхідна суттєва зміна режимів транспорту продукту. По-друге, при установці муфти трубопровід може бути примусово стиснутий, для чого і потрібні дорогі зовнішні пристрої і пристосування. По-третє, в підмуфтовому просторі може бути створений необхідний тиск, проте для цього необхідна надійна герметизація торців муфти. Надалі, вдосконалення муфтового ремонту виконувалося за цими напрямками, а пріоритет віддавався вдосконаленню методик муфтового ремонту трубопроводів, що знаходяться під тиском. В [92] групою авторів був запропонований спосіб встановлення муфти з використанням спеціалізованих пристроїв, що обжимають. Частини розрізаної муфти притискалися до трубопроводу, створювався зовнішній тиск, після чого частини скріплювалися між собою в поздовжньому напрямку. Даний метод був добре вивчений [39, 173] і отримав широке поширення в РФ.

В [103, 105] запропонован гнучкий бандаж, частини якого стягувалися між собою спеціальними шпильками. Метод, вивчений в [142], де показані його переваги і недоліки, основним з яких є неможливість компенсації поздовжніх напружень.

Зрозуміло з появою нових технологій встановлення муфт, удосконалювалися старі [10, 65, 68, 91, 97, 98, 99, 101, 104, 107].

Одним з напрямків розвитку ремонтних технологій є застосування композитних бандажів. Даному питанню присвячено велике число робіт і розробок [94, 100, 102, 158]. На Україні найбільшого поширення набули технології компанії Клок Спрінг [94] і ТОВ «Поліпромсинтез» [100].

Разом з тим, зважаючи на простоту реалізації, найбільшого поширення в останні роки при ремонті практично всіх видів дефектів (в тому числі і наскрізних) магістральних трубопроводів отримав спосіб підвищення міцності за допомогою муфт з внутрішнім наповненням. Роботи по установці муфт проводяться під тиском, без виведення трубопроводу з експлуатації.

З кінця 80-х років питаннями ремонту трубопроводів за допомогою муфт з наповненням стали цікавитися в основних країнах світу.

Проведені Д. Кіфнером розрахунки [181] показали, що при певній технології встановлення повноохоплюючих муфт в місці дефекту стінки трубопроводу можливе запобігання його розвитку уздовж осі трубопроводу, а також запобігання розкриття дефекту за рахунок стримування деформації. Їм були вивчені два види муфт – муфти, що охоплюють місце дефекту (бандажі), і герметичні муфти, приварені до трубопроводу кільцевими фланговими швами. Результати досліджень показали, що ремонт труб з дефектами у вигляді вм'ятин, корозійних поразок глибиною до 60 % товщини стінки, поздовжніх подряпин глибиною до 60–78 % товщини стінки за допомогою муфт при підвищенні внутрішнього тиску не привів до руйнування відремонтованих ділянок. При цьому максимальний тиск при випробуванні зразків обмежувався текучістю металу труби, а за межами муфти спостерігалось випинання металу труби. У той же час без встановлення муфти розрив відбувався по дефекту при напрузі всього 40-68 % від межі текучості.

Ефективність ремонту (підвищення міцності на розрив від внутрішнього тиску) визначали порівнянням розрахункового розривного тиску для труби без ремонту з максимальним тиском, яке забезпечується під час випробувань відремонтованої труби.

Експерименти також показали ефективність заповнення пустот між трубою і муфтою епоксидним складом, що різко збільшує стійкість муфтової конструкції до циклічних навантажень за рахунок заданих коливань тиску в трубах.

З графіка на рис. 1.1.5 бачимо, що заповнення підмуфтового простору нестисливою речовиною призводить до зменшення значення  $\Delta P_y$  і, як наслідок, до збільшення ефективності ремонту.

Вперше спосіб встановлення муфт з компаундним наповненням був запропонований Робертом Куммінгом і запатентований в Великобританії в 1987 році [5] компанією British Gas Pic (рис. 1.1.6). Згодом, спосіб був покладений в основу технології ремонту трубопроводів під тиском [136], що набув широкого поширення на магістральних трубопроводах як країн Європи, так і Росії [154] (рис. 1.1.7). Ремонтна конструкція складається з двох напівмуфт. В процесі монтажу напівмуфти механічно з'єднують один з одним, утворюючи замкнуту оболонку навколо ремонтної ділянки трубопроводу. Далі оболонку центрують за допомогою технологічних елементів (болтів), встановлених в отворах корпусу. Після цього простір між трубопроводом і муфтою герметизують з обох кінців за допомогою самотвердіючого складу (цементу, епоксидної шпаклівки і т. д.).

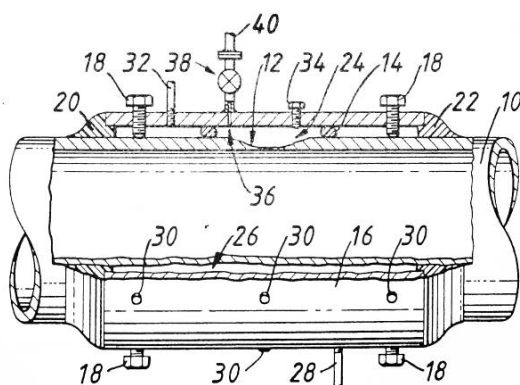


Рис. 1.1.6. Муфта з наповненням компанії British Gas Pic (Великобританія) (рисунок взятий з опису до патенту GB2210134F)

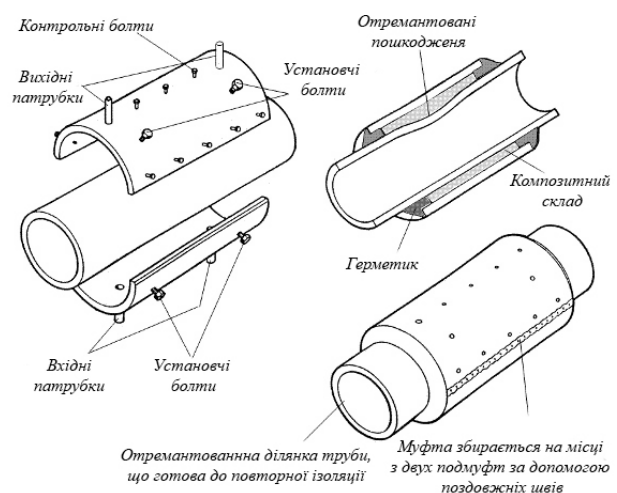


Рис. 1.1.7. Муфта з наповненням ВАТ «Діаскан» (Росія) (рисунок взятий з офіційного сайту)

Незважаючи на велике поширення спосіб має суттєві недоліки, пов'язані з неможливістю введення епоксидного наповнювача під високим тиском. Надалі, через зміну геометричних розмірів трубопроводу через перепади тиску продукту, що перекачується і температурних деформацій, епоксидний шар може розшаровуватися, що призводить до зниження жорсткості і герметичності конструкції.



Крім того, відносно низький тиск заповнення епоксидним складом простору під муфтою з урахуванням його усадки в процесі затвердіння, допускає появу порожнеч. Максимальний тиск заповнення простору під муфтою обмежено міцністю ізолюючих прокладок на торцях. Для істотного зниження окружних напружень в ремонтованій трубі установку муфти проводять при зниженому тиску в трубопроводі.

Згодом було запропоновано велику кількість муфт і способів муфтового ремонту [91, 92, 94, 95, 97, 98 та ін.]. При цьому реальне поширення в Росії отримала гальтейна муфта, що заповнюється рідиною [34] і приварні муфти з підмуфтовим простором, що заповнюється [154]. Ефективність використання рідини для посилення труби викликає сумнів, так як в разі розгерметизації муфта під впливом часу перестає виконувати свої функції. Приварні муфти заповнюються без надлишкового тиску, що знижує ефективність розвантаження труби.

Цікавий спосіб ремонту трубопроводів за допомогою муфт, які заповнюються бетоном [42]. У процесі затвердіння бетон розширюється, створюючи тиск в підмуфтовому просторі. До недоліків такого способу слід віднести слабку прогнозованість кінцевого результату і низьку ефективність ремонту через велику глибину підмуфтового простору і велику вагу ремонтної конструкції.

В [93] була запропонована технологія ремонту трубопроводів, що передбачає підвищений тиск запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір. Для забезпечення герметичності в муфті аналогічної British Gas Pic, підмуфтовий простір ізолюють за допомогою еластичної прокладки і фланців. І хоча рекомендації щодо тиску в підмуфтовому просторі (20–60 бар, переважно 30–45 бар) були обґрунтовані, технологію можна вважати перспективною для свого часу.

Слід зазначити провідну роль колективу Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона в розробці конструктивно-технологічних схем відновлення несучої здатності трубопроводів за допомогою муфт із заповненням під тиском. Розроблені конструкції муфт і технології їх встановлення [8, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 84, 96, 106] набули широкого поширення при виконанні ремонтних робіт на магістральних трубопроводах України. Основними власниками патентів на яких базуються розроблені технології, є ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» (в даний час ПАТ «Укртрансгаз») і, в

частині запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір – підприємство «НПП КІАТОН» (м. Київ) .

Основну увагу в розробках приділено конструкції торцевих ущільнювачів, міжмуфтових з'єднувачів і роздільників підмуфтового простору, що забезпечують якісний монтаж ремонтних муфт.

Зрозуміло з розвитком муфтової технології ремонту трубопроводів розвивалися і математичні методи опису процесів, що відбуваються в посилюваній трубі і оболонці муфти.

Теоретичному дослідженню напружено-деформованого стану трубопроводів, посиленних муфтами, присвячений ряд робіт. Аналіз цих досліджень може бути знайдений в [18, 41, 126, 142, 143]. Систематизовані дані з питання досліджень напружено-деформованого стану багат шарових циліндричних оболонок, у вигляді яких може бути представлена муфтова конструкція, викладені в [181].

Для визначення напружено-деформованого стану багат шарових оболонок використовуються різні методи дослідження і рішення задач теорії пружності. До них можна віднести аналітичні методи, варіаційні, чисельно-аналітичні й експериментально-теоретичні [181].

Огляди методів розрахунку наведені в роботах [2, 11, 13, 29, 62]. Розрахунок циліндричних оболонок становить інтерес, перш за все тому, що вони за певних граничних умов допускають точне рішення, що дозволяє виявити вплив різних параметрів на остаточний результат розрахунку [181].

Слід зазначити провідну роль Якубовського Ю. Є. і його учнів [126, 181, 182, 183] в дослідженнях впливу муфтових конструкцій на напружено-деформований стан трубопроводу, що підсилюється, які розробили загальну методику розрахунку стану конструкції в кутових зонах з урахуванням зсувних напружень в шарах.

Особливо необхідно відзначити роботу А. Г. Гумерова, Р. С. Зайнуллина і Р. К. Алієва [181] по дослідженню напруженого стану і несучої здатності приварних муфт. В роботі розглянуто ділянку трубопроводу з непрямым пошкодженням, що посилена клесварною муфтою за технологією ремонту, аналогічною технологією компанії BritishGasPic. В результаті аналітичних розрахунків отримані формули для проведення інженерних розрахунків для оцінки величини крайового моменту  $M_0$  і поперечної сили  $Q_0$  в залежності від довжини застосовуваної муфти, коефіцієнтів концентрації напружень в зоні зварних стиків труби з муфтою, граничних тисків

ремонтних муфт з крихких, пластичних і посилених сталей, граничного стану муфти з позиції тріщиностійкості [181].

В роботі [141] наведені вирази, що описують вплив модуля пружності підмуфтового шару, сформованого без тиску, на напружено-деформований стан трубопроводу, що підсилюється.

Питання впливу параметрів муфтової конструкції, що приварюється до тіла труби на напружений стан зварних швів розглянуто в [66].

Не дивлячись на великі роботи в області математичного опису трубопроводу, посиленого муфтою, питання застосування муфт з підмуфтовим простором, що заповнюється під тиском, до кінця не досліджені. Зокрема, немає інформації про комплексний вплив параметрів муфти, трубопроводу, самотвердіючої речовини, технологічних параметрів процесу встановлення муфти на трубопровід і параметрів процесу запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір на ефективність посилення труби. Відсутня інформація про вплив змін під час полімеризації об'ємних і міцності властивостей речовини підмуфтового шару, запресованого під тиском в підмуфтовий простір, на напружений стан посилюваної труби. Немає даних про дослідження ефективності муфтових конструкцій, що заповнюються розплавленим металом.

## **1.2. Контроль якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі**

### ***1.2.1. Ділянка трубопроводу, що посилена муфтової конструкцією, як об'єкт контролю***

Ділянка трубопроводу, посилена муфтовою конструкцією, може бути представлена у вигляді технічної системи, яка підлягає контролю. Технічна система – це матеріальний об'єкт штучного походження, який складається з складових частин, що розрізняються властивостями, які виявляються при взаємодії, об'єднаних зв'язками і вступають в певні відносини між собою і з зовнішнім середовищем, щоб виконати функцію технічної системи [56, 170]. У кожній технічній системі існує функціональна частина-об'єкт управління. Функції об'єкта управління в технічній системі полягають у сприйнятті керуючих впливів і в зміні відповідно до них свого стану. Об'єкт управління в технічній системі не виконує функцій прийняття рішень, тобто не формує і не

вибирає альтернативи своєї поведінки, а тільки реагує на зовнішні впливи, змінюючи свої статки визначеним його конструкцією чином [56, 170]. Об'єкт управління складається з виконавчої влади та сенсорної частини. Через сенсорну частину об'єкт управління отримує інформаційні сигнали від системи контролю.

Монтаж клеєзварної муфти на трубопроводі включає кілька етапів. Безпосередньо виготовлення деталей вузлів та складових конструкцій муфти. Послідовний монтаж складових частин муфти на посилюваній трубі і скріплення їх між собою. Питання контролю якості частин муфти і їх з'єднань добре вивчені. Найбільш важливий етап монтажу муфти на трубопроводі – формування підмуфтового шару. Підмуфтовий шар призначений для передачі частини навантаження з посилюваної труби на зовнішню оболонку муфти. Від його параметрів залежить якість всієї муфтової конструкції. При некоректно обраних параметрів міцності підмуфтового шару або технологічних параметрів його формування, ефективність посилення трубопроводу, в кращому випадку, буде низькою або, в екстремальних випадках, ще не виключений варіант фізичного руйнування трубопроводу. Зрозуміло, що при формуванні підмуфтового шару з матеріалу, що має велику стисливість (наприклад, повітря), муфтова конструкція свої функції виконувати не буде. Створення підвищеного тиску в підмуфтовому просторі, безумовно, дасть можливість частково або навіть повністю розвантажити посилювану трубу при фіксованому тиску в трубопроводі, але може викликати неприпустимі напруження в стінці труби при зміні робочого тиску. Неврахована усадка або розширення матеріалу підмуфтового шару в процесі твердіння можуть так само привести як до зниження ефективності ремонту в цілому, так і до появи неприпустимих напружень в посилюваній трубі.

У зв'язку з цим, процес монтажу муфти на діючий трубопровід повинен контролюватися, при цьому особливому контролю може бути піддано етап формування підмуфтового шару. Обсяг параметрів, що підлягають контролю з метою досягнення максимальної ефективності ремонту, визначені в процесі написання монографії.

### ***1.2.2. Методи контролю якості робіт при муфтовому ремонті трубопроводів***

В існуючих нормативних документах, що регламентують обсяг обов'язкового контролю при муфтовому ремонті трубопроводів в Росії [67] і в

Україні [154] основну увагу приділяють контролю якості зварних швів, що проводяться традиційними рентгенографічними [31, 63], магнітографічними [172] або ультразвуковими методами [32, 36, 63, 179]. Зрозуміло, що при установці сучасних муфт, що заповнюються самотвердіючою речовиною під тиском, такий обсяг контролю є явно недостатнім.

Перш за все, найважливішим елементом технології є контроль збереження герметичності підмуфтового простору під тиском в підмуфтовому просторі. Мікродефекти в зварних швах, що не виявляються рентгеноскопічним і ультразвуковим контролем, можуть розвинутиися при створенні необхідного тиску в підмуфтовому просторі, що призведе до його розгерметизації і зниження ефективності всього ремонту в цілому.

Точному контролю повинен підлягати процес формування підмуфтового шару, що визначає ефективність всього ремонту.

Контролю повинна підлягати рівномірність заповнення підмуфтового простору самотвердіючої речовиною з метою оптимізації режимів запресування речовини і виключення появи бульбашок і несущільності в підмуфтовому шарі.

Важливі також питання контролю процесів усадки самотвердіючої речовини під час перехідного процесу його полімеризації або тверднення. Крім того прямого або непрямого контролю повинна підлягати рівномірність розподілу механічних кільцевих напружень між трубою і муфтою.

### ***1.2.3. Система контролю якості монтажу муфти на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском***

Під контролем розуміється процес, що забезпечує досягнення контрольованою системою поставлених цілей шляхом порівняння фактичного стану системи з бажаним [17, 53, 55]. Під системою розуміється комбінація взаємодіючих елементів, організованих для досягнення однієї або декількох поставлених цілей [15, 21, 45, 56, 168]. Під системою контролю в даній роботі розуміється комбінація елементів і відносин між ними, які беруть участь в процесі контролю монтажу клеєзварної муфти шляхом порівняння, в ході виконання робіт, поточних значень інформаційних параметрів, що характеризують фактичний стан трубопроводу, посиленого муфтовою конструкцією, зі значеннями, що забезпечують максимальну ефективність муфтового ремонту. Основними цілями контролю монтажу клеєзварної муфти є визначення оптимальних значень

інформаційних параметрів, що впливають на ефективність муфтового ремонту, виявлення відхилень поточних значень даних параметрів від оптимальних значень, розробка заходів щодо подолання виявлених відхилень, в тому числі, розробка заходів щодо коригування технологічних процесів монтажу муфти. Система контролю монтажу клеєзварної муфти на магістральному газопроводі повинна складатися з декількох складових частин – вимірювача інформаційних параметрів, обчислювача оптимальних значень даних параметрів і аналізатора, що оцінює невідповідність вимірюваних значень оптимальним і дає через сенсорну частину об'єкта управління контрольованої системи пропозицію для дій його виконавчої частини на усунення цієї невідповідності.



## 2. ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ КЛЕЄЗВАРНОЇ МУФТИ НА ДІЮЧОМУ ТРУБОПРОВОДІ

### 2.1. Розробка структурної схеми системи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском

Система контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі високого тиску повинна забезпечувати досягнення контрольованою системою поставлених цілей шляхом порівняння, в процесі написання роботи, поточних значень інформаційних параметрів, що характеризують фактичний стан контрольованої системи зі значеннями, що забезпечують максимальну ефективність муфти ремонту (рис. 2.1.1) [164, 167].

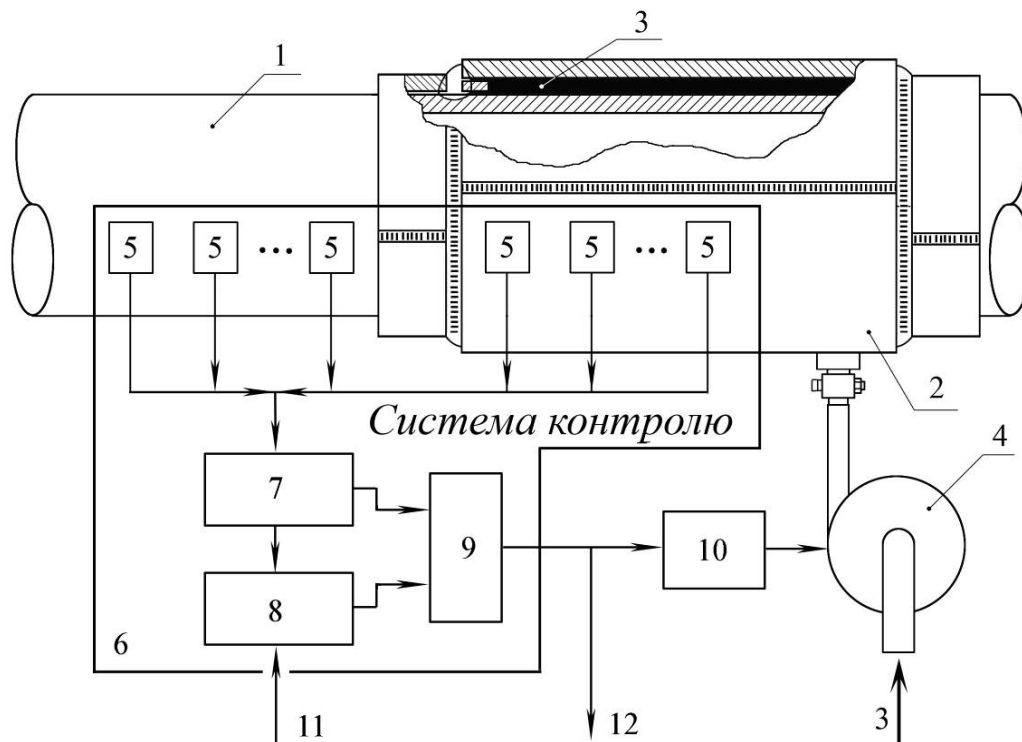


Рис. 2.1.1. Структурна схема системи контролю якості монтажу муфти на діючому трубопроводі:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – самотвердіюча речовина для формування підмуфтового шару, 4 – нагнітач речовини

Розроблена система контролю 6 якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі високого тиску 1 включає в себе декілька складових частин – вимірювачі інформаційних параметрів 5, що видають сигнали

в схему обробки даних 7, обчислювача оптимальних значень контрольованих параметрів 8 і аналізатора 9, оцінює невідповідність даних параметрів оптимальним і дає пропозицію на дії системи управління 10 для усунення цієї невідповідності. Таким чином, вхідним продуктом розробленої системи контролю є поточна інформація, яка надходить з датчиків 5 і дані задаються параметрами системи 11, вихідними – дані про стан контрольованої системи 12, які містять інформацію і про відхилення поточних значень контрольованих параметрів від значень, що розраховуються в обчислювачі 8. Крім того система контролю видає в систему управління 10 дані на зменшення даної неузгодженості з рекомендаціями про можливе коригування параметрів, що задаються системою, якщо неможливо домогтися відповідності реального стану контрольованої системи бажаного шляхом вибору оперативно змінюваних параметрів.

Для практичної реалізації розроблена система визначає множину параметрів, що підлягають оперативному контролю і пропонує підхід до оперативного визначення їх оптимальних значень, що забезпечують максимальну ефективність посилення трубопроводу. Складність завдання полягає в тому, що оптимальні значення контрольованих параметрів можуть бути динамічними, що змінюються в процесі монтажу муфтової конструкції.

Поставлена задача вирішується на підставі всебічних досліджень моделі трубопроводу, посиленого муфтою, як об'єкта контролю, визначення ступеня впливу технічних і технологічних параметрів муфтового ремонту на ефективність посилення трубопроводу по попередньо обраним критеріям оцінки ефективності.

## **2.2. Теоретичні дослідження ділянки трубопроводу, посиленого клеєзварної муфтою, як об'єкта контролю**

### ***2.2.1. Вибір критерію оцінки ефективності посилення трубопроводу за допомогою муфти з внутрішнім заповненням***

Для побудови системи контролю якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі був здійснений вибір критерію ефективності муфтового ремонту.

Поняття ефективності в техніці зв'язується з поняттям операції [58] під якою розуміється упорядкована сукупність взаємопов'язаних дій, спрямованих на досягнення певної мети [124]. При цьому під ефективністю операції

розуміється ступінь відповідності реального результату операції бажаного або, іншими словами, ступінь досягнення мети операції [60]. Якість складної системи проявляється в повній мірі тільки в процесі її функціонування, використання за призначенням. Тому найбільш об'єктивна оцінка якості системи може бути отримана за ефективністю її цільового застосування [124].

Під критерієм ефективності розуміється правило, яке дозволяє співставляти стратегії, які характеризуються різним ступенем досягнення мети, і здійснювати спрямований вибір стратегій з безлічі допустимих [61]. Критерії ефективності будь-якої контрольованої системи умовно діляться на чотири класи [131]: функціональні, технологічні, економічні та антропологічні. Функціональні критерії пов'язані з кількісними показниками функціональної реалізації системи. Функціональні критерії, як правило, включають в себе і головний функціональний критерій ефективності. Технологічні критерії пов'язані з показниками економії людської праці при виготовленні та підготовці до експлуатації технічної системи (трудомісткість, розчленовування системи на елементи, стандартизація та уніфікація і т. д.).

У даній роботі, як критерій оцінки ефективності муфтового ремонту був обраний функціональний критерій, що максимально характеризує ефект від встановлення на трубопроводі клесзварної муфти. Основним завданням муфтового ремонту трубопроводу є зниження навантаження на посилювану трубу шляхом передачі частини навантаження на оболонку муфти. Внутрішній тиск створює в стінці труби кільцеві  $\sigma_T$  і поздовжні  $\sigma_x$  напруження. В результаті встановлення муфти і передачі частини навантаження з труби на зовнішню оболонку механічні кільцеві напруження в стінки труби знижуються з  $\sigma_{T0}$  до  $\sigma_{Tp}$ . В даному випадку, ступінь посилення трубопроводу визначається відношенням  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$ . Дана величина залежить від параметрів трубопроводу, муфти і підмуфтового шару і є основною ознакою, що дозволяє оцінити розвантаження ремонтної труби. Даний параметр традиційно використовується в якості окремого показника ефективності муфтового ремонту в ряді робіт [154, 95]. У роботах [16, 132] для оцінки якості посилення труби використовується параметр, який чисельно дорівнює зворотній величині даної відносини, названий авторами коефіцієнтом ефективності.

Разом з тим, використання ступеня посилення трубопроводу для оцінки ефективності посилення трубопроводу за допомогою клеєзварної муфти має ряд обмежень. Перш за все, цей параметр не враховує роботу ремонтної конструкції в цілому. Наприклад, що дане відношення, крім зазначених раніше параметрів, залежить так само від тиску в підмуфтовому просторі. Наприклад, при тиску в підмуфтовому просторі рівному тиску в трубопроводі, все навантаження передається на зовнішню оболонку (труба виявляється повністю розвантаженою), а відношення  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$  дорівнюватиме нулю. Тобто, працювати буде тільки зовнішня оболонка. При нульовому тиску в підмуфтовому просторі, відношення  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$  буде дорівнює одиниці, труба не розвантажується, оболонка муфти свої функції не виконує.

З точки зору теорії міцності найбільший ефект посилення має місце, коли навантаження буде розподілено рівномірно між трубою і ремонтною конструкцією. В цьому випадку, відношення  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$  не буде залежати від тиску в трубопроводі або ця залежність буде мінімальна.

Таким чином, в даній роботі, як критерій оцінки ефективності посилення трубопроводу за допомогою муфти з внутрішнім заповненням обрана ступінь зниження напружень в трубі, що посилюється, (ступінь посилення трубопроводу)  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$  при рівномірному розподілі навантаження між трубою і муфтою.

### ***2.2.2. Розробка математичної моделі напружено-деформованого ділянки трубопроводу, муфтою з внутрішнім наповненням***

Для більшості магістральних трубопроводів високого тиску виконується умова  $D_T > 20 \cdot \delta_T$ , тому ділянку трубопроводу з встановленою на неї муфтою може бути розглянута як тришаровий тонкостінний циліндр. Внаслідок симетрії циліндра і навантажень, деформації і напруження, що виникають, будуть симетричні щодо поздовжньої осі.

В подальшому при виведенні рівняння труба з муфтою розглядалася як тришарова тонкостінна оболонка з еластичним середнім шаром. Отримані

вирази, що враховують тиск запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір і зміну його об'ємних параметрів в процесі затвердіння, базуються на отриманих результатах закордонних дослідників (у частині врахування модуля пружності затверділого матеріалу підмуфтового шару) і професора Ориняка І. В. (ІПМ ім. Г. С. Писаренко – у частині врахування коефіцієнта Пуассона).

У рівняннях, що відносяться до тонкої оболонці, найбільшим значенням  $\frac{\delta_T}{D_T}$  можна знехтувати. У порівнянні з одиницею, похибка інженерних розрахунків в цьому випадку не перевищує зазвичай допустиму в  $5\% 1 \pm \frac{\delta_T}{D_T} = 1 \pm \frac{1}{20} = 1 \pm 0,05$  [29, 125].

Основні залежності, що описують роботу напружено – деформованої ділянки трубопроводу з встановленою на нею муфтою, можуть бути отримані в результаті розгляду елементарної ділянки симетричної оболонки з постійною товщиною стінки розмірами  $dS_1$  і  $dS_2$ , утвореного двома близько розташованими екваторіальними і двома меридіональними перетинами оболонки (рис. 2.2.1).

При розгляді труби з оболонкою передбачається, що труба має рівномірну товщину вздовж підсилюваної ділянки. Каверни зашпакльовані речовиною з великим модулем пружності і вирівняні з поверхнею.

Для малого елемента розмірами тонкої, утвореного двома близько розташованими характеризується радіусами кривизни  $R_1$  і  $R_2$ , рівняння Лапласа може бути записано у вигляді [29, 125]:

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_x}{R_2} = \frac{\Delta P}{\delta}, \quad (2.2.1)$$

де  $\sigma_m, \sigma_x$  – меридіональне і окружне (екваторіальне) напруження розтягнення малого елемента оболонки,  $\Delta P$  – різниця тисків між внутрішньою і зовнішньою поверхнями оболонки,  $\delta$  – товщина стінки оболонки.

Трубопровід являє собою циліндричну оболонку з радіусом  $R_T = \frac{D_T}{2}$ , де  $D_T$  – внутрішній діаметр трубопроводу. В цьому випадку  $\sigma_m = \sigma_x$ , де  $\sigma_x$  – осьовий (поздовжнє напруження), головні радіуси кривизни  $R_1 = \infty$  і  $R_2 = R_T$ , А окружні напруження  $\sigma_\theta$ , що діють в трубі, будуть позначатися  $\sigma_T$ .

На підставі формули (2.2.1) окружне (екваторіальне) напруження в стінці труби:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_T = \frac{\Delta P_T \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}. \quad (2.2.2)$$

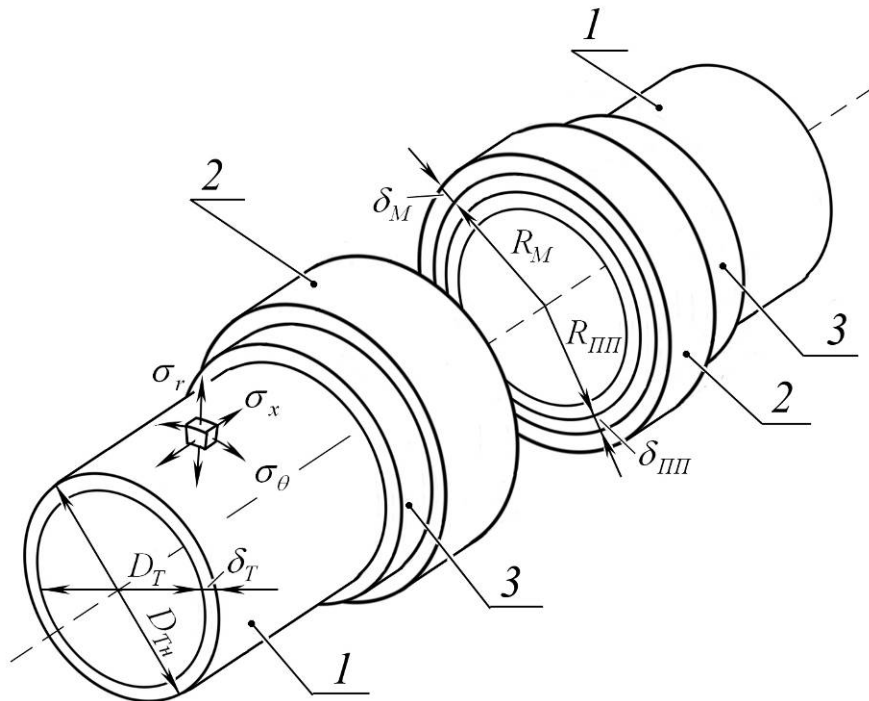


Рис. 2.2.1. Ділянка трубопроводу з встановленою муфтою:

1 – трубопровід, 2 – муфта, 3 – технологічні кільця

Ділянка трубопроводу, обмежена запірною арматурою, може бути умовно представлена у вигляді циліндра замкнутого обсягу довільної довжини  $L_T$  з торцевими стінками (рис. 2.2.2).

В цьому випадку, друге головне напруження – меридіональне напруження  $\sigma_x$  може бути знайдено з умови рівноваги оболонки при її перетині площиною, перпендикулярної поздовжньої осі трубопроводу. Рівнодіюча тиску на торець врівноважується зусиллями, спрямованими вздовж кільця, утвореного даними перетином:

$$\pi \cdot D_T \cdot \delta_T \cdot \sigma_x - \frac{\pi}{4} D_T^2 \cdot \Delta P_T = 0. \quad (2.2.3)$$

Звідки

$$\sigma_x = \frac{\Delta P \cdot D_T}{4 \cdot \delta_T}, \quad (2.2.4)$$



або з урахуванням (2.2.2)

$$\sigma_x = 0,5 \cdot \sigma_T. \quad (2.2.5)$$

При відкритій запірній арматури (відсутності торцевих стінок) і нескінченної довжині трубопроводу  $\sigma_x = \mu \cdot \sigma_T$  та при розгляді локальної ділянки трубопроводу в межах зони встановлення муфти ( $L_T < 10 \cdot D_T$ ), впливом коефіцієнта Пуассона можна знехтувати та прийняти  $\sigma_x = 0$ .

Вираз для окружний деформації труби може бути представлено у вигляді:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta D_T}{D_{Tн}}, \quad (2.2.6)$$

де  $\Delta D_T$  – радіальна деформація труби під дією тиску  $\Delta P_T$ ,  $D_{Tн} = D_T + 2 \cdot \delta_T$  – зовнішній діаметр трубопроводу.

Згідно із законом Гука [125, 152, 169]:

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T - \mu_T \cdot \sigma_x}{E_T}. \quad (2.2.7)$$

У розглянутих висловлюваннях використовуються значення як внутрішнього, так і зовнішнього діаметра оболонки. Іноді зручно користуватися середнім діаметром, який пов'язаний з поняттям середньої поверхні труби – геометричним місцем точок, рівновіддалених від її зовнішньої і внутрішньої поверхні:

$$D_{Tcp} = \frac{D_{Tн} + D_T}{2} = D_T + \frac{\delta_T}{2} = D_{Tн} - \frac{\delta_T}{2}. \quad (2.2.8)$$

У зв'язку з тим, що в розглянутому прикладі  $D_T \gg \delta_T$ , припустима рівність деформацій внутрішньої, середньої і зовнішньої поверхні труби:

$$\Delta D_T \approx \Delta D_{Tcp} \approx \Delta D_{Tн}. \quad (2.2.9)$$

З виразів (2.2.6) і (2.2.7) з урахуванням (2.2.9) може бути отримана залежність радіальної деформації труби від тиску  $\Delta P_T$ :

$$\frac{\Delta D_T}{D_T} = \left(1 - \frac{\mu_T}{2}\right) \frac{\Delta P \cdot D_T}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}, \quad (2.2.10)$$

звідки:

$$\Delta D_T = \left(1 - \frac{\mu_T}{2}\right) \frac{\Delta P \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}. \quad (2.2.11)$$

При розгляді локальної ділянки трубопроводу в зоні встановлення муфти і відсутності торцевих стінок, напружений стан можна вважати лінійним і переміщення обчислювати за формулою:

$$\Delta D_T = \frac{\Delta P \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}. \quad (2.2.12)$$

З формул (2.2.11) і (2.2.12) при плоскому напруженому стані радіальні переміщення оболонки на 85 % менше, ніж обчислені при допущенні тільки лінійно-напруженого стану. Разом з тим, трубопроводи, найчастіше працюють в умовах поздовжніх напружень. Наприклад, трубопроводи на схилах пагорбів, як правило натягнуті, а в низинах, навпаки стислі. Крім того, поздовжні напруження сильно залежать від температури і визначаються конструктивними особливостями побудови трубопровідної системи. Точний облік впливу даних факторів при розгляді напружено-деформованого стану трубопроводу, посиленого муфтою, ускладнений. У монографії розглядається тільки лінійно-напружений стан труби.

У разі подання ділянки трубопроводу з встановленою на ньому муфтою може у вигляді багат шарового (три шарового) тонкостінного циліндра, справедливо записати [90]:

$$P_p - P_{III1} = \frac{2 \cdot \sigma_T \cdot \delta_T}{D_T}, \quad (2.2.13)$$

$$P_{III1} - P_{III2} = \frac{2 \cdot \sigma_{III} \cdot \delta_{III}}{D_{III}}, \quad (2.2.14)$$

$$P_{III2} - P_0 = \frac{2 \cdot \sigma_M \cdot \delta_M}{D_M}, \quad (2.2.15)$$

де  $P_{III1}$  – тиск між трубою і шаром речовини в підмуфтовому просторі,  $P_{III2}$  – тиск між шаром речовини в підмуфтовому просторі і муфтою,  $\sigma_{III}$  – кільцеві механічні напруження в шарі підмуфтового простору;  $\sigma_M$  – кільцеві механічні напруження в муфті;  $\delta_{III}$  – товщина шару підмуфтового простору;  $\delta_M$  – товщина стінки муфти;  $P_0$  – зовнішній тиск (води або ґрунту при підводному або підземному розташуванні трубопроводу), при наземній прокладці трубопроводу  $P_0 = 0$ ;  $D_M = D_T + 2 \cdot \delta_T + 2 \cdot \delta_{III}$  – внутрішній діаметр оболонки муфти.

Підмуфтовий шар в більшості випадків є суцільним і однорідним, і з достатньою для практичного застосування точністю може бути розглянутий як ізотропний і лінійно-пружний, тобто такий, що підкоряється закону Гука.

Для напруженого стану трубопроводу деформація труби в окружному напрямку обчислюється за формулою (2.2.12) і дорівнює відношенню її радіального переміщення до середнього радіусу і визначається виразом:

$$\Delta D_T = \frac{(P_p - P_{III1}) \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}. \quad (2.2.16)$$

аналогічно для муфти:

$$\Delta D_M = \frac{(P_{III2} - P_0) \cdot D_M^2}{2 \cdot E_{M\phi} \cdot \delta_M}. \quad (2.2.17)$$

де:  $E_{M\phi}$ ,  $E_T$  – відповідно, модулі пружності матеріалу муфти і труби.

Закон Гука для підмуфтового шару може бути записаний у вигляді:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_r}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_x}{E_{III}}, \quad (2.2.18)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_\theta}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_x}{E_{III}}, \quad (2.2.19)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_r}{E_{III}} - \mu \frac{\sigma_\theta}{E_{III}}, \quad (2.2.20)$$

де індекси  $x, \theta, r$  визначають осьовий, окружний і радіальний напрямки (рис. 2.2.1),  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E_{III}$  – модуль пружності речовини підмуртового шару.

При використанні муфти з герметичним підмуфтовим простором, що заповнює його речовина, з урахуванням прийнятих раніше припущень, не може істотно деформуватися в поздовжньому напрямку ( $\varepsilon_x = 0$ ,  $\sigma_x = 0$ ).

Стосовно до підмуфтового шару окружні напруження  $\sigma_\theta$  будуть позначатися  $\sigma_{III}$ , які можуть бути знайдені з виразу (2.2.14):

$$\sigma_{III} = \frac{(P_{III1} - P_{III2}) \cdot D_{III}}{2 \cdot \delta_{III}}. \quad (2.2.21)$$

Радіальне напруження  $\sigma_r$  має від'ємне значення і визначається середнім значенням тисків на границях шару підмуфтового простору:

$$\sigma_r = -\frac{P_{III1} + P_{III2}}{2} = -P_M. \quad (2.2.22)$$

Відносна окружна деформація  $\varepsilon_\theta$  визначається як відношення середнього переміщення шару в радіальному напрямку до його середнього радіусу:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta D_T + \Delta D_M}{D_{III}}, \quad (2.2.23)$$

Радіальна деформація дорівнює відношенню різниці переміщень крайніх точок підмуфтового шару до товщини шару:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D_M - \Delta D_T}{2 \cdot \delta_{III}}. \quad (2.2.24)$$

Визначальні рівняння можуть бути отримані після підстановки вищевказаних залежностей і умов в (2.2.18–2.2.20) [90]:

$$\frac{(P_{III1} - P_{III2})D_{III}}{2 \cdot \delta_{III} \cdot E_{III}}(1 - \mu^2) + \frac{P_{III1} + P_{III2}}{2 \cdot E_{III}} \mu(1 + \mu) = \frac{\Delta D_M + \Delta D_T}{D_{III}}, \quad (2.2.25)$$

$$-\frac{P_{III1} + P_{III2}}{2 \cdot E_{III}}(1 - \mu^2) - \frac{(P_{III1} - P_{III2})D_{III}}{2 \cdot \delta_{III} \cdot E_{III}} \mu(1 + \mu) = \frac{\Delta D_M - \Delta D_T}{2 \cdot \delta_{III}}. \quad (2.2.26)$$

Вирази (2.2.25–2.2.26) описують напружений стан ділянки трубопроводу зі встановленою муфтою, деформованого внутрішнім тиском і можуть бути використані для дослідження основних параметрів, що впливають на ефективність посилення трубопроводу [90].

### **2.2.3. Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу технологічних параметрів процесу формування підмуфтового шару**

Процес заповнення простору між трубопроводом і муфтою характеризується тиском запресування самотвердіючої речовини і рівномірністю його розподілу в підмуфтовому просторі. У разі якщо підмуфтовий простір характеризується великим прохідним перетином, самотвердіюча речовина, що використовується, не володіє об'ємною усадкою або розширенням в процесі твердіння і має малий коефіцієнт об'ємного стиснення (великий модуль

пружності), то тоді можна припустити незмінність обсягу підмуфтового простору в процесі експлуатації муфтової конструкції. При малій величині глибини підмуфтового простору тиску  $P_{\text{III}1} = P_{\text{III}2} = P_M$ .

В цьому випадку в трубі, що не посилена муфтою, діють кільцеві напруження  $\sigma_{T0}$ , в загальному випадку визначаються виразом (2.2.2), яке з урахуванням умови  $\Delta P_T = P_p$  записується у вигляді:

$$\sigma_{T0} = \frac{P_p \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}. \quad (2.2.27)$$

де  $P_p$  – робочий тиск всередині трубопроводу,  $\sigma_{T0}$  – кільцеві напруження розтягання в стінці труби без муфти при робочому тиску  $P_p$ ;  $D_T$  – внутрішній діаметр труби;  $\delta_T$  – товщина стінки труби.

Після встановлення муфти на трубопровід з внутрішнім тиском  $P_y$  і заповненні підмуфтового простору клейовим складом, запресованого під тиском  $P_{MY}$ , кільцеві напруження розтягнення в стінці труби зменшаться до значення  $\sigma_{TY}$ :

$$\sigma_{TY} = \frac{(P_y - P_{MY}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}, \quad (2.2.28)$$

При цьому в оболонці муфти будуть діяти кільцеві напруження, які визначаються залежністю:

$$\sigma_{M1} = \frac{P_{MY} \cdot (D_T + \delta_T + \delta_{\text{III}})}{2 \cdot \delta_M}, \quad (2.2.29)$$

Для повного розвантаження зовнішньої оболонки муфти, тиск всередині трубопроводу повинен бути знижений на величину  $P_{MY}$ . Тобто, в цьому випадку перепад тисків між стінками труби становитиме

$$P_y - P_{MY} = P_{y0} = \frac{2 \cdot \sigma_T \cdot \delta_T}{D_T}, \quad (2.2.30)$$

де  $P_{y0}$  – тиск в трубопроводі при нульовому тиску в підмуфтовому просторі встановленої муфти, заповненому самотвердіючої масою.

При цьому в трубі діють залишкові кільцеві напруження  $\sigma_{T2}$ , в той час як оболонка муфти буде перебувати в ненавантаженому стані ( $\sigma_{M2} = 0$ ).

$$\sigma_{T2} = \frac{(P_y - P_{MY}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}, \quad (2.2.31)$$

Надалі, в разі зміни тиску всередині трубопроводу  $P_p$ , тиск в підмуфтовому просторі  $P_M$  буде змінюватися відповідно виразом [164]:

$$P_M = \frac{P_p}{k} - P_{M0}, \quad (2.2.32)$$

де  $P_{M0}$  – тиск в підмуфтовому просторі при нульовому значенні тиску всередині трубопроводу;  $k$  – коефіцієнт, що зв'язує зміну тиску в підмуфтовому просторі зі зміною тиску всередині трубопроводу (коефіцієнт зв'язку).

При певних припущеннях (нестисливості затверділого клейового шару і незначною товщині підмуфтового простору ( $\delta_{III} \ll \delta_M$ )), вираз для кільцевих напружень розтягу в стінці труби зі встановленою муфтою з наповненням, може бути записано у вигляді:

$$\sigma_{Tp} = \frac{(P_y - k \cdot P_{MY}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T} + \frac{(P_p - (P_y - k \cdot P_{MY})) \cdot D_T}{2 \cdot (\delta_T + \delta_M)}, \quad (2.2.33)$$

при цьому кільцеві напруження  $\sigma_{Mp}$  в оболонці муфти визначаються виразом:

$$\sigma_{Mp} = \frac{(P_p - (P_y - k \cdot P_{MY})) \cdot D_T}{2 \cdot (\delta_T + \delta_M)}. \quad (2.2.34)$$

Ефективність посилення трубопроводу оцінюється ступенем зниження кільцевих напружень в стінці ремонтної труби:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{\left( \frac{(P_y - k \cdot P_{MY}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T} + \frac{(P_p - (P_y - k \cdot P_{MY})) \cdot D_T}{2 \cdot (\delta_T + \delta_M)} \right)}{\frac{P_p \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}}, \quad (2.2.35)$$

звідки:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{P_y - k \cdot P_{MY}}{P_p} + \frac{1 - \frac{P_y - k \cdot P_{MY}}{P_p}}{1 + \frac{\delta_M}{\delta_T}}, \quad (2.2.36)$$

для прийнятих раніше припущень, коефіцієнт зв'язку  $k$  буде визначається виразом:

$$k = \frac{\delta_M + \delta_T}{\delta_M}, \quad (2.2.37)$$

Для окремого випадку, коли  $(\delta_T \approx \delta_M)$   $k = 2$ .

При установці муфти на трубопровід з тиском  $P_y$  без створення тиску в підмуфтовому просторі ( $P_{MY} = 0$ ), вираз (2.2.36) приводиться до широко відомого виду [154]:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{P_y}{P_p} + \frac{1 - \frac{P_y}{P_p}}{1 + \frac{\delta_M}{\delta_T}}, \quad (2.2.38)$$

Слід зазначити, що прийняті обмеження правомірні тільки для великих трубопроводів з малою глибиною підмуфтового простору, тому вираз (2.2.36) може бути використано тільки для вирішення окремих завдань.

Рівняння, що описує ступінь зниження кільцевих напружень в стінці ремонтної труби в реальних умовах може бути отримано з виразу (2.2.32). Значення тиску  $P_{M0}$  в вираженні визначається тиском в підмуфтовому просторі  $P_{MY}$  і тиском усередині трубопроводу, під час встановлення муфти  $P_y$  і пов'язане з ними простим співвідношенням:

$$P_{M0} = \frac{P_y}{k} - P_{MY}, \quad (2.2.39)$$

звідки

$$P_M = \frac{P_p}{k} - \frac{P_y}{k} + P_{MY}, \quad (2.2.40)$$

У разі, якщо для заповнення підмуфтового простору використовується речовина, що дає усадку або розширюється в процесі затвердіння, тиск в підмуфтовому просторі по закінченню перехідних процесів, зміниться на деяку величину  $\Delta P$ . В цьому випадку, вираз (2.2.40) запишеться у вигляді:

$$P_M = \frac{P_p}{k} - \frac{P_y}{k} + P_{MY} - \Delta P, \quad (2.2.41)$$

У трубі під муфтою діють кільцеві напруження, що визначаються виразом:

$$\sigma_{Tp} = \frac{(P_p - P_M) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}, \quad (2.2.42)$$

або з урахуванням (2.2.32) і (2.2.41):

$$\begin{aligned}\sigma_{Tp} &= \frac{(P_p - \frac{P_p}{k} - P_{MY} + \Delta P + \frac{P_y}{k}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T} = \\ &= \frac{((k-1) \cdot P_p - k \cdot (P_{MY} - \Delta P) + P_y) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T \cdot k}.\end{aligned}\quad (2.2.43)$$

В цьому випадку, ступінь зниження кільцевих напружень в стінці ремонтної труби:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = \frac{(k-1) \cdot P_p - k \cdot (P_{MY} - \Delta P) + P_y}{P_p \cdot k} = 1 - \frac{1}{k} - \frac{\frac{P_y - k \cdot (P_{MY} - \Delta P)}{k}}{P_p}.\quad (2.2.44)$$

У розділі 2.2.1 обрано критерій оцінки ефективності посилення трубопроводу за допомогою муфти з внутрішнім заповненням у вигляді ступіня зниження напружень в посилюваній трубі  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}$  при рівномірному розподілі навантаження між трубою і муфтою. Рівномірний розподіл навантаження між трубою і муфтою передбачає незалежність відношення  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}$  від тиску в трубопроводі. Тиск, при якому забезпечується рівномірний розподіл навантаження між трубою і муфтою можна вважати оптимальним ( $P_{MY\ on}$ ).

Прирівнявши похідну  $\frac{\partial \left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} \right)}{\partial P_p}$  до нуля легко отримати вираз для тиску в підмуфтовому просторі на момент встановлення муфти, при якому розподіл напружень між стінками посилюваної труби і муфти залишається постійним при зміні тиску в трубопроводі:

$$\frac{\partial \left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} \right)}{\partial P_p} = \frac{\partial \left( 1 - \frac{1}{k} - \frac{\frac{P_y - k \cdot (P_{MY} - \Delta P)}{k}}{P_p} \right)}{\partial P_p} = \frac{k \cdot (\Delta P - P_{MY}) + P_y}{k \cdot P_p^2} = 0,\quad (2.2.45)$$



звідки:

$$P_{MYon} = \frac{P_y}{k} + \Delta P, \quad (2.2.46)$$

Практичне використання отриманих залежностей передбачає наявність вираження для коефіцієнта зв'язку  $k$ , яке може бути отримано в результаті аналітичного рішення рівнянь (2.2.25 і 2.2.26).

Вирази (2.2.25–2.2.26) можуть бути спрощені на підставі підходу проф. Ориняка І.В. [90] до вирішення даного завдання.

З урахуванням того, що модуль пружності речовини шару підмуфтового простору, як правило, значно менше модуля пружності матеріалу труби і муфти  $E_{III} \ll (E_T = E_{M\phi})$ , правомірно припустити рівність тисків на границях підмуфтового простору  $P_{III1} \approx P_{III2}$ . Однак використовувати це припущення можна тільки за умови виключення з рівнянь (2.2.25–2.2.26) виразів, що містять різницю цих тисків, тобто,  $(P_{III1} - P_{III2})$ . Для цього рівняння (2.2.25) множиться на  $\mu(1 + \mu)$ , а (2.2.26) на  $(1 - \mu^2)$ , після чого рівняння складаються. Результуючий вираз після заміни  $P_{III1} = P_{III2} = P_M$ , може бути записано у вигляді:

$$\frac{P_M}{E_{III}} Z_1(\mu) = \frac{W_T}{\delta_{III}} Z_2(\mu) - \frac{W_M}{\delta_{III}} Z_3(\mu), \quad (2.2.47)$$

$$\text{де: } Z_1(\mu) = (1 - 3\mu^2), \quad (2.2.48)$$

$$Z_2(\mu) = \left( (1 - \mu^2) - \frac{\mu(1 + \mu)\delta_{III}}{D_{III}} \right), \quad (2.2.49)$$

$$Z_3(\mu) = \left( (1 - \mu^2) + \frac{\mu(1 + \mu)\delta_{III}}{D_{III}} \right). \quad (2.2.50)$$

Після підстановки виразів (2.2.16 і 2.2.17) в (2.2.47):

$$\frac{P_M}{E_{III}} Z_1(\mu) = \frac{P_P \cdot D_T^2}{4 \cdot E_T \cdot \delta_T \cdot \delta_{III}} Z_2(\mu) - \frac{P_M \cdot D_T^2}{4 \cdot E_T \cdot \delta_T \cdot \delta_{III}} Z_2(\mu) - \frac{P_M \cdot D_M^2}{4 \cdot E_{M\phi} \cdot \delta_M \cdot \delta_{III}} Z_3(\mu) \quad (2.2.51)$$

Найчастіше на практиці муфти виготовляють з матеріалу аналогічного матеріалу основної труби [24]. Після підстановки  $E_T = E_{M\phi} = E_M$  і нескладних перетворень вираз (2.2.14) приводиться до вигляду:

$$P_M = \frac{P_P}{1 + \frac{Z_1(\mu) \cdot 4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{Z_2(\mu) \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T \cdot Z_3(\mu)}{D_T^2 \cdot \delta_M \cdot Z_2(\mu)}} , \quad (2.2.52)$$

Для малих, в порівнянні з діаметром трубопроводу, значень глибини підмуфтового простору, справедливо прийняти  $Z_3(\mu) \approx Z_2(\mu)$ , а формулу (2.2.52) представити у вигляді:

$$P_M = \frac{P_P}{1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{\frac{Z_2(\mu)}{Z_1(\mu)} \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M}} . \quad (2.2.53)$$

Вираз (2.2.53) за структурою не відрізняється від відомого, наведеного в [141], однак дозволяє врахувати вплив коефіцієнта Пуассона речовини підмуфтового шару на процес розвантаження посилюваної труби [90].

$$P_M = \frac{P_P}{1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M}} . \quad (2.2.54)$$

Прирівнявши вирази (2.2.54) до (2.2.32) при  $P_{M0} = 0$ , отримаємо вираз для коефіцієнт зв'язку  $k$ :

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{\frac{Z_2(\mu)}{Z_1(\mu)} \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M} . \quad (2.2.55)$$

Для трубопроводів великого діаметру з малою глибиною підмуфтового простору  $\frac{Z_2(\mu)}{Z_1(\mu)} \approx \frac{1-\mu^2}{1-3\mu^2}$ . В цьому випадку вираз (2.2.55) приводиться до вигляду [90]:

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{\frac{1-\mu^2}{1-3\mu^2} \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M} . \quad (2.2.56)$$

При використанні для заповнення підмуфтового простору еластичною самотвердіючою маси, наприклад, на поліуретановій основі, яка характеризується найбільш високим серед ізотропних речовин значенням коефіцієнта Пуассона ( $\mu \approx 0,5$ ), ставлення  $\frac{Z_2(\mu)}{Z_1(\mu)} \approx 3$ , що відповідає збільшенню модуля пружності речовини підмуфтового шару майже в три рази. У цьому випадку коефіцієнт  $k$  може розраховуватися за формулою:

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{3 \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M} \quad (2.2.57)$$

На рис. 2.2.3 і 2.2.3 наведені графіки, отримані в результаті розрахунку по виведеним раніше формулами.

Таким чином, для забезпечення рівномірного розподілу напружень між трубою і муфтою, речовина повинна запресовуватися в підмуфтовий простір під тиском, значення якого визначається з виразу (2.2.46). Разом з тим, коефіцієнт зв'язку  $k$  залежить від глибини підмуфтового простору  $\delta_{III}$ , який, в свою чергу, залежить від тиску запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір.

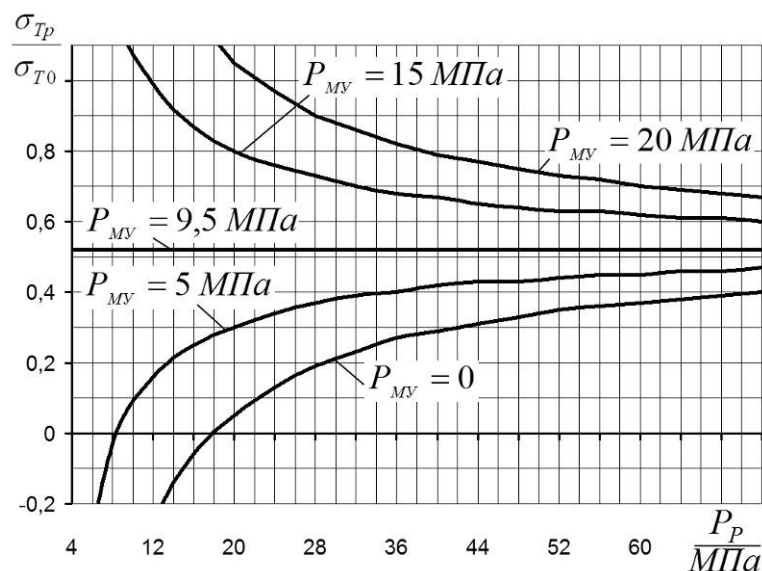


Рис. 2.2.2. Залежність тиску в підмуфтовому просторі від тиску в трубопроводі:

$D_T = 1400 \text{ мм}$ ,  $\delta_T = 9 \text{ мм}$ ,  $\delta_M = 9 \text{ мм}$ ,  $\delta_{III} = 3 \text{ мм}$ ,  $P_y = 20 \text{ МПа}$ ,  
наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55 \text{ МПа}$ ,  $\mu_{III} = 0,48$ )

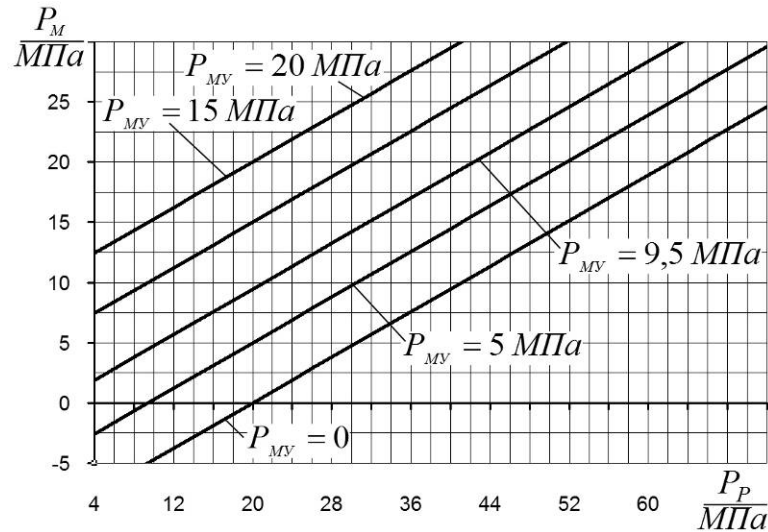


Рис. 2.2.3. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби від тиску в трубопроводі:

$D_T = 1400 \text{ мм}$ ,  $\delta_T = 9 \text{ мм}$ ,  $\delta_M = 9 \text{ мм}$ ,  $\delta_{III} = 3 \text{ мм}$ ,  $P_y = 20 \text{ МПа}$ ,  
наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55 \text{ МПа}$ ,  $\mu_{III} = 0,48$ )

Оцінити залежність глибини підмуфтового простору  $\delta_{III}$  від тиску запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір можна наступним чином.

На діючому трубопроводі ремонтні роботи найчастіше виконуються під тиском на напруженій трубі. В цьому випадку зовнішній діаметр трубопроводу в момент встановлення муфти визначається виразом:

$$D_{TVH} = D_T + \delta_T + \Delta D_{TVH}, \quad (2.2.58)$$

де  $\Delta D_{TVH}$  – деформація трубопроводу під дією внутрішнього тиску  $P_y$  в момент встановлення муфти.

Або, з урахуванням виразу для деформацій (2.2.12):

$$D_{TVH} = D_T + \delta_T + \frac{P_y \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}. \quad (2.2.59)$$

Муфти на трубопровід встановлюються через спеціальні технологічні кільця, висота яких задає початкову глибину підмуфтового простору  $\delta_{IIIУН}$ . В цьому випадку, внутрішній діаметр муфти визначається виразом:

$$D_M = D_{TVH} + \delta_{IIIУН} = D_T + \delta_T + \frac{P_y \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T} + \delta_{IIIУН}. \quad (2.2.60)$$

Після запресовування в підмуфтовий простір самотвердіючої речовини під деяким тиском  $P_{MY}$  напружена труба піддається стиску, а муфта – розтягуванню. В цьому випадку, зовнішній діаметр трубопроводу стане рівним  $D_{TY3}$ , а внутрішній діаметр муфти  $D_{MY3}$ :

$$D_{TY3} = D_T + 2 \cdot \delta_T + \frac{(P_Y - P_{MY}) \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T}, \quad (2.2.61)$$

$$D_{MY3} = D_T + 2 \cdot \delta_T + \frac{P_Y \cdot D_T^2}{2 \cdot E_T \cdot \delta_T} + 2 \cdot \delta_{ППУН} + \frac{P_{MY} \cdot D_M^2}{2 \cdot E_M \cdot \delta_M}. \quad (2.2.62)$$

Глибина підмуфтового простору після його заповнення самотвердіючою масою і закінчення процесів твердіння може бути визначена з виразу:

$$\delta_{ПП} = \frac{D_{MY3} - D_{TY3}}{2}. \quad (2.2.63)$$

У разі якщо муфта виготовлена з матеріалу аналогічного матеріалу ремонтної труби ( $E_M = E_T$ ,  $\mu_M = \mu_T$ ), то вираз (2.2.63) може бути представлено у вигляді:

$$\delta_{ПП} = \delta_{ППУН} + \frac{P_{MY}}{4 \cdot E_T} \cdot \left( \frac{D_T^2}{\delta_T} + \frac{(D_T + 2 \cdot \delta_T + 2 \cdot \delta_{ППУН})^2}{\delta_M} \right). \quad (2.2.64)$$

Таким чином оцінка ефективності муфтового ремонту трубопроводів, що визначається ступенем зниження напружень в ремонтній трубі, може проводитися на підставі рішення системи взаємопов'язаних рівнянь (2.2.44, 2.2.46, 2.2.56, 2.2.64).

Практичний інтерес представляють залежності ступеня зниження напружень в трубі під муфтою від тиску, при якому було здійснено встановлення муфти на трубопровід і тиску запресовування самотвердіючої речовини, від якого залежить глибина підмуфтового простору.

Графіки, отримані в результаті рішення системи рівнянь (2.2.44, 2.2.46, 2.2.56, 2.2.64), без урахування об'ємної усадки або розширення матеріалу підмуфтового шару, наведені на рис. 2.2.4.

З графіків видно, що ефективність розвантаження труби при збільшенні тиску встановлення муфти знижується незначно. Таким чином, значення тиску в трубопроводі, при якому може здійснюватися монтаж муфти, не є критичним і не може обмежуватися з міркувань ефективності ремонту.

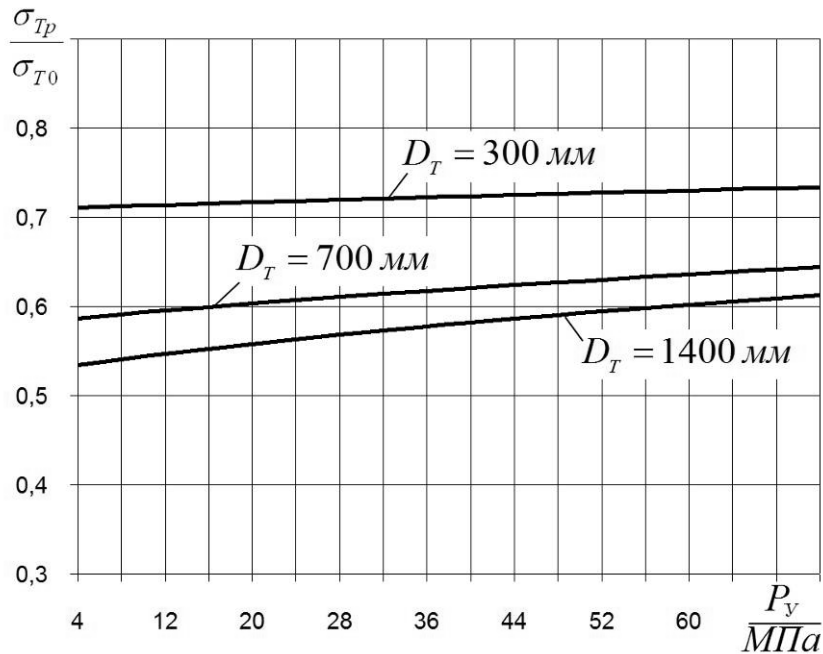


Рис. 2.2.4. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби від тиску встановлення при оптимальному тиску запресовування

$$P_{MY} = \frac{P_y}{k}, \quad \delta_T = 9 \text{ мм}, \quad \delta_M = 9 \text{ мм}, \quad \delta_{IIIY} = 3 \text{ мм},$$

наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55 \text{ МПа}$ ,  $\mu_{III} = 0,48$ )

Отримані графіки ілюструють роботу муфтової конструкції при відсутності зміни тиску в підмуфтовому просторі після запресовування самотвердіючої речовини під час перехідних процесів твердіння. Дана зміна тиску може бути викликана зміною обсягу самотвердіючої речовини в результаті усадки (наприклад, для речовини, що має епоксидну основу) або розширення (речовини на основі бетону або поліуретану). Крім того, зміна тиску всередині підмуфтового простору протягом деякого часу після запресовування самотвердіючої речовини може бути додатково викликано його високою в'язкістю і пов'язаною з цим обмеженою швидкістю розподілу використаної речовини в підмуфтовому просторі, що має складний профіль з малим прохідним перетином.

У разі якщо в процесі вирівнювання тиску речовини по всьому підмуфтовому простору і (або) його усадки (розширення) в процесі його твердіння, має місце зміна тиску в підмуфтовому просторі на деяку величину  $\Delta P$  при незмінній величині тиску всередині труби, оптимальний тиск запресовування визначається виразом (2.2.46).

В умовах коли на зміну тиску в підмуфтовому просторі надає домінуючий вплив усадка (розширення) використовуюваного для цілей заповнення самотвердіючої речовини, величина  $\Delta P$  може бути визначена виходячи з таких міркувань.

При запресовуванні в порожнину між трубою і муфтою самотвердіючої маси під де яким тиском  $P_{MY}$ , обсяг підмуфтового простору буде визначатися величиною взаємної деформації труби і муфти, що визначаються виразами (2.2.16) і (2.2.17):

$$V_{III} = \frac{L_{III} \cdot \pi}{4} (D_{MVZ}^2 - D_{TVZ}^2), \quad (2.2.65)$$

де  $L_{III}$  – довжина підмуфтового простору.

В фізичний обсяг  $V_{III}$  входить певний обсяг самотвердіючої речовини, який визначається його модулем пружності  $E_{III}$ , коефіцієнтом Пуассона  $\mu_{III}$  і тиском запресування  $P_{MY}$ .

Нехай до запресовування все увійшло в підмуфтовий простір і речовина займала обсяг  $V_0$ . Можна вважати, що до деформації:

$$V_0 = x \cdot r \cdot \theta. \quad (2.2.66)$$

У деформованому стані обсяг самотвердіючої речовини змінився і став рівним [[29,125]:

$$V_{III} = (x + \Delta x) \cdot (r + \Delta r) \cdot (\theta + \Delta \theta) = x \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right) \cdot r \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) \cdot \theta \left(1 + \frac{\Delta \theta}{\theta}\right), \quad (2.2.67)$$

де  $\Delta x, \Delta r, \Delta \theta$  – подовження речовини підмуфтового шару в поздовжньому, радіальному і окружному напрямках.

З урахуванням (2.2.66) допущення відсутності деформацій підмуфтового простору в поздовжньому напрямку ( $\Delta x = 0$ ) і виразів для відносних деформацій

$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x}, \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r}, \varepsilon_\theta = \frac{\Delta \theta}{\theta}$ , вираз (2.2.67) може бути записано у вигляді:

$$V_{III} = x \cdot r \cdot \theta (1 + \varepsilon_r) \cdot (1 + \varepsilon_\theta) = V_0 (1 + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r + \varepsilon_r \varepsilon_\theta), \quad (2.2.68)$$

з огляду на незначну відносну деформацію в порівнянні з одиницею, значенням  $\varepsilon_r \varepsilon_\theta$  правомірно знехтувати:

$$V_{III} = V_0 (1 + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r), \quad (2.2.69)$$

З урахуванням виразів для відносних деформацій (2.1.25, 2.1.26), наведених раніше, вираз для суми  $(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r)$  може бути представлено у вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = & \frac{(P_{III1} - P_{III2})D_{III}}{2 \cdot \delta_{III} \cdot E_{III}} (1 - \mu^2) + \frac{P_{III1} + P_{III2}}{2 \cdot E_{III}} \mu(1 + \mu) - \\ & - \frac{P_{III1} + P_{III2}}{2 \cdot E_{III}} (1 - \mu^2) - \frac{(P_{III1} - P_{III2})D_{III}}{2 \cdot \delta_{III} \cdot E_{III}} \mu(1 + \mu) \end{aligned} \quad (2.2.70)$$

звідки:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = & \frac{(P_{III1} - P_{III2})D_{III}}{2 \cdot \delta_{III} \cdot E_{III}} ((1 - \mu^2) - \mu(1 + \mu)) + \\ & + \frac{P_{III1} + P_{III2}}{2 \cdot E_{III}} (\mu(1 + \mu) - (1 - \mu^2)) = \end{aligned} \quad (2.2.71)$$

$$\frac{1}{2 \cdot E_{III}} \left( P_{III1} \left( \frac{D_{III}}{\delta_{III}} - 1 \right) - P_{III2} \left( \frac{D_{III}}{\delta_{III}} + 1 \right) \right) (1 - 2\mu)(1 + \mu)$$

При припущеннях, прийнятих раніше, правомірно припустити рівність тисків на границях підмуфтового простору  $P_{III1} \approx P_{III2}$  і ввести заміну  $P_{MY} = P_{III1} = P_{III2}$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = & \frac{1}{2 \cdot E_{III}} \left( P_M \left( \frac{D_{III}}{\delta_{III}} - 1 \right) - P_M \left( \frac{D_{III}}{\delta_{III}} + 1 \right) \right) (1 - 2\mu)(1 + \mu) = \\ & - \frac{P_M}{E_{III}} (1 - 2\mu)(1 + \mu) \end{aligned} \quad (2.2.72)$$

Підстановка (2.2.72) в (2.2.69) дає вираз, що дозволяє розрахувати первинний об'єм самотвердіючої речовини і запресувати під тиском  $P_{MY}$  в підмуфтовий простір з фізичним обсягом  $V_{III}$ :

$$V_0 = \frac{V_{III}}{1 - \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu) \cdot P_{MY}}{E_{III}}}, \quad (2.2.73)$$

Якщо в процесі твердіння обсяг речовини зміниться в  $m$  раз (тобто,  $V_{OK} = m \cdot V_0$ , де  $m$  – кратність усадки самотвердіючої речовини), то це призведе



до зміни тиску в підмуфтовому просторі на величину  $\Delta P$  і пов'язаного з ним зменшення фізичного обсягу підмуфтового простору. Таким чином, завдання знаходження значення  $\Delta P$  зводиться до визначення величини фізичного обсягу підмуфтового простору  $V_{пшк}$ , відповідного значенню  $V_{ок}$ .

Для опису об'ємних змін речовин в процесі твердіння поряд з кратністю  $m$  часто використовують параметр коефіцієнт усадки  $m_{\%}$ , які пов'язані між собою простими співвідношеннями:

$$m_{\%} = \frac{V_0 - V_{ок}}{V_0} \cdot 100\% = (1 - m) \cdot 100\%, \quad (2.2.74)$$

$$m = 1 - \frac{m_{\%}}{100\%}. \quad (2.2.75)$$

Графіки, що показують залежність тиску в підмуфтовому просторі від коефіцієнта усадки самотвердіючої речовини, отримані в результаті спільного рішення рівнянь (2.2.44, 2.2.46, 2.2.56, 2.2.64, 2.2.73, 2.2.74) представлені на рис. 2.2.5–2.2.7.

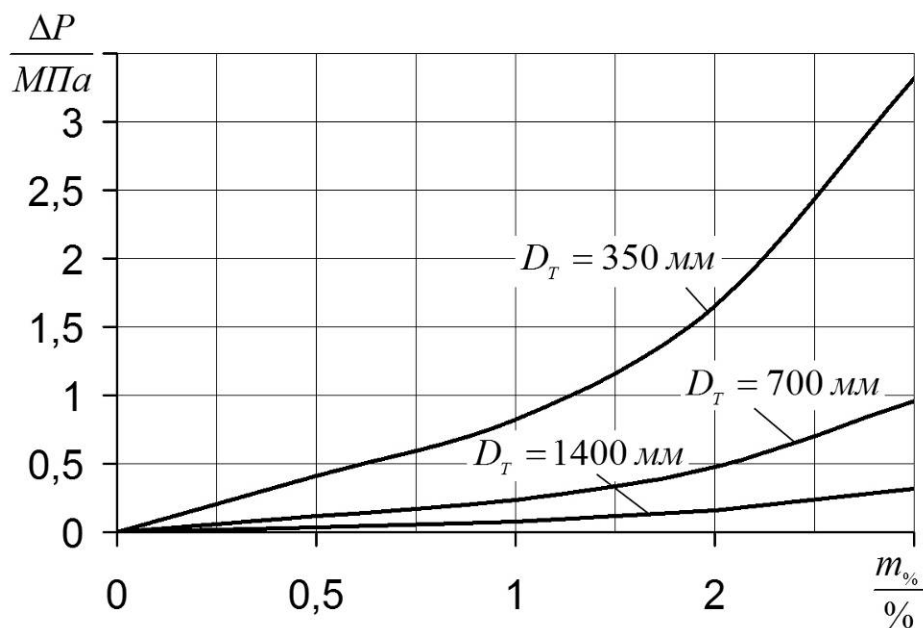


Рис. 2.2.5. Залежність зниження тиску в підмуфтовому просторі від коефіцієнта усадки самотвердіючої речовини,  
 $\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $\delta_{пш} = 3$  мм,  $P_{MV} = 2,5$  МПа,  
 наповнювач SZLAST ( $E_{пш} = 55$  МПа,  $\mu_{пш} = 0,48$ )

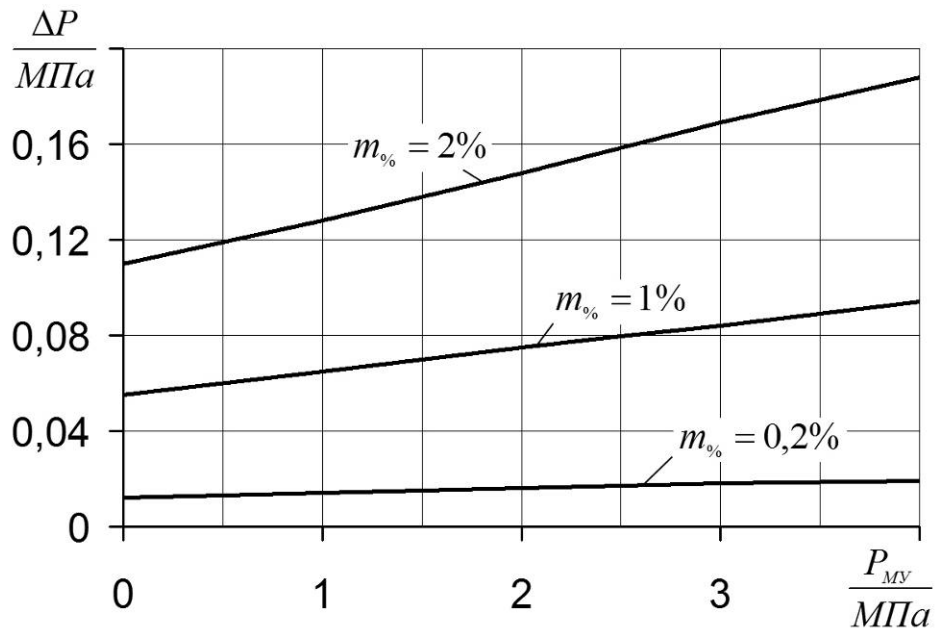


Рис. 2.2.6. Залежність зниження тиску в підмуфтовому просторі від тиску запресовування самотвердіючої речовини,  $\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $\delta_{\text{пш}} = 3$  мм,  $D_T = 1400$  мм, наповнювач SZLAST ( $E_{\text{пш}} = 55$  МПа,  $\mu_{\text{пш}} = 0,48$ )

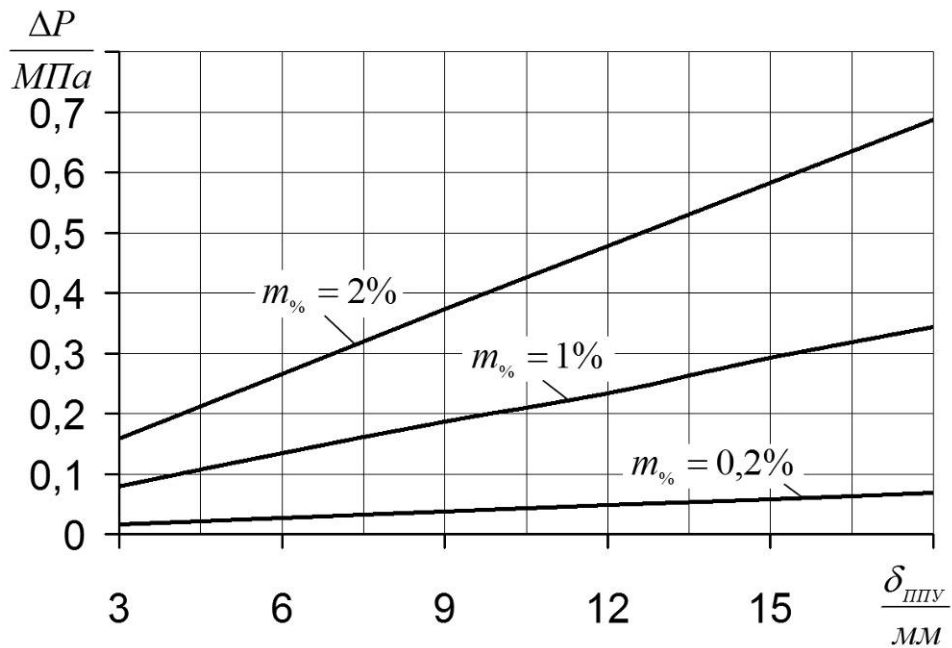


Рис. 2.2.7. Залежність зниження тиску в підмуфтовому просторі від глибини підмуфтового простору,  $\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $P_{MV} = 2,5$  МПа,  $D_T = 1400$  мм, наповнювач SZLAST ( $E_{\text{пш}} = 55$  МПа,  $\mu_{\text{пш}} = 0,48$ )

#### 2.2.4. Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу геометричних параметрів трубопроводу і муфтової конструкції

Ефективність посилення трубопроводу за допомогою муфти з наповненням визначається ступенем зниження окружних механічного напруження в стінці труби, яка залежить від геометричних параметрів труби, муфти і підмуфтового шару.

Оцінка впливу даних параметрів ( $D_T$ ,  $\delta_T$ ,  $\delta_{IIIY}$ ,  $\delta_M$ ) на ступінь зниження окружних напружень в трубі може бути проведена в результаті спільного рішення взаємопов'язаних рівнянь (2.2.44, 2.2.46, 2.2.56, 2.2.64, 2.2.73, 2.2.74). Графіки, отримані в результаті розрахунків, представлені на рис. 2.2.8–2.2.12.

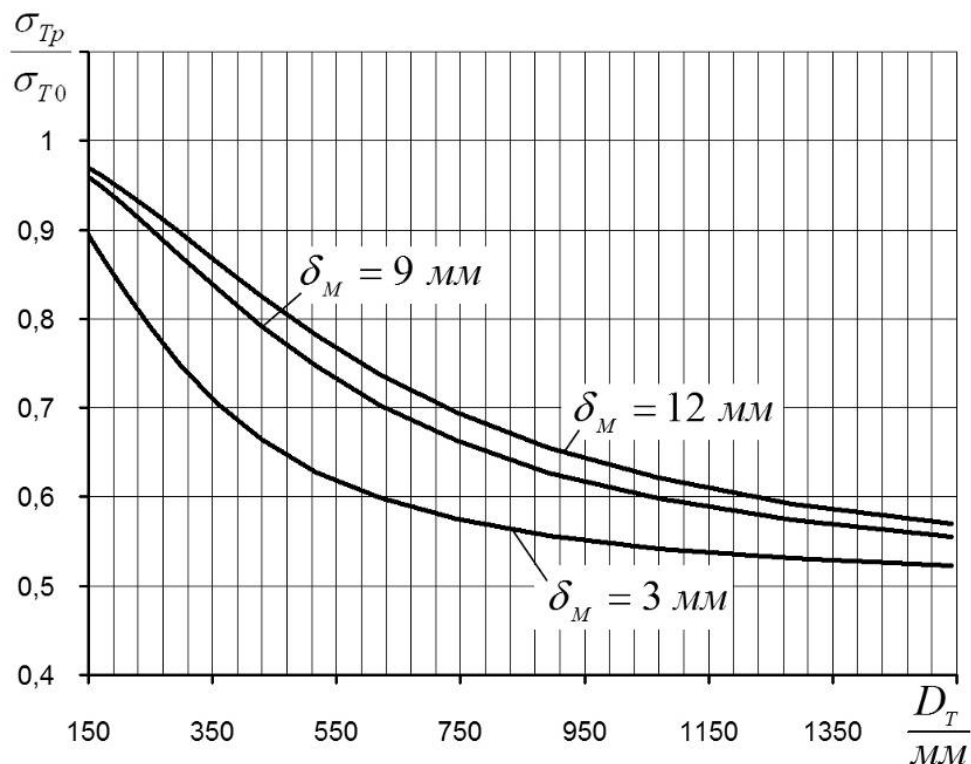


Рис. 2.2.8. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби під муфтою від діаметра трубопроводу,  $\delta_T = 9$  мм,  $\delta_{IIIY} = 3$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ , наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55$  МПа,  $\mu_{III} = 0,48$ )

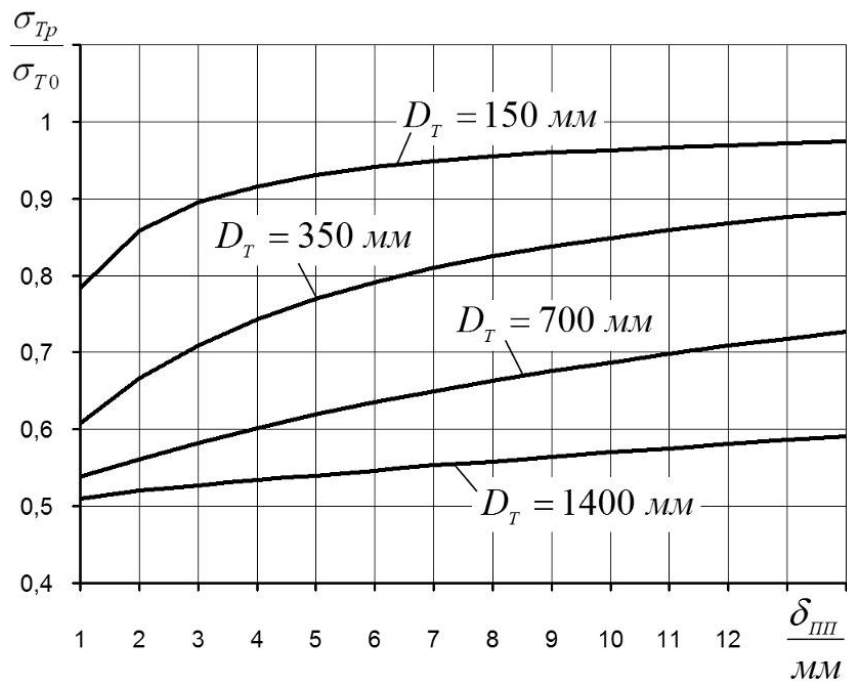


Рис. 2.2.9. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби під муфтою від глибини підмуфтового простору  
 $\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,  
 наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55$  МПа,  $\mu_{III} = 0,48$ )

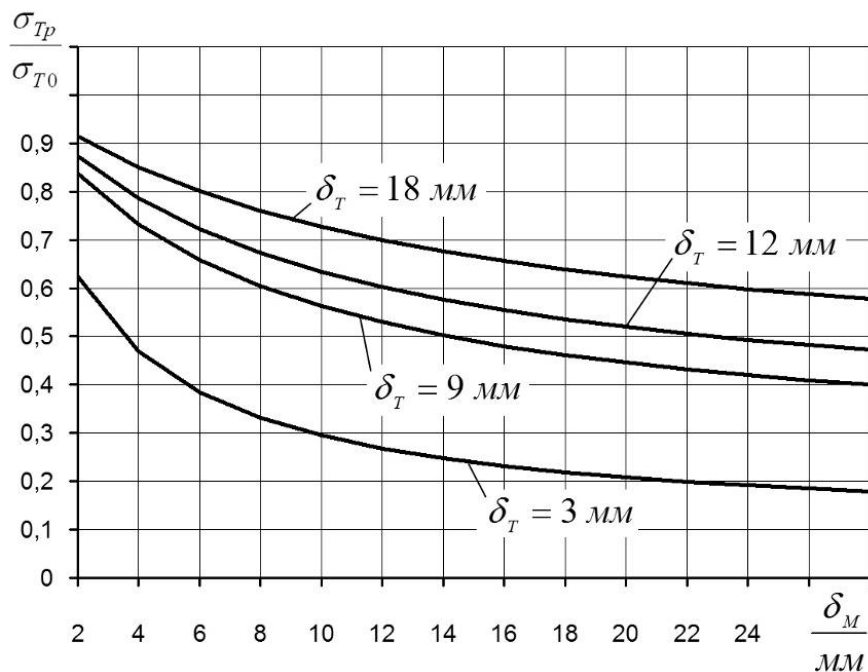


Рис. 2.2.10. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби під муфтою від товщини стінки муфти  
 $\delta_T = 9$  мм,  $D_T = 1400$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,  
 наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55$  МПа,  $\mu_{III} = 0,48$ )

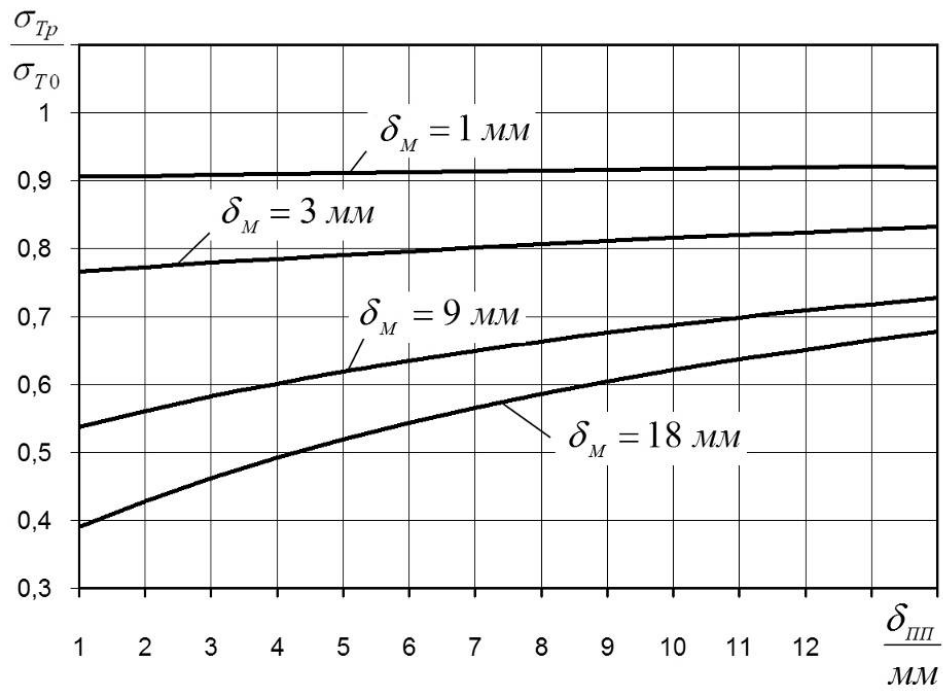


Рис. 2.2.11. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби під муфтою від глибини підмуфтового простору

$\delta_T = 9$  мм,  $D_T = 1400$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,

наповнювач SZLAST ( $E_{III} = 55$  МПа,  $\mu_{III} = 0,48$ )

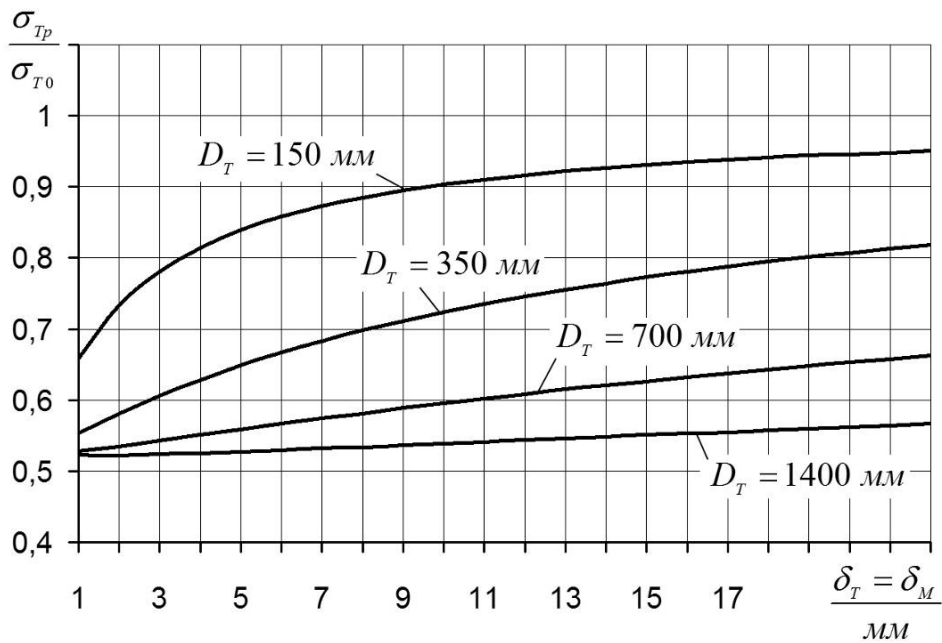


Рис. 2.2.12. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби під муфтою від товщини стінки муфти (труби)

$D_T = 1400$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,  $E_{III} = 55$  МПа,  $\mu_{III} = 0,48$

### 2.2.5. Теоретичні дослідження впливу на ефективність посилення трубопроводу міцності властивостей формованого підмуфтового шару

Показники за міцністю використовуваної для заповнення підмуфтового простору речовини впливають на ефективність муфтового ремонту трубопроводу. Від модуля пружності речовини і його коефіцієнта Пуассона безпосередньо залежить коефіцієнт зв'язку  $k$  і опосередковане значення зниження тиску в підмуфтовому просторі від усадки речовини під час твердіння.

Кількісна оцінка впливу модуля пружності речовини і його коефіцієнта Пуассона на ступінь зниження окружних напружень в стінці посилюваної труби може бути проведена на основі рішення системи взаємозалежних рівнянь (2.2.44, 2.2.46, 2.2.56, 2.2.64, 2.2.73, 2.2.74). Графіки, отримані в результаті рішення даних рівнянь, представлені на рис. 2.2.13–2.2.15.

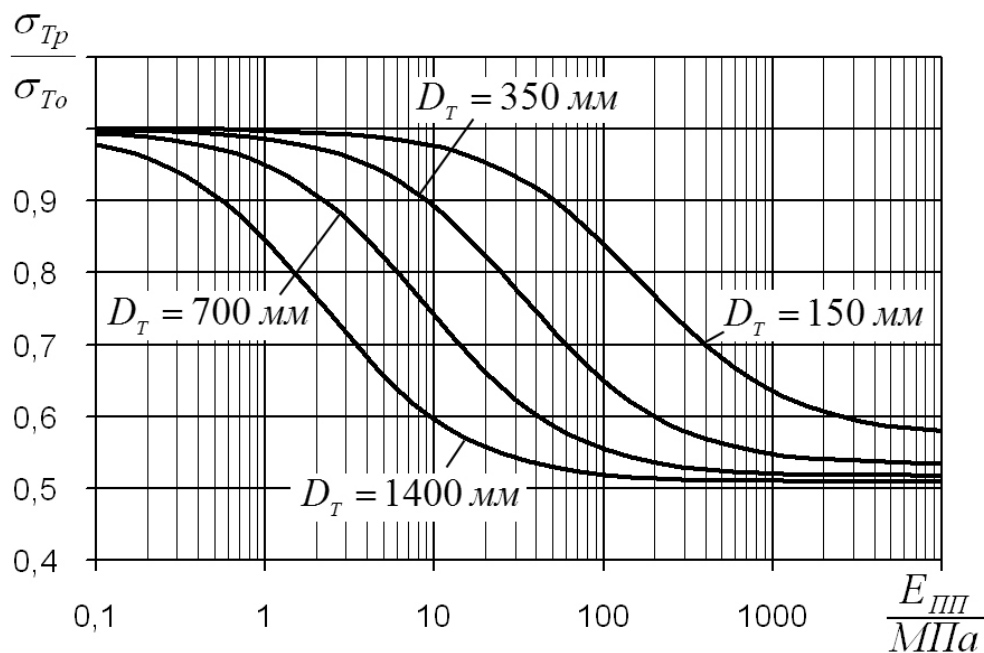


Рис. 2.2.13. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці посилюваної труби від модуля пружності речовини підмуфтового шару

$$\delta_T = 9 \text{ мм}, \delta_M = 9 \text{ мм}, \delta_{ППУ} = 3 \text{ мм}, P_v = 5,5 \text{ МПа},$$

$$P_{MY} = P_{MYonm}, \mu_{ПП} = 0,48$$

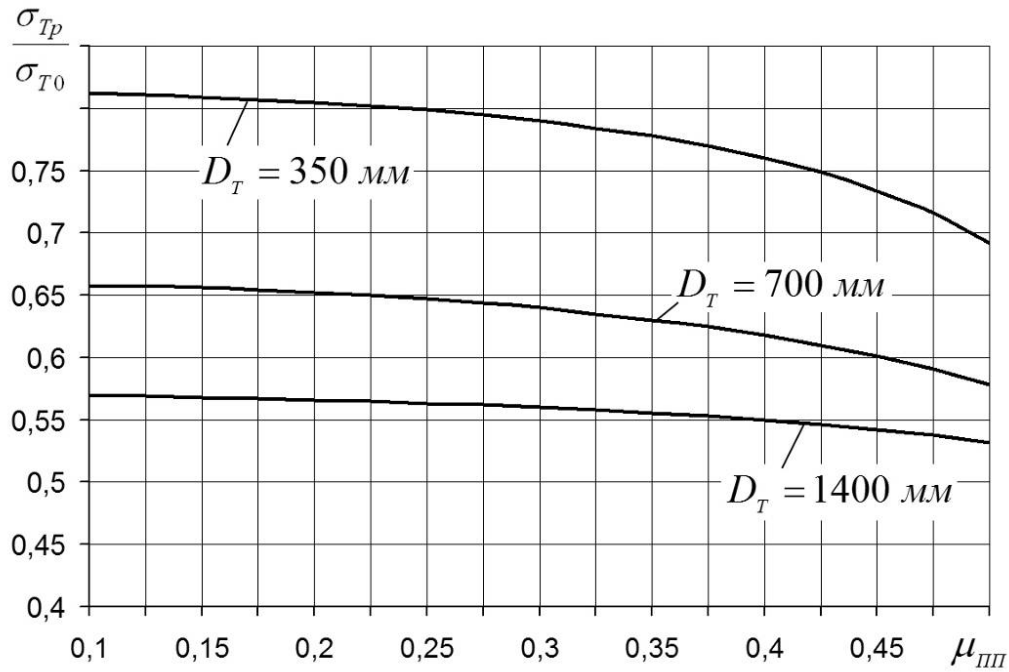


Рис. 2.2.14. Залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці посилюваної труби від коефіцієнта Пуассона речовини підмуфтового шару

$\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $\delta_{IIIY} = 3$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,  $E_{III} = 55$  МПа

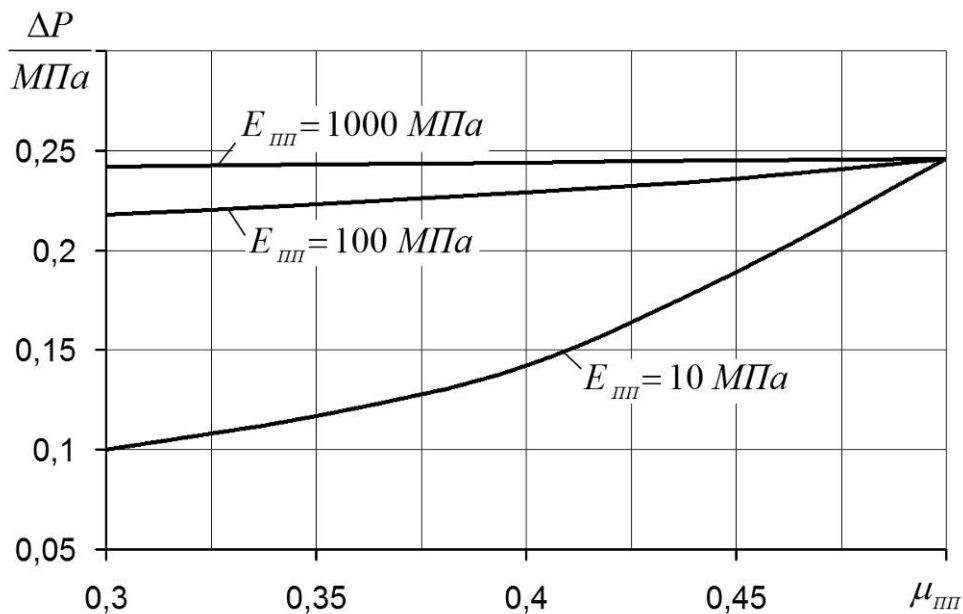


Рис. 2.2.15. Залежність зниження тиску в підмуфтовому просторі при 1% усадки речовини від його коефіцієнта Пуассона

$\delta_T = 9$  мм,  $\delta_M = 9$  мм,  $\delta_{IIIY} = 3$  мм,  $P_y = 5,5$  МПа,  $P_{MY} = P_{MYonm}$ ,  $E_{III} = 55$  МПа

### 2.3. Розробка вимог до обсягу контролю якості монтажу клеєзварної муфти на трубопроводі

Вибір методу муфтового ремонту прив'язаний до особливостей конкретної ділянки трубопроводу. Тобто, такі параметри, як його діаметр  $D_T$ , товщина стінки  $\delta_T$ , матеріал труби, що характеризується, в першу чергу, його модулем пружності  $E_T$  і коефіцієнтом Пуассона  $\mu_T$ , максимальний і робочий тиск  $P_p$  є заданими величинами. Всіма іншими параметрами (муфти, підмуфтового простору, самотвердіючої речовини і процесів запресування) в певних межах можна варіювати. Вибір конкретної конструкції муфти і, зокрема, її торцевих ущільнювачів, є інженерним завданням, яке пов'язане з аналізом великої кількості приватних чинників. Разом з тим, загальні для всіх конструкцій закономірності роботи, розглянуті в попередніх підглавах, дозволяють пред'явити загальні вимоги, як до конструкції, так і до обсягу контролю, всебічний облік яких дає можливість максимізувати ефективність обраного варіанту посилення трубопроводу за допомогою муфт із внутрішнім наповненням.

Результати проведених теоретичних досліджень дають прості і очевидні відповіді: муфта повинна встановлюватися при мінімальному тиску всередині трубопроводу; товщина підмуфтового простору повинна бути мінімальною, краще нульовою; самотвердіюча речовина повинна мати максимально до можливого модуля пружності і коефіцієнта Пуассона, близький до 0,5, бути максимально текучою в рідкому стані, не мати усадки. Обсяг контролю повинен надавати точну інформацію про стан труби, оболонки, зварних швів, про процеси запресування самотвердіючої речовини в динаміці, зміна його характеристик в процесі твердіння. Однак на практиці роботи проводяться на діючих трубопроводах, що знаходяться під тиском, близькому до робочого; мінімальна товщина підмуфтового шару обмежена висотою валика зварного шва (3 мм) і навіть на безшовних трубах дуже важко забезпечити щільне прилягання поверхонь муфти і трубопроводу; характеристики реальної самотвердіючої речовини далекі від ідеальних, полімерна речовина з високим модулем пружності, як правило, має високу ціну і не годиться для масового застосування. У зв'язку з цим, вимоги до параметрів муфтових конструкцій і обсягу контролю повинні висуватися, виходячи на основі певних компромісів.



До параметрів, що впливають на ефективність посилення трубопроводу, якими в певних рамках можна варіювати, відносяться: характеристики матеріалу муфти (модуль пружності  $E_M$  і коефіцієнт Пуассона  $\mu_M$ ), товщина стінки муфти  $\delta_M$ , глибина установочного підмуфтового простору  $\delta_{III}$ , параметри самотвердіючої речовини (модуль пружності  $E_{III}$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu_{III}$ , коефіцієнт усадки  $m_{\%}$ ), тиск монтажу муфти  $P_{V0}$ , тиск остаточного встановлення муфти (визначається завершенням заповнення підмуфтового простору)  $P_V$ , тиск в підмуфтовому просторі після закінчення його заповнення  $P_{MV}$ . При цьому, при муфтовому посиленні трубопроводу, може вирішуватися одна з двох практичних завдань. Знаючи вимоги до ступеня зниження напружень в трубі, можна вибрати оптимальні параметри муфти, підмуфтового простору і процесу запресовування, які забезпечують вирішення задачі, або при заздалегідь заданих параметрах оцінити ефективність ремонту. При цьому рішення поставленого завдання частіше за все необхідно проводити в умовах обмеженого вибору параметрів (наприклад, використовується готова муфта, відсутні технологічні кільця потрібної товщини для центрування муфти, немає можливості змінювати тиск всередині трубопроводу під час проведення робіт і т. д.). У будь-якому випадку повинні вирішуватися питання про рішення задачі обмеженими засобами.

1. Матеріал муфти. Виготовлення муфт здійснюється відповідно до норм, ТУ та іншими керівними документами [24, 154, 157]. Як правило, муфти виготовляються з металу того ж хімічного складу, що і основна труба [154], що обмежує можливість варіювання такими параметрами, як  $E_M$  і  $\mu_M$ .

2. Тиск всередині трубопроводу на момент остаточного встановлення муфти  $P_V$  вибирається з урахуванням вимог документів, що регламентують порядок проведення ремонтних робіт муфтовий методом. При можливості тиск в трубопроводі бажано знизити, однак ця вимога не є обов'язковою, тому що вибір параметрів запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір дає можливість проводити роботи по посиленню труби при максимальному внутрішньому тиску. Обмеження максимального тиску встановлення муфти, як правило, викликані обмеженнями міцності кільцевих зварних швів кріплення муфти до трубопроводу. Основні документи [24] передбачають зниження тиску в трубопроводі до рівня  $0-0,7 \cdot P_{P6}$ , де  $P_{P6}$  – робочий тиск в трубопроводі. Даний параметр входить в залежності, що описують роботу ділянки трубопроводу з

встановленої муфтою, є змінний, безпосередньо впливає на ефективність посилення труби і тому підлягає обов'язковому контролю.

3. Глибина підмуфтового простору. Муфта на трубопровід має встановлюватися з мінімально можливою глибиною підмуфтового простору  $\delta_{IIIY}$ . На реальних трубопроводах глибина підмуфтового простору обмежується висотою валиків поздовжніх і кільцевих зварних швів, які, відповідно до діючих норм [30,145], не повинні перевищувати 3 мм. Параметр підлягає контролю на етапі встановлення муфтової конструкції.

4. Самотвердіюча речовина, що використовується для заповнення підмуфтового простору, має володіти мінімальним коефіцієнтом усадки, максимальним модулем пружності і коефіцієнтом Пуассона, точне значення яких може бути визначено в результаті розрахунків за запропонованими в роботі методиками для конкретного випадку встановлення муфти і необхідного ступеня зниження напружень в посилюваній трубі. Характеристики міцності параметрів матеріалу підмуфтового шару і його коефіцієнт усадки надають найважливіший вплив на ефективність посилення труби. Підлягають обов'язковому контролю на етапі підготовки до виконання робіт.

5. Товщина стінки муфти, поряд з модулем пружності речовини підмуфтового шару є одним з основних параметрів, що визначають ефективність посилення трубопроводу. Точне значення товщини стінки може бути визначено в результаті розрахунків за запропонованими в роботі виразами для конкретного випадку встановлення муфти і необхідного ступеня зниження напружень в посилюваній трубі. Даний параметр підлягає контролю на етапі підготовки до виконання робіт.

6. Тиск запресування речовини в підмуфтовий простір  $P_{MY}$  має забезпечувати рівномірність розподілу навантаження між трубою і муфтою чим підлягає обов'язковому контролю під час виконання робіт.

7. Обсяг неруйнівного контролю муфти і зварних швів за повнотою і якістю визначається вимогами керівних документів [23, 24, 31, 32, 154, 137].

8. Герметичність підмуфтового простору підлягає обов'язковому контролю після встановлення муфти на трубопроводі.

9. При відсутності достовірних даних про тиск в трубопроводі в межах ремонтної ділянки, контроль якості монтажу муфти може бути здійснений за оперативними вимірами величин механічних кільцевих напружень в стінках трубопроводу і муфтової конструкції.

10. Рівномірність заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною підлягає обов'язковому контролю під час виконання робіт.

Таким чином, основними параметрами, такими, що підлягають обов'язковому контролю безпосередньо під час виконання робіт з монтажу клеєзварної муфти є тиск в трубопроводі під час проведення робіт і тиск запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір, або пов'язані з ними механічні кільцеві напруження в стінках муфти і трубопроводу поза зоною встановлення муфти. Контроль даних параметрів дозволить домогтися максимально можливої ефективності посилення трубопроводу за обраним критерієм.

Решта розглянутих параметрів підлягають контролю відомими засобами на етапах виготовлення муфтової конструкції, підготовки до виконання робіт по установці муфти, безпосередньо встановлення конструкції і підготовки до заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною.

## 2.4. Розробка способів контролю якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском

### 2.4.1. Контроль тиску

Графічне представлення рівнянь (2.2.41–2.2.44), що описують роботу ділянки трубопроводу, посиленого муфтою з внутрішнім заповненням, показано на рис. 2.4.1 і рис. 2.4.2.

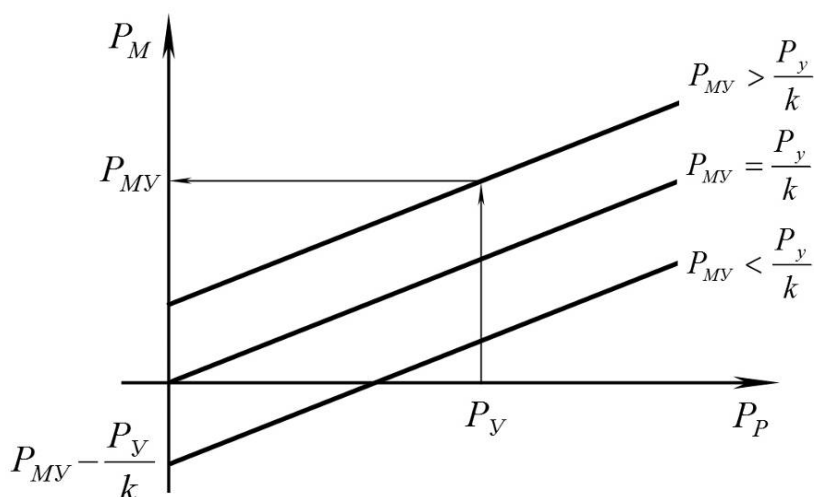


Рис. 2.4.1. Якісна залежність тиску в підмуфтовому просторі від тиску всередині підсилюється трубопроводу

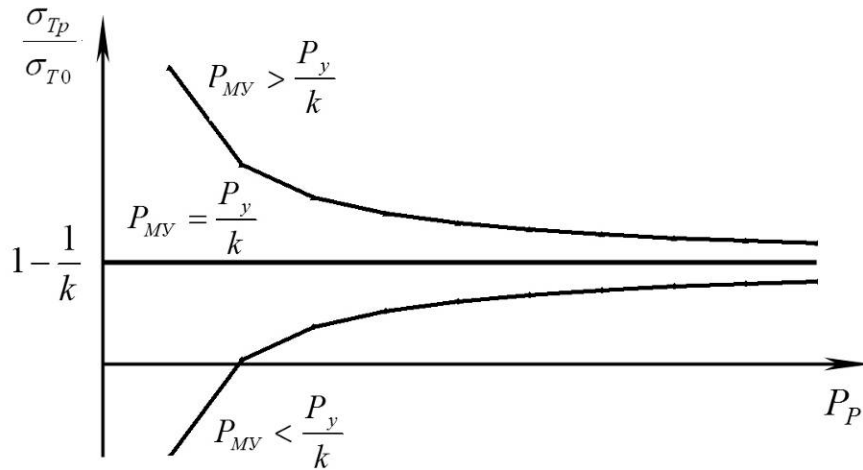


Рис. 2.4.2. Якісна залежність ступеня зниження окружних напружень в стінці труби від тиску в трубопроводі

У розділі 2.2 було показано, що при муфтовому посилені трубопроводу повинна бути забезпечена рівномірність розподілу навантаження між ремонтною трубою і муфтою, тобто, повинна бути виконана умова рівності напружень в стінках муфти і труби під муфтою при будь-яких значеннях тиску в трубопроводі:

$$\sigma_{Tp} = \sigma_M. \quad (2.4.1)$$

При дотриманні умови (2.4.1) тиск в підмуфтовому просторі буде змінюватися пропорційно тиску в трубопроводі відповідно до вираження

$$P_M = \frac{P_P}{k}, \quad (2.4.2)$$

а ступінь зниження кільцевих напружень в стінці труби буде визначатися тільки величиною коефіцієнта зв'язку  $k$  і не буде залежати від тиску в трубопроводі:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = 1 - \frac{1}{k}. \quad (2.4.3)$$

Виконання умов (2.4.1)–(2.4.3) можна домогтися, якщо в підмуфтовому просторі затверділий шар при установчому тиску в трубопроводі  $P_y$  створюватиме тиск

$$P_{MV} = \frac{P_y}{k}. \quad (2.4.4)$$

Було показано, що тиск в підмуфтовому просторі після закінчення процесів полімеризації, змінюється в залежності від коефіцієнта усадки використаної

самотвердіючої речовини. В цьому випадку, оптимальний тиск запресовування визначається виразом (2.2.46):

$$P_{MYon} = \frac{P_y}{k} + \Delta P, \quad (2.4.5)$$

при цьому точне значення коефіцієнта зв'язку  $k$  і величини зниження тиску  $\Delta P$  визначаються в результаті спільного рішення рівнянь (2.2.18, 2.2.27, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.10, 2.3.11), отриманих в главах 2.2–2.3.

Проведені теоретичні дослідження впливу міцності і геометричних параметрів трубопроводу, муфти і підмуфтового шару на ефективність посилення труби показали, що при певних умовах (заповненні підмуфтового простору самотвердіючою речовиною з високими характеристиками міцності (великими модулем пружності і коефіцієнтом Пуассона) на трубопроводах великого діаметру з малої настановної глибиною підмуфтового простору), вираз для коефіцієнта зв'язку  $k$ , може бути істотно спрощено [164]:

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{3 \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M} \approx \frac{\delta_M + \delta_T}{\delta_M}. \quad (2.4.6)$$

Наприклад, для трубопроводу діаметром 1420 мм з товщиною стінки 9 мм, посиленою клеєзварною сталевією муфтою з товщиною стінки 9 мм, встановленої на технологічні кільця товщиною 3 мм і підмуфтовим шаром, матеріал якого має модуль пружності  $E_{III} = 240 \text{ МПа}$ , значення коефіцієнта зв'язку дорівнюватиме  $k = 2,04$ , в той час як  $\frac{\delta_M + \delta_T}{\delta_M} = 2$ . Тобто, прийняті допущення призводять до похибки, що не перевищує 2 %, що цілком допустимо для проведення практичних інженерних розрахунків.

Якщо при цьому для формування підмуфтового шару використовується речовина, що має малу усадку або розширення в процесі твердіння ( $\Delta P \approx 0$ ), то вираз (2.4.5) може бути приведені до вигляду:

$$P_{MYon} = P_y \cdot \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_T}, \quad (2.4.7)$$

а в разі, якщо використовується муфта з товщиною стінки, рівній товщині стінки труби:

$$P_{MVon} = \frac{P_y}{2}, \quad (2.4.8)$$

тобто, оптимальний тиск запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір для узгодження умов, дорівнює половині тиску в трубопроводі на момент закінчення встановлення муфти [163].

При цьому ступінь зниження окружних напружень в стінці ремонтної труби не залежить від тиску в трубопроводі [162]:

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_T}. \quad (2.4.9)$$

Вирази (2.4.5) і (2.4.8) покладені в основу розроблених способів контролю монтажу клесварних муфт на діючому трубопроводі [89, 90, 113, 116, 117] ілюстрованих схемою, наведеною на рис. 2.4.3.

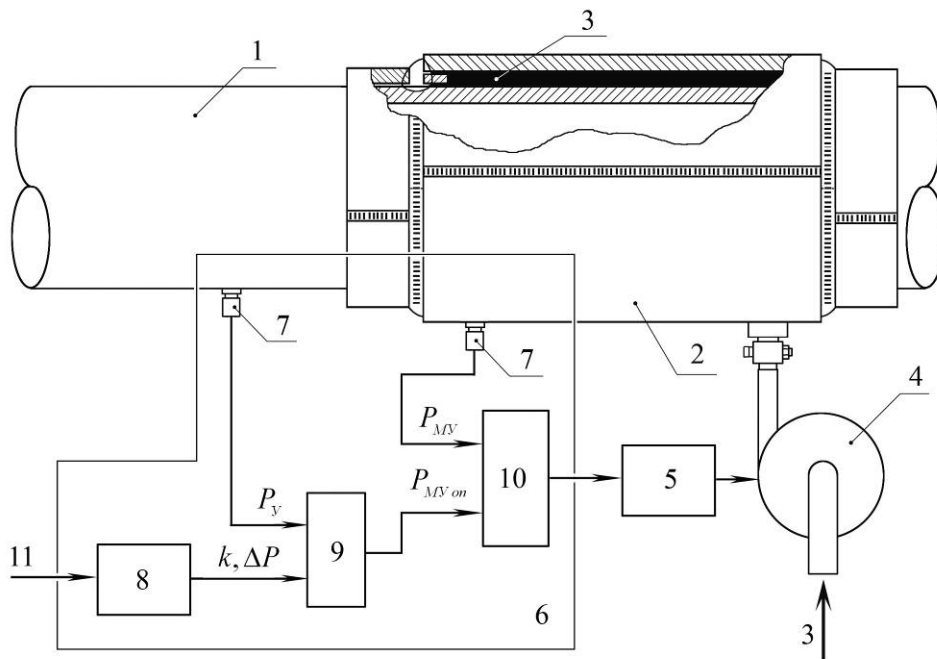


Рис. 2.4.3. Організація контролю якості монтажу муфти за результатами вимірів тисків відповідно до розробленого способу:

- 1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – самотвердіюча речовина, 4 – нагнітач,  
 5 – система управління, 6 – система контролю, 7 – датчики тиску,  
 8 – обчислювач поточних значень  $\Delta P$  і  $k$ , 9 – обчислювач значення оптимального тиску в підмуфтовому просторі, 10 – аналізатор, 11 – дані про параметри муфтової конструкції

Новизна викладених способів контролю монтажу клесварних муфт на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском, підтверджена трьома патентами на винахід України та Російської Федерації [89, 90, 113]. Технології,

засновані на запропонованих способах, включені до галузевих будівельних норм ГБН В.3.1-00013741-12: 2011 «Магістральні газопроводи, ремонт дугового зварювання в умовах експлуатації» [24], «Технологічний регламент підвищення несучої здатності труби та категорійності ділянок магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт» [155], Технологічну інструкцію ДК«Укртрансгаз» з герметизації підмуфтового простору поліуретановим складом [156] і набули широкого поширення при виконанні ремонтних робіт на діючих магістральних газопроводах України.

#### **2.4.2. Контроль механічних кільцевих напружень**

Контроль в процесі монтажу муфти тиску перекачується в трубопроводі і речовини в підмуфтовому шарі, значення яких повинні бути пов'язані через залежності (2.4.5) або, за певних припущеннях, (2.4.8) забезпечує постійний розподіл навантаження між трубою і муфтою, яке не залежить від зміни робочого тиску в трубопроводі, тобто, забезпечує синхронність деформацій стінок труби і муфти. Разом з тим, практична реалізація способу передбачає точне знання тиску в трубопроводі під час монтажу муфти, а так само в момент закінчення запресовування самотвердіючої маси в підмуфтовий простір.

У ряді випадків, точне значення даного тиску може бути невідомо. Така ситуація виникає при ремонті ділянок складної розгалуженої системи поставок товарів. Без об'єктивних даних про тиск всередині трубопроводу контроль вибору оптимального режиму запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір може бути вкрай ускладнено. В цьому випадку оптимізація процесу запресовування самотвердіючої речовини може бути здійснена за результатами оперативного вимірювання кільцевих механічних напружень в стінці муфти і в стінці труби поза зоною встановлення муфти.

У трубі поза зоною встановлення муфти діють кільцеві напруження  $\sigma_{T0}$ , і в загальному випадку визначаються виразом (2.2.27):

$$\sigma_{T0} = \frac{P_p \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}. \quad (2.4.10)$$

де  $P_p$  – робочий тиск всередині трубопроводу,  $\sigma_{T0}$  – кільцеві напруження розтягання в стінці труби без муфти при робочому тиску  $P_p$ ;  $D_T$  – внутрішній діаметр труби;  $\delta_T$  – товщина стінки труби.

Після встановлення муфти з подальшим заповненням простору між трубою і муфтою самотвердіючою речовиною під деяким тиском  $P_{MY}$  і закінченням процесів полімеризації, тиск під муфтою буде визначатися виразом (2.2.40):

$$P_M = \frac{P_P}{k} - \frac{P_Y}{k} + P_{MY}, \quad (2.4.11)$$

В цьому випадку, відразу після запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір з оптимальним тиском, що визначається виразом (2.4.5), в стінці муфти будуть діяти напруження, які визначаються тиском  $P_{MY\ on}$ , внутрішнім діаметром муфти  $D_M$  і товщиною її стінки  $\delta_M$ :

$$\sigma_{MpV} = \frac{P_{MY\ on} \cdot D_M}{2 \cdot \delta_M} = \frac{P_{MY\ on} \cdot (D_T + 2 \cdot \delta_T + 2 \cdot \delta_{ПП})}{2 \cdot \delta_M}, \quad (2.4.12)$$

У той же час, кільцеві механічні напруження в стінці труби під муфтою будуть визначатися виразом:

$$\sigma_{TpV} = \frac{(P_Y - P_{MY\ on}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}, \quad (2.4.13)$$

а на ділянці труби поза зоною дії муфти, виразом:

$$\sigma_{T0V} = \frac{P_Y \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}. \quad (2.4.14)$$

У цьому випадку, з урахуванням виразу для оптимального тиску запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір (2.4.5), вираз для відносин кільцевих напружень в стінках муфти і труби поза зоною дії муфти може бути записано у вигляді:

$$\frac{\sigma_{MpV}}{\sigma_{T0V}} = \frac{\left(\frac{P_Y}{k} + \Delta P\right) \cdot D_M}{2 \cdot \delta_M} \cdot \frac{2 \cdot \delta_T}{P_Y \cdot D_T} = \left(\frac{1}{k} + \frac{\Delta P}{P_Y}\right) \cdot \frac{D_M \cdot \delta_T}{D_T \cdot \delta_M}, \quad (2.4.15)$$

Вивід рівняння для оптимального тиску в підмуфтовому просторі був зроблений в підглаві 2.2, виходячи з вимог до забезпечення рівномірності розподілу навантаження між трубою і муфтою. Зрозуміло, що при цьому необхідно дотримуватися умови

$$\sigma_{TpV} = \sigma_{MpV}. \quad (2.4.16)$$



Після підстановки (2.4.12) і (2.4.13) в (2.4.16) і нескладних математичних перетворень:

$$\frac{D_M \cdot \delta_T}{D_T \cdot \delta_M} = \frac{P_y - P_{MVon}}{P_{MVon}} = \frac{1 - \frac{1}{k} - \frac{\Delta P}{P_y}}{\frac{1}{k} + \frac{\Delta P}{P_y}} \quad (2.4.17)$$

Після підстановки (2.4.17) в (2.4.15):

$$\frac{\sigma_{MpV}}{\sigma_{T0V}} = 1 - \frac{1}{k} - \frac{\Delta P}{P_y}, \quad (2.4.18)$$

При використанні самотвердіючої речовини з малим значенням усадки (наприклад, коефіцієнт усадки широко використовуваного при ремонті магістральних трубопроводів України самотвердіючої речовини SZLAST становить 0,05 %, а допущеного до застосування для ремонту газопроводів Loktite 7031 – 0,1 %), останнім членом рівняння правомірно знехтувати :

$$\frac{\sigma_{MpV}}{\sigma_{T0V}} = 1 - \frac{1}{k}, \quad (2.4.19)$$

У разі ремонту трубопроводів великого діаметра (понад 1000 мм), використанні самотвердіючої маси з великим модулем пружності і коефіцієнтом Пуассона, близьким до 0,5 і малим значенням глибини підмуфтового простору, для обчислення коефіцієнта зв'язку  $k$  справедливо використовувати вираз (2.4.9). В цьому випадку, вираз (2.4.19) приводиться до вигляду [162]:

$$\frac{\sigma_{MpV}}{\sigma_{T0V}} = \frac{\delta_M}{\delta_M + \delta_T}, \quad (2.4.20)$$

Отриманий вираз покладено в основу запропонованого способу і пристрою контролю якості робіт при муфтовому ремонті трубопроводів (рис. 2.4.4) [88, 112, 118, 119].

Новизна викладеного способу контролю монтажу клеєзварних муфт на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском шляхом заміру поточних значень механічних кільцевих напружень підтверджена двома патентами на винахід України та Російської Федерації [88, 112].

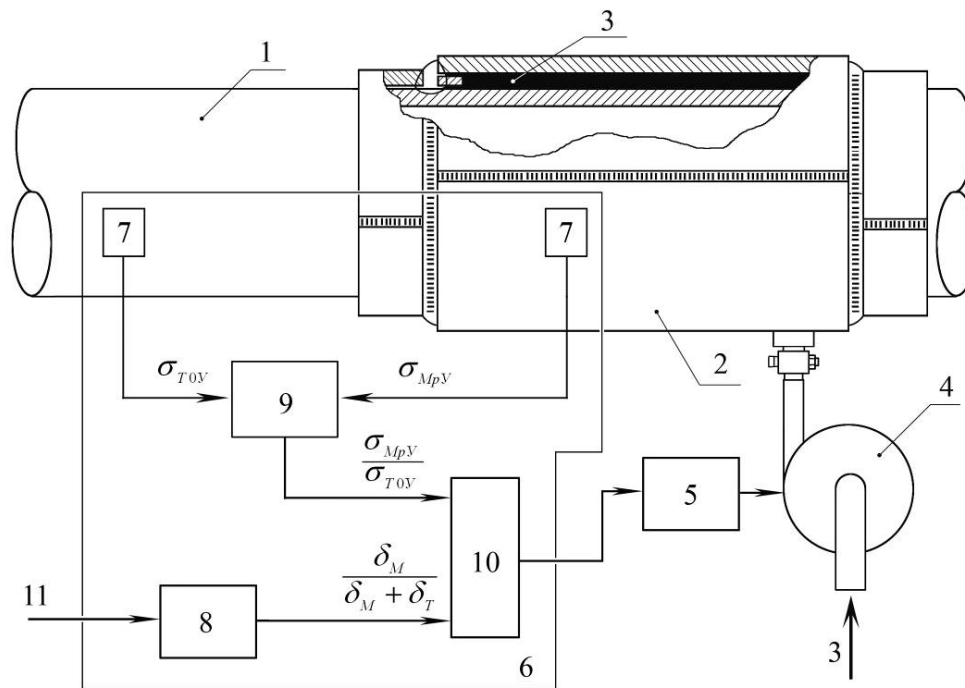


Рис. 2.4.4. Організація контролю якості монтажу муфти за результатами вимірів кільцевих механічних напружень за розробленим способом:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – самотвердіюча речовина, 4 – нагнітач, 5 – система управління, 6 – система контролю, 7 – датчики механічних кільцевих напружень, 8 – обчислювач значення оптимального відносини  $\frac{\sigma_{MpY}}{\sigma_{T0Y}}$ ,

9 – обчислювач поточного значення відносини  $\frac{\sigma_{MpY}}{\sigma_{T0Y}}$ , 10 – аналізатор,

11 – дані про параметри муфтової конструкції

### 2.4.3. Спосіб контролю якості монтажу зварної муфти, що заповнюється розплавленим металом

Одним із шляхів підвищення ефективності посилення труб малих і середніх діаметрів є використання для формування підмуфтового шару розплавленого металу, що має відносно низьку температуру плавлення, наприклад, свинець, олово або їх сплави. Питання практичної реалізації даного способу ремонту розглянуто в підрозділах 4.1.2, 4.2.4.2.

Для досягнення максимального значення критерію ефективності та забезпечення рівномірного розподілу навантаження між ремонтною трубою і оболонкою муфти, значення тиску в підмуфтовому просторі після закінчення перехідних процесів формування підмуфтового шару має визначатися виразом (2.4.4). Це стає можливим, якщо величина тиску запресовування розплавленого

металу в підмуфтовий простір буде вибиратися виходячи з виразу (2.4.5). Основною складністю виконання цієї умови є забезпечення правильного обліку  $\Delta P$  і коефіцієнта зв'язку  $k$ , так як в реальних умовах усадка одного і того ж металу або сплаву може сильно відрізнятися від партії і умов використання, що призведе до неоптимального розподілу навантаження між трубою і муфтою після зміни агрегатного стану матеріалу підмуфтового шару. Крім того, для заповнення підмуфтового простору можливо використовувати сплав з точно невідомим значенням модуля пружності і усадки. Такий приклад може мати місце при аварійному виконанні робіт і використанні сплаву з випадкових свинцевих і олов'яних виробів.

В цьому випадку, контроль якості монтажу може проводитися в такій послідовності. Після встановлення і зборки металевих частин муфти (оболонки і торцевих ущільнювачів), якість зварних швів перевіряють традиційними, добре зарекомендованими себе методами неруйнівного контролю. На оболонці муфти встановлюють термостійкі тензометричні датчики. Далі проводять гідравлічні випробування підмуфтового простору, суміщені з обробкою внутрішніх поверхонь адгезивом (флюсом), що забезпечує підвищену адгезію розплавленого металу до труби і оболонці муфти. Під час гідравлічних випробувань з використанням інформації від манометрів, встановлених в оболонці муфти, проводять побудову таріровочних графіків. Датчики,  $R_{\text{тд}}(P_{\text{м}})$ , що пов'язують величину сигналу, який надходить з тензометричного датчика  $R_{\text{тд}}$  з величиною тиску в підмуфтовому просторі. При використанні тензометричних датчиків з лінійною характеристикою (наприклад, тензорезисторів зі схемами температурної компенсації), таріровочна залежність може бути представлена у вигляді:

$$R_{\text{тд}} = K_{\text{тд}} \cdot P_{\text{м}} + R_{\text{тд}0}, \quad (2.4.21)$$

де:  $R_{\text{тд}}$  – сигнал на виході тензометрического датчика,  $K_{\text{тд}}$  – коефіцієнт, що зв'язує зміну сигналу на виході датчика зі зміною тиску в підмуфтовому просторі,  $R_{\text{тд}0}$  – сигнал на виході тензометричного датчика при відсутності тиску в підмуфтовому просторі.

Після прогріву труби і муфти за допомогою спеціальних засобів, наприклад індуктора, в підмуфтовий простір запресовують розплавлений метал, контролюючи процес запресування за інформацією, що надходить з тензометричних датчиків. Після цього нагнітання розплавленого металу і прогріву продовжують до виконання умови:

$$R_{MV1} = K_{DT} \cdot \left( \frac{P_y}{k_i} + \Delta P_i \right) + R_{TD0}, \quad (2.4.22)$$

де:  $k_i$  – прогнозований коефіцієнт зв'язку,  $\Delta P_i$  – прогнозоване зниження тиску в підмуфтовому просторі, викликане усадкою матеріалу підмуфтового шару в процесі охолодження.

Після повного затвердіння розплавленого металу по сигналу  $R_{MV2}$ , що надходить з тензометричного датчика, проводять вимірювання сталого тиску в підмуфтовому просторі:

$$P_{MV2} = \frac{R_{MV2} - R_{TD0}}{K_{TD}}. \quad (2.4.23)$$

Після цього проводиться зміна тиску в трубопроводі зі значення  $P_y$  до довільного значення  $P_y$  тобто на деяку величину  $\Delta P_p = P_{p3} - P_y$ . Це спричинить за собою зміну тиску в підмуфтовому просторі з значення  $P_{MV2}$  до значення  $P_{M3}$ , тобто на величину  $\Delta P_M = P_{M3} - P_{MV2}$ . У свою чергу, це призведе до зміни сигналу тензометричного датчика на величину  $\Delta R_M = R_{M3} - R_{MV2}$  до значення  $R_{M3}$ . Після цього за інформацією з тензометричного датчика розраховують реальний коефіцієнт зв'язку

$$k = \frac{K_{TD} \cdot \Delta P_p}{\Delta R_M}, \quad (2.4.24)$$

який залежить від модуля пружності металу підмуфтового шару.

Далі визначають реальне значення зниження тиску в підмуфтовому шарі  $\Delta P$ , викликане усадкою матеріалу підмуфтового шару в процесі охолодження виходячи з таких міркувань. Розплавлений метал був запресований в підмуфтовий простір під тиском  $P_{MV2}$ , який після усадки матеріалу підмуфтового шару зменшилось до значення  $P_{M02}$ . При цьому, для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між трубою і муфтою, тиск в підмуфтовому просторі при нульовому тиску в трубопроводі має так само дорівнювати нулю. Залежність тиску в підмуфтовому просторі від тиску в трубопроводі після закінчення перехідних процесів формування підмуфтового шару описується виразом (2.2.39), з якого може бути визначено тиск в підмуфтовому просторі при нульовому тиску в трубопроводі:

$$P_{M02} = \frac{P_y}{k} - P_{MV2}, \quad (2.4.25)$$

Зрозуміло, що для виконання умови  $P_{M02} = 0$  необхідно, щоб тиск запресовування розплавленого металу  $P_{MV2}$  перевищував тиск в підмуфтовому

просторі після охолодження металу на величину  $P_{M02}$ . Тобто, реальне значення  $\Delta P$  може бути отримано з умови:

$$\Delta P = P_{MV1} - P_{MV2} + P_{M02}. \quad (2.4.26)$$

Після визначення реальних значень  $k$  і  $\Delta P$ , муфту, трубу і шар підмуфтового простору знову нагрівають, в результаті чого метал в підмуфтовому шарі плавиться. Після цього в підмуфтовий простір додатково нагнітають розплавлений метал, створюючи тиск, який контролюють по сигналу з тензометричного датчика:

$$R_{MV} = K_{дт} \cdot \left( \frac{P_y}{k} + \Delta P \right) + R_{тд0}. \quad (2.4.27)$$

Для реалізації способу, тиск в трубопроводі може бути змінено не відразу після закінчення робіт, а значно пізніше, під час планового зміни режимів транспорту продукту. На відміну від муфт з компаундним наповненням, муфти, які заповнюються розплавленим металом, дають можливість коригувати розподіл напружень в трубі і муфті в процесі експлуатації.

Пропонований спосіб пояснюється графіком, представленим на рис. 2.4.5.

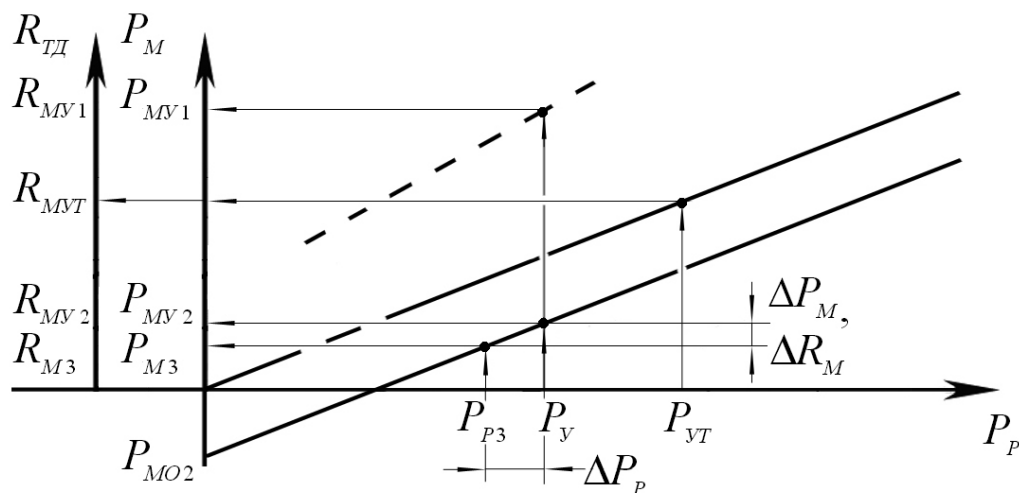


Рис. 2.4.5. Графік, що пояснює спосіб ремонту трубопроводу за допомогою муфти, що заповнюється розплавленим металом

З урахуванням того, що підмуфтовий простір заповнюють рідким розплавленим металом, контроль його розподілу по всьому об'єму може бути здійснений акустичним методом. При цьому з урахуванням високої температури муфти, що обмежує використання традиційних п'єзоелектричних датчиків збудження акустичної хвилі, кращим є використання ЕМА — методу, практичне застосування якого розглянуто в розділі 4.

Новизна викладеного способу контролю монтажу сталевій муфти на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском, підтверджена патентом на винахід України [122].

Показані в главах 4.2.2 і 4.2.3 способи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім наповненням на діючому трубопроводі передбачають вимір кільцевих механічних напружень в стінках муфти і труби поза зоною встановлення муфти. Існують різні методи вимірювання тиску в основу яких покладені різні фізичні ефекти. Найбільшого поширення на практиці отримав метод тензометричних добавок, коерцітиметричний метод, різні різновиди методу з використанням магнітопружного ефекту і акустичні методи. Окремо слід відзначити використання акустичного методу, заснованого на явищі акустопружності, що полягає в генерації зондувальних імпульсів і реєстрації параметрів відбитих пружних хвиль, порушуваних в матеріалі контрольованого об'єкта (метод реалізований, наприклад).

Що стосується завдання контролю якості встановлення клеєзварної муфти найбільш перспективним бачиться використання ультразвукового акустичного методу контролю напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, докладно дослідженого Лютак І. П., Лютак З. П. і Семегінім М. М. [48, 49, 147, 148, 149], що дає можливість комплексно контролювати як напружений стан конструкції, так і якість формування підмуфтового шару.

## **2.5. Розробка алгоритму обробки даних в обчислювачі системи контролю якості монтажу муфти з внутрішнім заповненням на діючому трубопроводі, що знаходиться під тиском**

Показані в розділі теоретичні дослідження дозволять розробити алгоритм обробки даних в обчислювачі системи контролю якості монтажу муфти, що дозволяє розрахувати значення основних параметрів, що контролюються, що забезпечують максимальну ефективність посилення діючого трубопроводу, що знаходиться під тиском. Крім того, на основі отриманих рівнянь з'явилася можливість оцінки ефективності посилення труби на стадії планування ремонту, обґрунтованого вибору параметрів муфти і самотвердіючої маси, а так само вибору в процесі виконання робіт оптимальних технологічних параметрів запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір. Алгоритм розрахунку наведено на рис. 2.5.1 і 2.5.2.

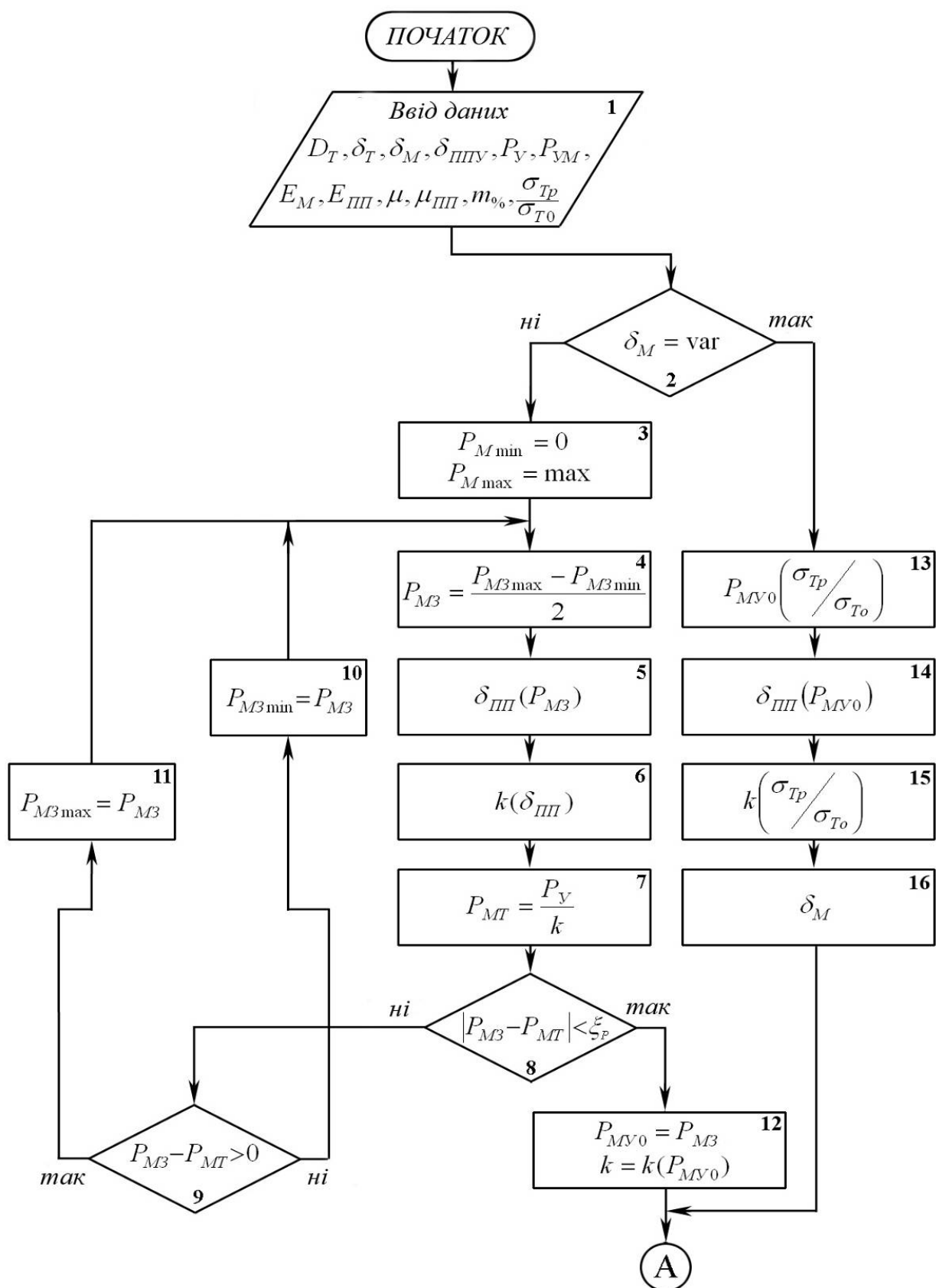


Рис. 2.5.1. Блок-схема алгоритму оцінки ефективності ремонту і розрахунку основних технологічних параметрів запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір (початок, закінчення на рис. 2.5.2)

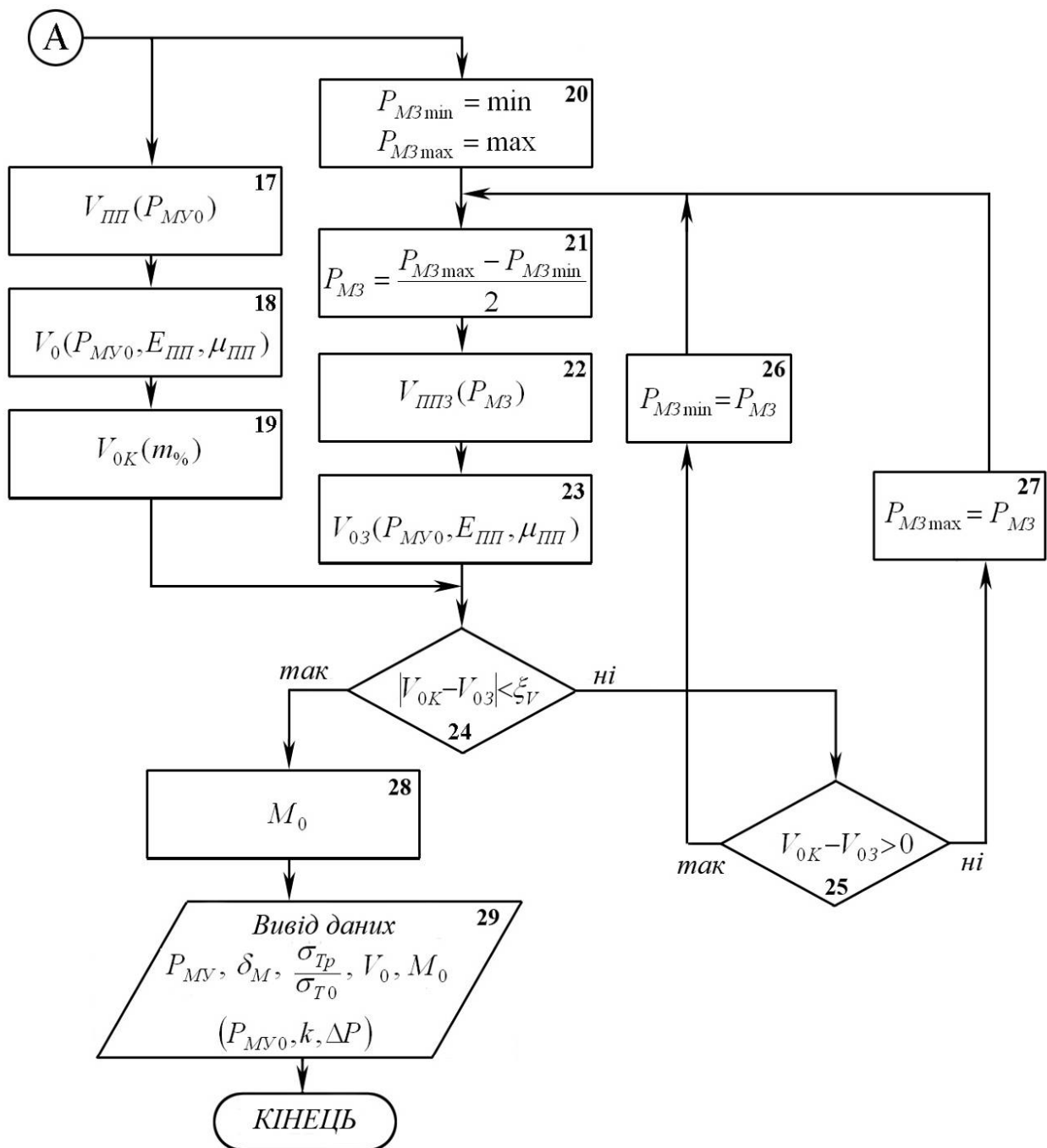


Рис. 2.5.2. Блок-схема алгоритму оцінки ефективності ремонту і розрахунку основних технологічних параметрів запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір (закінчення)

У блоці 1 в програму вводяться дані про геометричні та міцності параметрах трубопроводу і муфти, дані про характеристики самотвердіючої речовини, дані про тиск в трубопроводі, при яких здійснюється монтаж муфти і заповнення її підмуфтового простору.



Далі в блоці 2 алгоритм пропонує два варіанти розрахунку. Перший варіант дозволяє по відомих параметрам муфти, основним з яких є товщина її стінки, визначити оптимальні параметри запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір і оцінити при цьому ступінь зниження кільцевих напружень в стінці труби. Другий варіант дозволяє розрахувати товщину стінки муфти  $\delta_M$ , що забезпечує задані вимоги до ступеня зниження механічних кільцевих напружень в стінці посилюваної труби  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}$ . В цьому випадку, при заданому

значенні  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}$  при оптимальному тиску запресовування, вираз для коефіцієнта  $k$  може бути отримано з формули (2.2.17):

$$k = \frac{\sigma_{To}}{\sigma_{Tp} - \sigma_{To}}, \quad (2.5.1)$$

або, з урахуванням (2.2.56):

$$\delta_M = \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{\left( \frac{1}{1 - \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}}} - 1 - \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{\frac{1 - \mu^2}{1 - 3\mu^2} \cdot D_T^2} \right) \cdot D_T^2}. \quad (2.5.2)$$

Зрозуміло, що в цьому випадку оптимальний тиск запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір без урахування його усадки або розширення в процесі твердіння вже визначено формулою (2.4.5):

$$P_{MYon} = \frac{P_y}{k} = P_y \left( 1 - \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} \right), \quad (2.5.4)$$

отже, формулою (2.2.64) однозначно визначена і величина  $\delta_{III}$ .

У блоках 3–12 здійснюється розрахунок коефіцієнта зв'язку  $k$  і оптимального тиску запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір  $P_{MY0}$  без урахування її усадки або розширення при твердінні. Розрахунок оптимального тиску запресовування проводиться в блоці 7 по формулі (2.2.46), яка поряд із значенням тиску в трубопроводі  $P_y$ , при якому проводиться заповнення підмуфтового простору, враховує і коефіцієнт зв'язку  $k$ . У свою чергу, коефіцієнт  $k$ , що розраховується в блоці 6 по формулі (2.2.56) залежить від

глибини підмуфтового простору, що визначається в блоці 5 по формулі (2.2.64) і від показника стисливості самотвердіючої речовини, які, в свою чергу, залежать від тиску в підмуфтовому просторі. Таким чином, значення коефіцієнта  $k$ , глибини підмуфтового простору  $\delta_{III}$  і оптимального тиску в підмуфтовому просторі  $P_{Monm}$  є взаємопов'язаними.

У зв'язку з взаємозалежністю параметрів, їх розрахунок проводиться в результаті численних ітерацій методом половинчастого розбиття (блоки 4, 9, 10, 11) до моменту, коли похибка обчислень не стане менше деякого заздалегідь заданого значення  $\xi_P$  (блок порівняння 8).

При другому варіанті розрахунку в блоці 13 по формулі (2.5.4) обчислюється значення оптимального тиску запресовування, в блоці 14 – глибина підмуфтового простору (формула 2.2.64), в блоці 15 – коефіцієнт зв'язку (формула 2.5.1), в блоці 16 за формулою (2.5.2) розраховується товщина стінки муфти.

Облік усадки (розширення) самотвердіючої речовини в процесі твердіння проводиться в блоках 17–28 запропонованого алгоритму. У блоці 17 по формулах (2.2.61, 2.2.62, 2.2.65) визначається обсяг підмуфтового простору  $V_{III}$ , відповідно тиску в просторі між трубою і муфтою  $P_{MV0}$  при сформованому підмуфтовому шарі.

У блоці 18 по формулі (2.2.73) розраховується обсяг недеформованої самотвердіючої речовини  $V_0$ , запресованого під тиском  $P_{MV0}$  в підмуфтовий простір з фізичним обсягом  $V_{III}$ . У блоці 19 обчислюється обсяг, який займала самотвердіюча речовина під час запресовування (до усадки або розширення в процесі твердіння)  $V_{0K}$ .

Далі, в результаті численних ітерацій в блоках 21–27 визначається вихідний тиск в підмуфтовому просторі, при якому в нього буде запресований обсяг самотвердіючої речовини, рівний  $V_{0K}$ .

Обчислення проводяться до моменту, коли похибка розрахунку не стане менше деякої заздалегідь заданої величини  $\xi_V$  (блок порівняння 24). Значення  $\xi_P$ ,  $\xi_V$  та ряд другорядних параметрів і коефіцієнтів, які не вказані на рис. 2.5.1, вводяться в програму блока 1.

У блоці 28 з урахуванням щільності використаної самотвердіючої речовини розраховується маса  $M_{0K}$ , відповідно обсягом  $V_{0K}$ . У блоці 29 споживачеві видаються дані про величину оптимального тиску запресовування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір.

Крім того, споживачеві видається значення забезпечення ступеня зниження механічних кільцевих напружень в стінці посилюваної труби  $\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}}$  при заданих параметрах трубопроводу, муфти або підмуфтового шару (перший варіант розрахунку), або рекомендована товщина стінки муфти, що забезпечує задану ступінь зниження механічних кільцевих напружень в стінці посилюваної труби.

Запропонований алгоритм, реалізований в програмному продукті, що використовується на підприємстві ТОВ «НПП КІАТОН» (м. Київ) для визначення параметрів запресування самотвердіючої речовини в підмуфтовий простір, розрахунку необхідних обсягів витратних матеріалів та оцінці ефективності муфтового ремонту при підготовці до виконання робіт на магістральних газопроводах високого тиску ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України».

### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ КОНТРОЛЮ, НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОСИЛЕННЯ ТРУБОПРОВОДУ**

#### **3.1. Мета експериментальних досліджень**

1. Експериментальна перевірка розробленої системи контролю якості монтажу клеєзварної муфти на діючому трубопроводі.
2. Експериментальне підтвердження підвищення міцності ділянки діючого трубопроводу шляхом встановлення клеєзварних ремонтних муфт з компаундним наповненням.
3. Експериментальне дослідження впливу параметрів, що підлягають контролю, на ефективність посилення труби.
4. Експериментальне визначення залежності тиску в підмуфтовому просторі від тиску в трубопроводі.
5. Експериментальне отримання кількісних залежностей розподілу механічних напружень між посилюваною трубою і муфтою.
6. Розробка і практичне відпрацювання методики контролю герметичності підмуфтового простору.
7. Експериментальне визначення оптимального тиску запресовування самотвердіючої маси в підмуфтовий простір.
8. Оцінка можливості переведення ділянок діючих трубопроводів в більш високу категорію за допомогою клеєзварних муфт.
9. Практична перевірка методики неруйнівного контролю якості робіт при ремонті трубопроводів за допомогою клеєзварних муфт, запропонованої в дисертаційній роботі конструкції.

#### **3.2. Загальна характеристика експериментальних досліджень**

Експериментальні дослідження проводились на стенді (заглушеному з двох сторін відрізка труби) зі встановленою на ньому клеєзварною муфтою в кілька етапів:

1. Виготовлення стенду;
2. Проведення гідравлічних випробувань стенду;
3. Монтаж на стенді клеєзварної муфти;
4. Формування торцевих ущільнювачів муфти;

5. Встановлення штуцерів для заповнення підмуфтового простору речовиною;

6. Встановлення на трубі і муфті вимірювальних датчиків (манометрів, тензорезисторів).

7. Проведення гідравлічних випробувань на герметичність підмуфтового простору;

8. Підключення тензорезисторів до реєструючого обладнання, проведення таріровочного налаштування;

9. Проведення вимірів перерозподілу механічного напруження між трубою стенду і муфтою при різних тисках в трубі і підмуфтовому просторі і використання в якості заповнювача підмуфтового простору слабосжімаємою речовиною (турбінного масла);

10. Промивання підмуфтового простору з використанням перетворювача іржі;

11. Продування (сушка) підмуфтового простору;

12. Заповнення підмуфтового простору самотвердіючою масою на поліуретановій основі SZLAST, яка подається під заданим тиском.

13. Проведення вимірів перерозподілу механічного напруження між трубою стенду і муфтою при різних тисках в трубі;

14. Обробка результатів випробувань.

### **3.2.1. Випробувальний стенд**

Для проведення експериментальних досліджень було використано стенд, який представляє собою заглушений з двох сторін відрізок труби діаметром 720 мм довжиною 7000 мм.

Зовнішній вигляд випробувального стенду представлений на рис. 3.2.1 і 3.2.2.

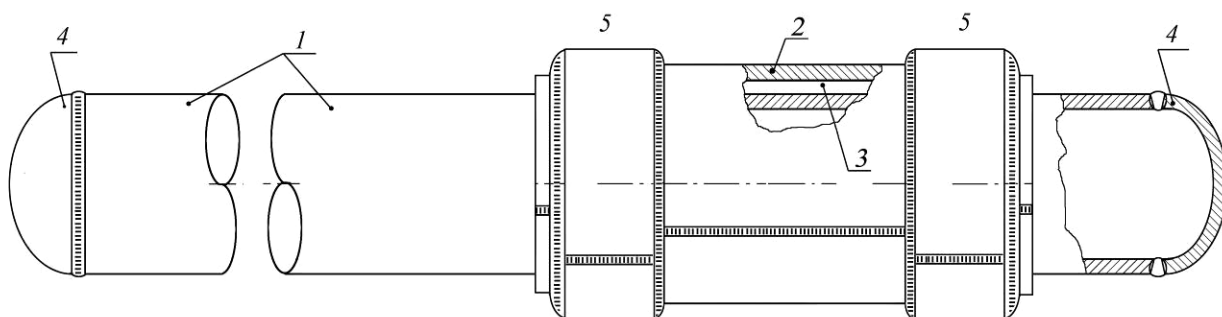


Рис. 3.2.1. Конструкція стенда зі встановленою клеєзварною муфтою:

1 – труба резервуара; 2 – муфта; 3 – підмуфтовий простір; 4 – заглушки; 5 – торцеві ущільнювачі



Рис. 3.2.2. Зовнішній вигляд стенда зі встановленою клеєзварною муфтою

### 3.2.2 Розробка клеєзварної муфти для експериментальних досліджень

Для проведення запланованих досліджень на резервуарі стенду повинна бути встановлена клеєзварна муфта, яка дає можливість варіювання в широких межах значеннями інформаційних параметрів, що підлягають контролю, з метою вивчення їх впливу на ефективність посилення труби.

Як вже зазначалося в попередніх розділах в загальному випадку клеєзварна муфта являє собою жорстку металеву оболонку 2 (рис. 3.2.3), герметично встановлену з зовнішньої сторони підсиленої ділянки трубопроводу 1.

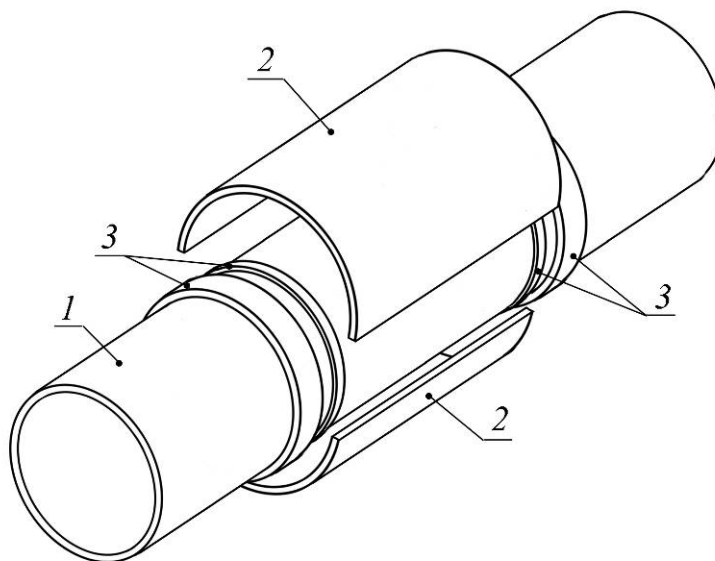


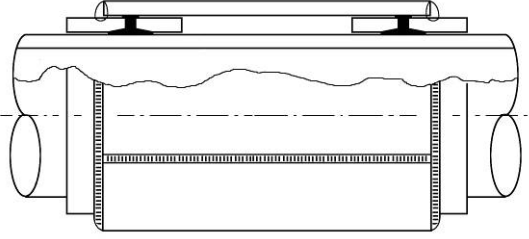
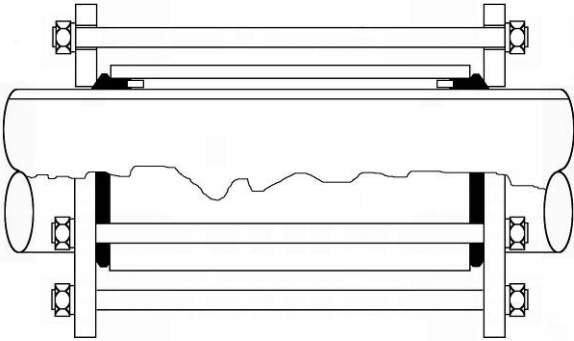
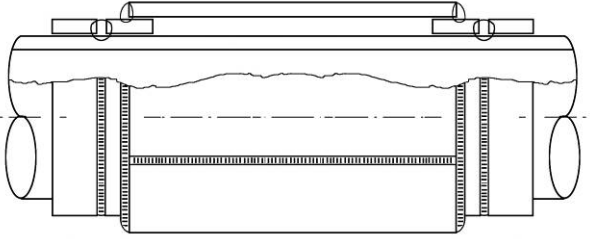
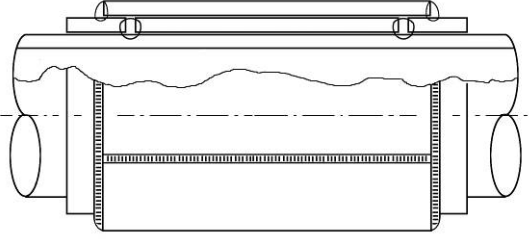
Рис. 3.2.3. Загальна конструкція клеєзварної муфти:  
1 – трубопровід, 2 – полумуфти, 3 – торцеві ущільнювачі

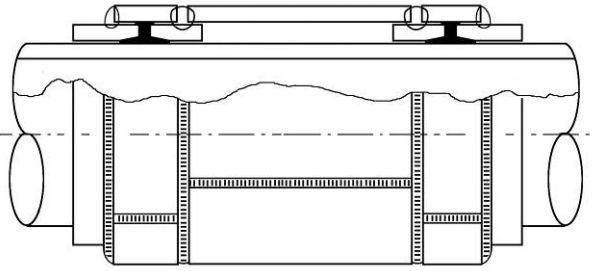
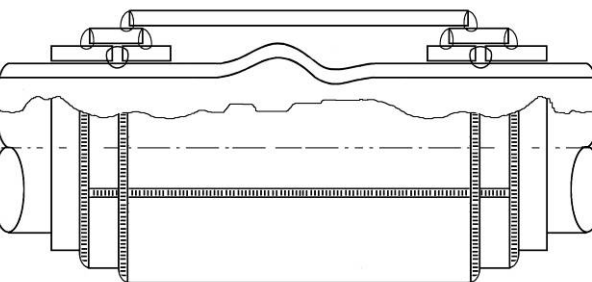
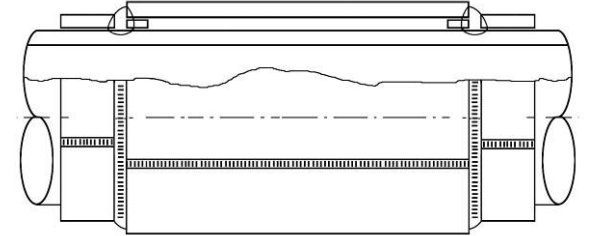
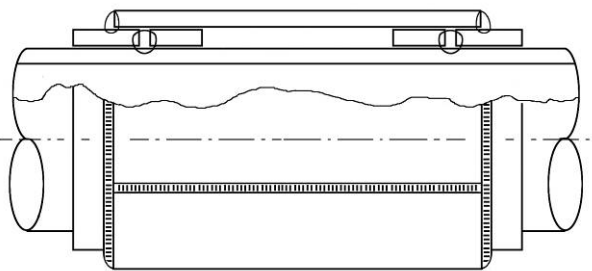
Найчастіше жорстка оболонка складається з двох полумуфт 2, які зварюються між собою поздовжніми швами або скріплюються іншими відомими способами. З двох сторін оболонки встановлюються торцеві ущільнювачі 3, а простір між трубопроводом 1 і оболонкою 2 заповнюється під тиском спеціальною речовиною. Торцеві ущільнювачі є найбільш відповідальним елементом клеєзварних муфт, що дає можливість формування підмуфтового шару з речовини, закаченої з заданим тиском.

У таблиці 3.2.1 показані застосовувані на практиці варіанти конструктивного виконання торцевих ущільнювачів [155].

Таблиця 3.2.1

**Основні види торцевих ущільнювачів ремонтних муфт**

	<p>Ущільнення, що формується за допомогою герметика, який закачується між технологічними кільцями, що не приварюються до тіла труби</p>
	<p>Ущільнення, що створюється за допомогою зовнішніх фланців, не потрібно зварювання з тілом труби</p>
	<p>Ущільнення за допомогою зварювання, відсутність прихованих швів</p>
	<p>Ущільнення за допомогою зварювання при посиленні герметичної муфти</p>

	<p>Ущільнення, що формується за допомогою герметика, який закачується між технологічними кільцями, що не приварюються до тіла труби</p>
	<p>Ущільнення за допомогою зварювання, при необхідності забезпечення великої глибини підмуфтового простору</p>
	<p>Ущільнення за допомогою зварювання, ефективно при невеликому тиску в підмуфтовому просторі</p>
	<p>Ущільнення за допомогою зварювання, ефективно при ремонті кільцевих зварних швів</p>

У розділі 2 показано, що ефективність посилення трубопроводу підвищується зі зменшенням глибини підмуфтового простору і підвищення модуля пружності речовини підмуфтового шару.

На безшовних трубах мінімальна глибина підмуфтового шару обмежується можливістю рівномірного запресування самотвердіючої речовини зі створенням необхідного тиску і, в першу чергу, визначається його в'язкістю. На магістральних трубопроводах високого тиску, як правило, є поздовжні, кільцеві або спіральні зварні шви, які мають певне перевищення (висоту валика шва). Наприклад, для магістральних газопроводів стандартне перевищення зварного шва становить 3 мм [30, 145]. При виконанні ремонтних робіт під тиском шліфування валика зварного шва заборонено існуючими нормативними



документами [154] для запобігання ймовірності розкриття трубопроводу по шву під дією внутрішнього тиску.

Таким чином, відомі муфтові конструкції з внутрішнім заповненням [24], крім герметичної клеєзварної муфти на тонкостінних кільцях КТР20 [24, 78, 155] характеризуються великою глибиною підмуфтового простору, що перевищує 10 мм через конструктивні особливості торцевих ущільнювачів. Разом з тим, конструкція торцевого ущільнювача герметичної клеєзварної муфти на тонкостінних кільцях КТР20 [24] не розрахована на створення в підмуфтовому просторі тиску, що перевищує половину робочого в трубопроводі. В роботі [66] показано, що створення в підмуфтовому просторі тиску, рівного робочому тиску в трубопроводі, викликає в кільцевих швах герметичної клеєзварної муфти на тонкостінних кільцях КТР20 неприпустимі напруження, що очевидно для проведення досліджень, які передбачають створення підвищеного тиску в підмуфтовому просторі.

Таким чином, для проведення всебічних досліджень, виникає задача розробки клеєзварної муфти, яка має мінімально можливу глибину підмуфтового простору, обмежену висотою валика зварного шва, що підсилюється, труби і допускає створення в підмуфтовому просторі тиску, що перевищує робочий тиск в трубопроводі.

Перш за все, для вирішення поставленого завдання, герметична клеєзварна муфта на тонкостінних кільцях КТР20 може бути істотно вдосконалена (рис. 2.4).

Наявність додаткового бандажного кільця дозволяє знизити напруження в кільцевому зварному шві, що кріпить муфту до трубопроводу майже в 2 рази [40], що дасть можливість безпечно створювати надмірний тиск в підмуфтовому просторі під час проведення експериментальних досліджень. Запропонована конструкція може бути рекомендована для посилення діючих трубопроводів, що знаходяться під тиском.

Разом з тим, при проведенні досліджень, бажано оцінити не тільки роботу клеєзварної муфти, жорстко привареною до трубопроводу, а й муфти, встановленої без приварювання до тіла труби. У зв'язку з цим, виникає задача розробки універсальної ремонтної муфти з мінімально можливою глибиною підмуфтового простору, оснащеної торцевими ущільнювачами, що не привареними до труби і надійно герметизуючі підмуфтовий простір, даючи можливість створення в ньому під час випробувань і експериментальних досліджень надлишкового тиску.

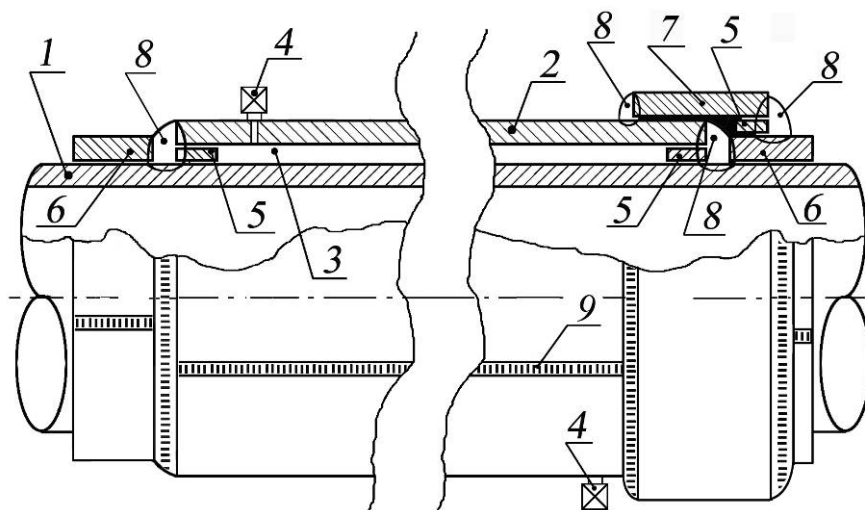


Рис. 3.2.4. Конструкція торцевого ущільнювача муфти КТР20

(лівий ущільнювач муфти)

і торцевого ущільнювача, посиленого бандажним кільцем

(правий ущільнювач муфти):

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – штуцери для заповнення підмуфтового простору, 5 – тонкостінні кільця, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажне кільце, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжній зварний шов

Пропонована конструкція муфти показана на рис. 3.2.5.

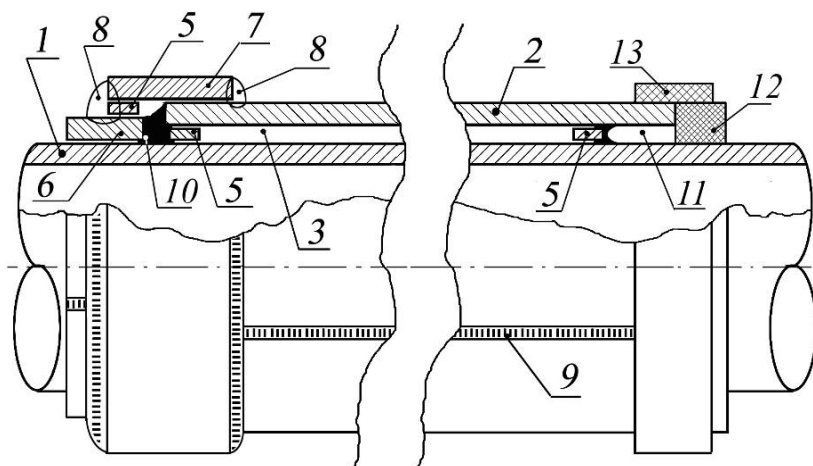


Рис. 3.2.5. Конструкція торцевих ущільнювачів пропонованої муфти,

монтуючої без зварювання з трубопроводом:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 5 – кільця з тонкою стінкою, 6 – технологічне кільце, 7 – бандажне кільце, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжній зварний шов, 10 – термостійкий герметик, 11 – кільцевий зазор, 12 – манжета, 13 – бандажне композитне кільце

Ущільнювач, зображений в лівій частині рис. 3.2.5 [24, 83, 114], формується в герметичній порожнині, утвореній звареними елементами 5–8, а в правій частині рис. 3.2.5 [24, 82, 114] – композитним бандажем 21–20. Хоча обидва запропоновані конструктивні рішення цілком працездатні і ефективні, для проведення досліджень більш зручно використовувати муфту, що має торцевий ущільнювач на основі зварних елементів. Основною перевагою запропонованої муфти з точки зору проведення контролю є відсутність прихованих зварних швів.

Таким чином, для проведення експериментальних досліджень, буде використана клеєзварна муфта, яка має торцеві ущільнювачі різної конструкції, зі зварюванням і без зварювання з трубопроводом, що дасть можливість оцінити працездатність і ефективність двох видів муфт. Конструкція муфти, призначена для монтажу на випробувальному стенді для експериментальних досліджень показана на рис. 3.2.6.

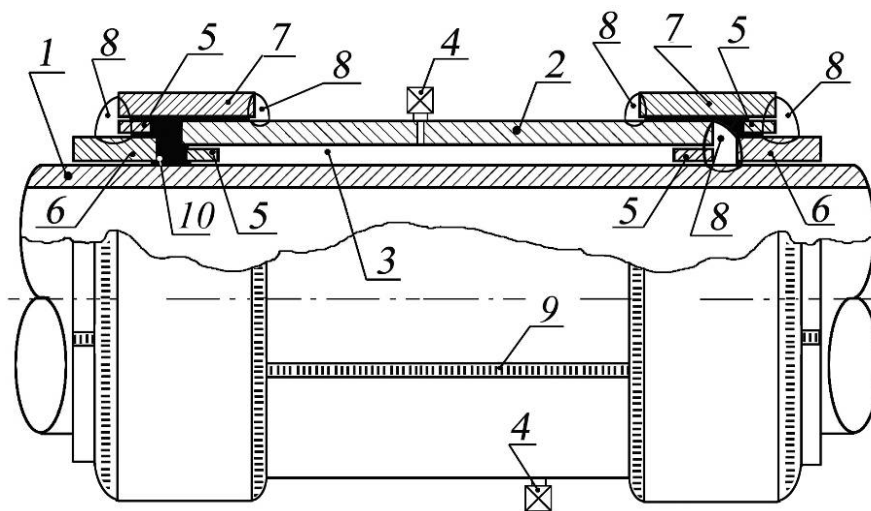


Рис. 3.2.6. Конструкція клеєзварної муфти для експериментальних досліджень:

1 – резервуар стенду, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – штуцери, 5 – зварювальна стрічка, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажні кільця, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжні зварні шви, 10 – термостійкий герметик

Запропонована конструкція муфти дозволяє домогтися високої ефективності посилення ремонтної труби, так як передбачає установку зовнішньої оболонки з мінімальною глибиною підмуфтового простору. Схема побудови торцевих ущільнювачів дозволяє створювати в підмуфтовому просторі необхідний тиск без зварювання муфти з тілом труби.

### ***3.2.3. Розробка технології монтажу клеєзварної муфти на стенді для експериментальних досліджень***

Встановлення муфти виконують в декілька етапів.

Поверхню резервуара стенду *1* в межах ремонтованої ділянки очищають від ізоляції, бруду, іржі і обробляють адгезивом. Після цього з двох сторін дефектної ділянки трубопроводу встановлюють тонкостінні кільця *5*, на яких збирають частини розрізаної оболонки муфти *2*. У загальному випадку, оболонка ремонтної муфти складається з двох однакових частин довжиною, яка дорівнює відстані між далекими торцями тонкостінних додаткових кілець. Частини ремонтної муфти сильно притискають до тонкостінних кілець, після чого частини оболонки ремонтної муфти зварюють між собою поздовжніми швами, не торкаючись дугою стінки трубопроводу. З боку зовнішніх торців муфти з зазором встановлюють технологічні кільця *6*, що складаються з декількох частин, які зварюють поздовжніми швами без торкання дугою тіла труби. Тонкостінні кільця можуть бути виготовлені як з стрічкового матеріалу котрий легко зварюється, так і з порошкової зварювальної стрічки. Висоту тонкостінних додаткових кілець вибирають рівну максимальній висоті валика зварного шва трубопроводу в межах підсилення ділянки. Ширину кожного тонкостінного додаткового кільця вибирають з умови створення додаткової жорсткості труби в районі зварювання, яка гарантує збереження її стійкості при нагріванні.

У загальному випадку, ширина тонкостінного додаткового кільця не повинна бути менше товщини стінки трубопроводу на відремонтованій ділянці. Після охолодження наплавленого металу в приварной конструкції (правий торцевий ущільнювач рис. 3.2.6), зварюють кільцеві шви, якими приварюють торці муфти *3*, розташовані під ними торці тонкостінних додаткових кілець *2* і внутрішні торці технологічних кілець *5* до трубопроводу *1* в зазор між ними. Неминуче в процесі зварювання нагрівання труби не призводить до втрати її стійкості, так як розташоване з одного боку шва технологічне кільце, а з іншого тонкостінне додаткове кільце, притиснуте до трубопроводу муфтою, створюють додаткову жорсткість. У муфті, що монтується без зварювання з тілом труби, зазори між трубою і муфтою, а так само між трубою і технологічними кільцями *6* шпаклюють термостійким герметиком *10*, який зберігає еластичність після затвердіння. Далі на кожне технологічне кільце *6* встановлюють додаткові тонкостінні кільця *5*. Додаткові тонкостінні кільця *5* виконують з добре зварюваної або порошкової

зварювальної стрічки. Після встановлення додаткових тонкостінних кілець на них монтують бандажні кільця 7. Внутрішні торці бандажних кілець 7 розташовують на поверхні оболонки муфти 2, а зовнішні торці поєднують із зовнішніми торцями додаткових тонкостінних кілець 5.

Після монтажу зовнішні торці бандажних кілець разом із зовнішніми торцями додаткових тонкостінних кілець зварюють з поверхнею відповідних технологічних кілець 6 кільцевими кутовими швами. Внутрішні торці бандажних кілець за допомогою зварювання кріплять до поверхні оболонки муфти. Після цього через штуцери, встановлені в спеціально виконаних отворах в нижній частині бандажних кілець, порожнини під бандажними кільцями заповнюють герметизуючим складом (рис. 3.2.7). Після появи герметизуючого складу в дренажних отворах, виконаних в верхніх частинах бандажних кілець, дренажні отвори закривають заглушками, а тиск герметизуючого складу піднімають до розрахункового рівня, що забезпечує формування якісного ущільнювача. Під дією тиску герметизуючого складу, кільцеві прокладки, утворені термостійкою самотвердіючою речовиною, деформуються, додатково ущільнюючи зазори, що зв'язують підмуфтовий простір із зовнішнім середовищем.

Герметик в порожнині під бандажним кільцем ущільнювача, зварюваного з тілом труби, вводять з метою захисту кільцевого зварного шва від корозії. Під час випробувань дана операція не є обов'язковою, однак буде проведена з метою відпрацювання методики монтажу розробленої муфти. Під дією тиску герметизуючого складу кільцеві прокладки, утворені термостійкою самотвердіючою речовиною, деформуються, додатково ущільнюючи зазори, що зв'язують підмуфтовий простір із зовнішнім середовищем. Герметик в порожнині під бандажним кільцем ущільнювача, зварюваного з тілом труби, вводять з метою захисту кільцевого зварного шва від корозії. Під час випробувань дана операція не є обов'язковою, однак буде проведена з метою відпрацювання методики монтажу розробленої муфти. Під дією тиску герметизуючого складу кільцеві прокладки, утворені термостійкою самотвердіючою речовиною, деформуються, додатково ущільнюючи зазори, що зв'язують підмуфтовий простір із зовнішнім середовищем. Герметик в порожнині під бандажним кільцем ущільнювача, зварюваного з тілом труби, вводять з метою захисту кільцевого зварного шва від корозії. Під час випробувань дана операція не є обов'язковою, однак буде проведена з метою відпрацювання методики монтажу розробленої муфти.

Після формування ущільнювачів, проводять гідравлічні випробування герметичності підмуфтового простору (рис. 3.2.8). Даний етап може бути поєднаний з обробкою внутрішніх поверхонь підмуфтового простору [84, 162]. Для цього для гідравлічних випробувань використовується рідина, що містить адгезив, наприклад, розчин ортофосфорної кислоти. Крім того, в рідину можуть бути додані речовини, що спрощують виявлення місць розгерметизації підмуфтового простору засобами неруйнівного контролю (флюорисцентні барвники, хладагент і т. д.).

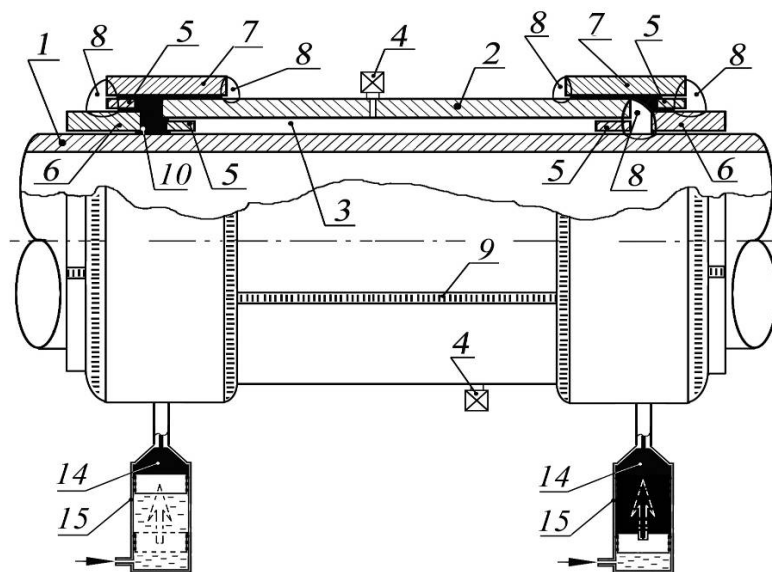


Рис. 3.2.7. Формування торцевих ущільнювачів:

1 – резервуар стану, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – штуцери, 5 – зварювальна стрічка, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажні кільця, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжні зварні шви, 10 – термостійкий герметик, 14 – герметик, 15 – шприц

Гідравлічні випробування підмуфтового простору проводяться при заповненому водою резервуара стану, без створення надлишкового тиску. У міру нагнітання в підмуфтовий простір рідини, тиск в ньому зростає, що призводить до розвантаження ремонтної труби, зовнішній діаметр якої зменшується. Зрозуміло, рідина передає тиск на сформовані в зазорах ущільнювачі, які, деформуючись, перешкоджають протіканню маси під технологічними кільцями.

Під час гідравлічних випробувань в підмуфтовому просторі створюється пробний тиск, який на 25 % перевищує максимальний робочий тиск в резервуарі стану, отриманий в результаті попереднього прочного розрахунку. Для запобігання гідроудару допускається тільки плавне підвищення підмуфтового тиску,

1 – резервуар стенду, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – штуцери,  
5 – зварювальна стрічка, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажні кільця, 8 – кільцеві зварні  
шви, 9 – поздовжні зварні шви, 10 – термостійкий герметик, 11 – манометри,  
12 – насос, 13 – рідина

При позитивних результатах гідравлічних випробувань, змонтована на резервуарі стенду муфтова конструкція визнається готовою для проведення подальших експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження полягають в реєстрації зміни значень тиску в підмуфтовому просторі  $P_M$  і значень кільцевих механічних напружень в стінках муфти  $\sigma_{Mp}$  і труби  $\sigma_{T0}$  поза зоною встановлення муфти при зміні тиску в резервуарі стенду  $P_p$  для різних сполучень вихідних значень тиску в

трубопроводі під час заповнення підмуфтового простору  $P_v$  рідкою речовиною під тиском  $P_{mv}$ . В якості рідкої речовини може використовуватися технічне масло або гліцерин, які володіють високим модулем пружності.

На завершальному етапі в підмуфтовий простір після відповідного промивання і внутрішньої обробки під заданим тиском повинен бути запресований самотвердіючий компаунд. Процес запресовування компаунда повинен контролюватися за значеннями кільцевих механічних напружень в стінці муфти  $\sigma_{mp}$ . Момент завершення процесу полімеризації компаунда повинен

контролюватися по зміні ставлення  $\frac{\sigma_{mp}}{\sigma_{T0}}$ . Після закінчення перехідного процесу

твердіння підмуфтового шару проводяться вимірювання залежності значень кільцевих механічних напружень в стінках муфти  $\sigma_{mp}$  і труби  $\sigma_{T0}$  поза зоною встановлення муфти від тиску в резервуарі стенду.

На підготовчому етапі до експериментальних досліджень, що передують гідравлічним випробуванням підмуфтового простору, на резервуарі стенду і муфті встановлюються повірені манометри, а на стінки труби і муфти наклеюються датчики тензометричної системи контролю.

Вид випробувального стенду з встановленою апаратурою схематично показаний на рис. 3.2.9 [135, 167].

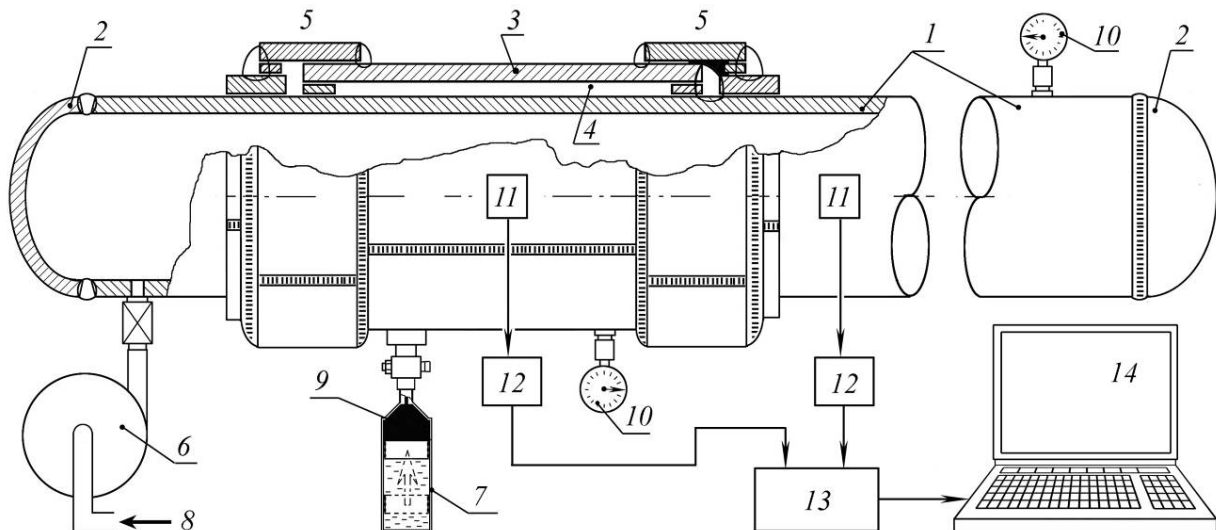


Рис. 3.2.9. Устаткування для проведення експериментальних досліджень:

1 – труба резервуара стенду, 2 – заглушки, 3 – оболонка муфти, 4 – підмуфтовий простір,

5 – торцеві ущільнювачі, 6 – водяний насос, 7 – нагнітач, 8 – вода, 9 – речовина для заповнення підмуфтового шару, 10 – манометри, 11 – тензорезистори, 12 – масштабуючі підсилювачі, 13 – комутатор, 14 – комп'ютер



Після встановлення і перевірки працездатності датчиків контролю, експериментальні дослідження проводяться в наступному порядку:

1. Резервуар стенду заповнюється водою до ремонтного значення тиску, на 35% меншого заданого робочого.

2. Підмуфтовий простір заповнюється рідиною з високим значенням модуля пружності під оптимальним тиском, розрахованим за отриманими в розділі 2 формулами.

3. Тиск в резервуарі стенду плавно зменшується до значення, відповідного тиску води в заповненому, але негерметичному резервуарі. Далі всі крани резервуара закриваються і за допомогою насоса 6 тиск в ємності плавно підвищується до значення на 35 %, яке перевищує заданий робочий.

4. У процесі підвищення тиску в резервуарі проводиться запис свідчень манометрів і значень тензометричних вимірів.

5. Резервуар стенду заповнюється водою до заданого значення робочого тиску.

6. Підмуфтовий простір заповнюється рідиною з високим значенням модуля пружності під заданим робочим тиском.

7. Виконуються пункти 3–4.

8. Виконується пункт 5.

9. Підмуфтовий простір заповнюється рідиною з високим значенням модуля пружності під тиском, що становить 30% від заданого значення робочого тиску.

10. Виконуються пункти 3–4.

11. Проводиться промивка підмуфтового простору, після чого здійснюється його знежирення і спеціальна обробка адгезивом.

12. Резервуар стенду заповнюється водою до значення тиску, який на 15 % перевищує заданий робочий.

13. Проводиться підготовка самотвердіючої компаундної суміші.

14. Підмуфтовий простір заповнюється самотвердіючою компаундною сумішшю під тиском, що становить 45 % від заданого значення робочого тиску.

15. Виконуються пункти 3–4.

16. Виконується пункт 1.

17. Резервуар стенду витримується під заданим робочим тиском протягом часу закінчення перехідних процесів формування підмуфтового шару.

18. В процесі твердіння матеріалу підмуфтового шару проводиться запис свідчень манометрів і значень тензометричних вимірів.

19. Виконуються пункти 3–4.

20. Вода з резервуара стенду зливається, оболонка муфти разом з ділянкою труби механічно розрізається.

### ***3.2.5 Виготовлення та монтаж на резервуарі стенду розробленої клесварної муфти***

Встановлення муфти проводиться фахівцями, які пройшли навчання і атестовані для проведення даного виду робіт [134].

Елементи муфти виготовлені з секторів труб і змонтовані на резервуарі стенду в порядку, передбаченому ГБН В.3.1-00013741-12: 2011 «Магістральні газопроводи, ремонт дугового зварювання в умовах експлуатації» [24] і «Технологічним регламентом підвищення несучої здатності труби та категорійності ділянок магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт» [155].

Процес виготовлення елементів муфти проілюстрований на рис. 3.2.10–3.2.13.



*Рис. 3.2.10.*

Процес виготовлення складових частин муфти



*Рис. 3.2.11.*

Процес виготовлення складових частин муфти



*Рис. 3.2.12.*

Процес виготовлення складових частин муфти



*Рис. 3.2.13.*

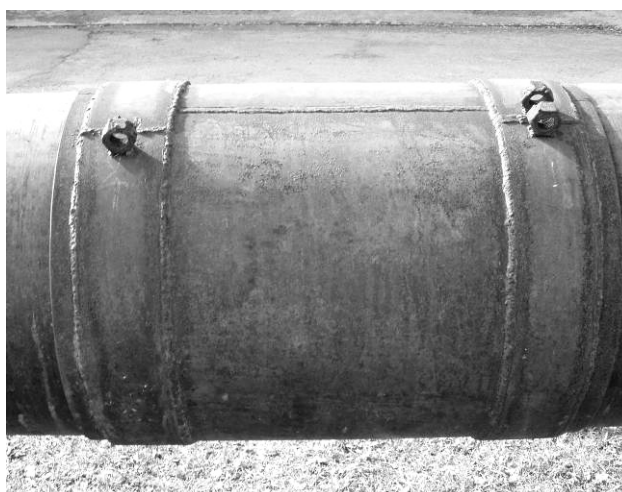
Процес виготовлення складових частин муфти

Процес встановлення муфти на резервуар стенду ілюструється на рис.3.2.14 і рис.3.2.15.



*Рис. 3.2.14.*

Монтаж технологічних кілець муфти



*Рис. 3.2.15.*

Муфта, встановлена на резервуар стенду

### **3.2.6. Вимірювальні прилади, використувані для випробувань**

В процесі експерименту вимірювалися такі параметри:

- тиск всередині резервуара стенду  $P_p$ ;
- тиск в підмуфтовому просторі  $P_m$ ;
- окружні механічні напруження в стінці резервуара поза зоною встановлення муфти  $\sigma_{T0}$ ;
- окружні механічні напруження в стінці муфти  $\sigma_{TM}$ .

Для вимірювання тиску води всередині резервуара стенду  $P_p$  і тиску  $P_m$  при заповненні підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с використовувалися манометри GMM63-100 Hansa-Flex. Для вимірювання тиску запресовування клею-герметика Стик Паз в порожнині торцевих ущільнювачів і тиску запресовування двухкомпонентної самотвердіючої маси SZLAST в підмуфтовий простір використовувалися манометри МТП-М. Перед проведенням робіт всі манометри пройшли перевірку на підприємстві ТОВ «ТД Манометр» (м. Київ).

Для контролю окружних механічних напружень в стінках резервуара  $\sigma_{T0}$  і муфти  $\sigma_{TM}$  застосовувалася тензометрична станція TCB-5B (ТОВ «НППІ КІАТОН»), в якості основного чутливого елемента якої використовувалися тензорезистори КФ5П1-20-400-А-12 (ТУ 3.06 7710-0001-93), випущені в березні 2010 року (партія 726) і які пройшли таріровки на підприємстві «Веда» (м. Київ).

Для зниження впливу температури на результати вимірювання, використовувалася схема підключення тензорезисторів на вхід вимірювача тензометричної станції. Спрощена функціональна схема тензометричної станції TCB-5B показана на рис. 3.2.16.

Оцінка значень механічних напружень в стінці труби і муфти проводиться по вимірюваній величині опору основного тензорезистора  $R_i$  відповідного каналу. , резистор  $R_k$  використовується для термокомпенсації схеми. Попереднє налаштування тензометричної станції зводиться до встановлення нуля (за допомогою резистора  $R_0$ ) і коефіцієнта посилення масштабуючого підсилювача (за допомогою резистора  $R_{max}$ ).

У комплект тензометричної станції TCB-5B входить шість ідентичних масштабуючих підсилювачів TCB-5B-MY і шестиканальний реєстратор сигналів TCB-5B-PC6 якій через порт USB-2,0 підключається до комп'ютера за встановленим програмним забезпеченням, що дозволяє проводити реєстрацію, зберігання та обробку даних виміру.

Для зручності роботи зі станцією в польових умовах на корпусах масштабуючих підсилювачів встановлені цифрові вольтметри DT182, що дозволяють в складних польових умовах проводити виміри значень повільно мінливих сигналів без використання комп'ютера і реєстратора.

Харчування тензометричної станції в польових умовах здійснювалося від автомобільного акумулятора VARTA A15 Blue dynamic 40 Ач через штатний блок живлення тензометричної станції.

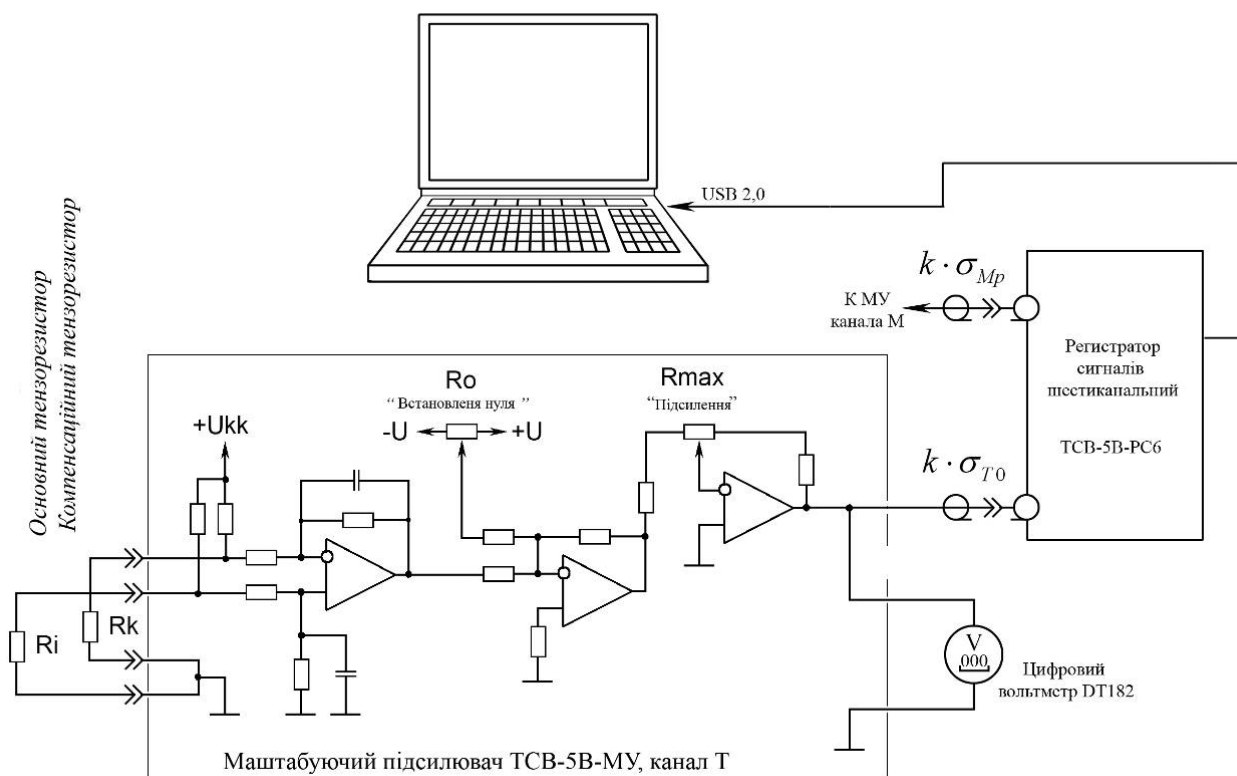


Рис. 3.2.16. Функціональна схема тензометричної станції TCB-5B

Комплект тензометричної станції підприємства ТОВ «НПП КІАТОН» представлено на рис. 3.2.17.

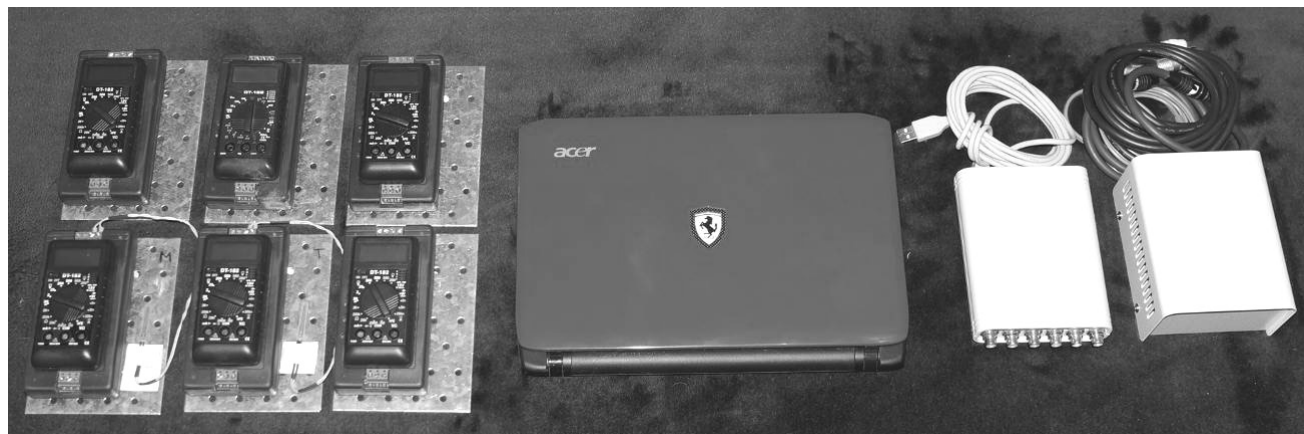


Рис. 3.2.17. Робочий комплект тензометричної станції TCB-5B

Для зручності використання при проведенні випробувань на стенді, маштабуючі підсилювачі тензометричної станції разом з цифровими вольтметрами були встановлені на металеві платформи. Платформи кріпилися до тіла труби і муфти за допомогою магнітних власників. Безпосередньо до металевих платформ приклеювалися компенсаційні тензорезистори.

Для неруйнівного контролю зварних швів використовувався ультразвуковий дефектоскоп УД-4Т.

### **3.2.7. Використовувані матеріали**

- Масло турбінне ТП-22с (ГОСТ 9972-74). Використовувалося для гідравлічних випробувань підмуфтового простору.
- Вода технічна. Використовувалася для гідравлічних випробувань резервуара стенду і створення необхідного внутрішнього тиску.
- Герметик високотемпературний «Термосталь DoneDeal-1400» (DD6799). Використовувався для герметизації порожнин торцевих ущільнювачів.
- Поліуретановий клей-герметик «Стик-Паз» (ОПХВС, ТУ У 24.6-05417686-001). Використовувався для формування торцевих ущільнювачів.
- Перетворювач іржі (ТУ У 24.5-00904996.003-2004). Використовувався для обробки підмуфтового простору перед запрессовкою самотвердіючої маси.
- Етилацетат (ГОСТ 8981-78). Використовувався для промивання підмуфтового простору після проведення гідравлічних випробувань турбінним мастилом після обробки перетворювачем іржі.
- Двокомпонентна самотвердіюча маса на поліуретановій основі Szlast (ТОВ «НПП КІАТОН»). Використовувалася для заповнення підмуфтового простору.

Вимірювання модуля пружності і коефіцієнта Пуассона затверділої маси Szlast виконано після випробувань в рамках договірних відносин ТОВ «НПП КІАТОН» з фахівцями Інституту проблем міцності АНУ (Договір 01ППІ від 27.01.2012 р.) відповідно до ГОСТ 9550-81 «Пластмас. Методи визначення модуля пружності при розтягуванні, стисненні і вигині» на обладнанні ТІРА-test кафедри опору матеріалів Київського політехнічного інституту. Проведення тензометричних вимірювань і обробка результатів проводилися в рамках договірних відносин ТОВ «НПП КІАТОН» з ПБФ НТУУ «КПІ» (Договір 1735/12 від 01.03.2011 р.).

### **3.3. Проведення експериментальних досліджень**

Стенд зі змонтованою на його резервуарі ремонтної муфти був підготовлений до випробувань і встановлений на території Чернігівського ЛВУ УМГ «Київтрансгаз» в населеному пункті Алішевка.

Проведено роботи по формуванню торцевих ущільнювачів муфти за допомогою поліуретанового клею-герметика «Стик-Паз». Роботи проводились у відповідності з «технологічним регламентом Підвищення несучої здатності труби та категорійність ділянок магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт» і включали такі операції: – встановлення штуцерів з кранами в нижній частині камер торцевих ущільнювачів муфти; – виготовлення дренажних отворів у верхній частині камер торцевих ущільнювачів муфти; – підключення шприца, заповненого клеєм-герметиком Стик Паз до кранів, встановлених в нижній частині камер торцевих ущільнювачів муфти; – заповнення клеєм-герметиком Стик Паз внутрішньої порожнини камер торцевих ущільнювачів під тиском 1,0 МПа; – від'єднання гідравлічного обладнання, заміна штуцерів заглушками.

Порядок формування торцевих ущільнювачів проілюстрований на рис. 3.3.1–3.3.5.



*Рис. 3.3.1.* Встановлення штуцерів ущільнювачів



*Рис. 3.3.2.* Виготовлення дренажних отворів



*Рис. 3.3.3.* Підключення гідравлічного шприца



*Рис. 3.3.4.* Запресовування герметика в порожнині торцевих ущільнювачів





*Рис. 3.3.5. Муфта з сформованими торцевими ущільнювачами*

У процесі підготовчих робіт на резервуарі стенду і середньої частини муфти встановлені штуцери підключення манометрів і обладнання для заповнення підмуфтового простору (рис. 3.3.6–3.3.8).



*Рис. 3.3.6.*



*Рис. 3.3.7.*

Встановлення штуцерів



*Рис. 3.3.8. Резервуар стенду і муфта з встановленими штуцерами для підключення манометрів і гідравліки*



До встановлених штуцерів були підключені манометри.

Далі до кранів, встановлених на резервуарі стенду в нижній середній частині муфти, були підключені, відповідно, шланги водяного і масляного насосів.

Поверхні резервуара і муфти в необхідних місцях були зачищені до металевого блиску і знежирені, після чого на них наклеєні тензорезистори. Поруч з тензорезисторами на магнітних кріпленнях розміщені масштабуючі підсилювачі тензометричної системи.

Процес підключення шлангів та встановлення тензодатчиків ілюструється рис. 3.3.9–3.3.14.



*Рис. 3.3.9.*

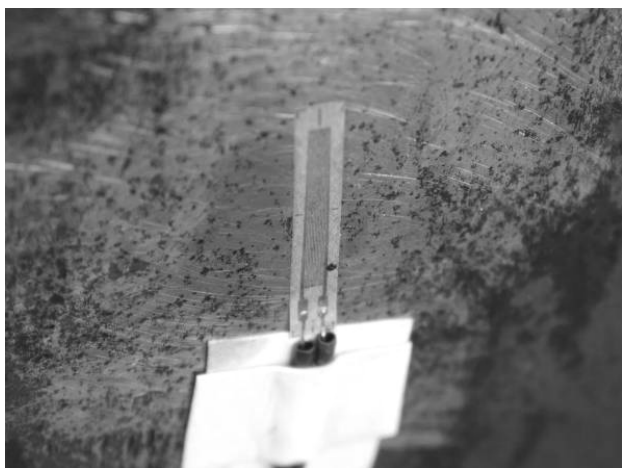


*Рис. 3.3.10.*

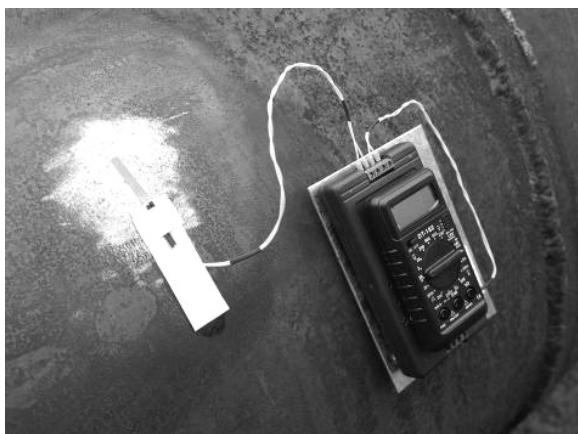
Підключення шлангів гідравлічних систем



*Рис. 3.3.11.* Підготовка поверхні  
для встановлення тензорезисторів



*Рис. 3.3.12.* Тензорезистор, наклеєний  
на поверхню труби



*Рис. 3.3.13.* Розміщення масштабуючого підсилювача і тензорезистора на трубі



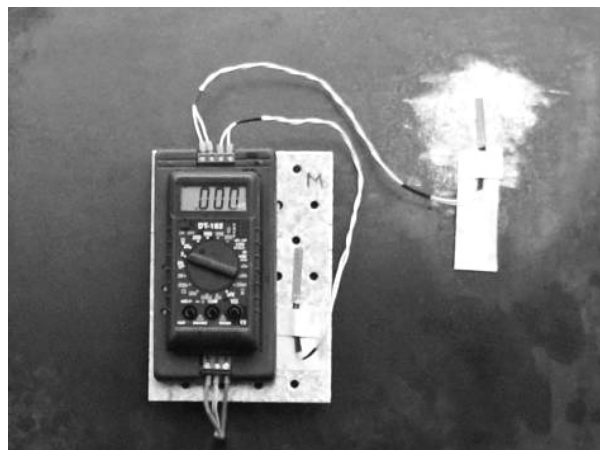
*Рис. 3.3.14.* Розміщення тензодатчиків і манометрів на стенді

Перед початком випробувань проведена настройка масштабуючих підсилювачів тензометричної станції, яка полягає у виставці «нулів» і однакового коефіцієнта посилення тензометричних каналів.

«Нулі» каналів виставлялися при максимальному коефіцієнті посилення масштабуючих підсилювачів, після повного заповнення резервуара водою, при нульових показаннях манометрів резервуара і підмуфтового простору (рис. 3.3.15 і 3.3.16).



*Рис. 3.3.15.* Регулювання масштабуючих підсилювачів



*Рис. 3.3.16.* Нульові значення вимірювача

Подальша настройка проводилася після підключення до муфти насоса і створення в трубі і підмуфтовому просторі розрахункового тиску  $P_y = 2,0 \text{ МПа}$ ,  $P_m = 1,0 \text{ МПа}$  (рис. 3.3.17 і 3.3.18).



Рис. 3.3.17. Підготовка ручного гідравлічного насоса

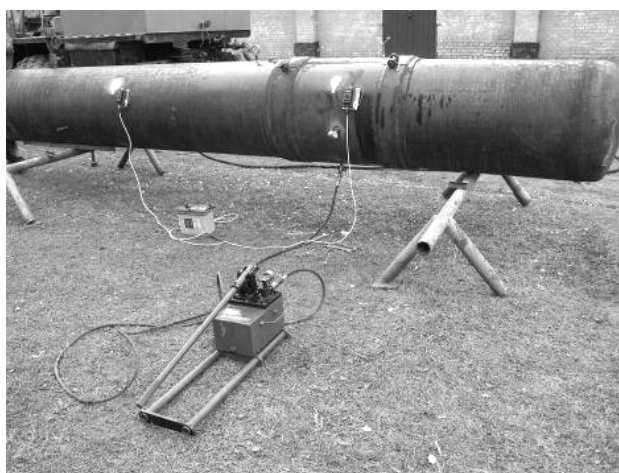


Рис. 3.3.18. Стенд і муфта з підключеним насосом

Налаштування коефіцієнта посилення каналів проводилася на підставі наступних міркувань. Напруга на виході масштабуючого підсилювача при виставлених «нулях» лінійно залежить від опору тензорезистора і, відповідно, від величини окружних механічної напруги. У свою чергу, кільцеві механічні напруження в стінці труби резервуара стенду лінійно залежать від внутрішнього тиску в резервуарі. Товщини стінок труби і муфти однакові, отже, на підставі висновків, отриманих в розділі 2, можна припустити, що при створенні тиску в підмуфтовому просторі, який дорівнює половині тиску всередині резервуара, кільцеві механічні напруження в стінках муфти і труби під муфтою будуть однакові за величиною і рівні половині значення кільцевих механічних напружень, що діють в стінці резервуара за межами встановлення муфти.

У зв'язку з цим, в резервуарі стенду за допомогою водяного насоса створювався внутрішній тиск  $P_v = 2,0 \text{ МПа}$ . У підмуфтовий простір за допомогою ручного насоса НРГ закачували турбінне масло під тиском  $P_m = 1,0 \text{ МПа}$ . Після цього, коефіцієнти посилення масштабуючих підсилювачів каналів вибиралися таким чином, щоб на цифрових індикаторах були отримані значення, відповідно,  $k \cdot \sigma_{T0} = 90 \text{ у.е.}$  і  $k \cdot \sigma_{Mp} = 45 \text{ у.е.}$ , що відповідає значенню  $\sigma_{Mp} / \sigma_{T0} = 0,5$ .

Після настройки нулів каналів і коефіцієнтів посилення масштабуючих підсилювачів, тиск в резервуарі стенду було знижено до нуля, після чого воно, за допомогою водяного насоса, встановленого на борту автомобіля КрАЗ, повільно піднімалось до значення  $P_p = 5,0 \text{ МПа}$  (рис. 3.3.19). Невелика швидкість зміни

тиску (близько  $1,0 \text{ МПа} / \text{мин}$ ) надала можливість запису свідчень тензодатчиків з інтервалом в  $0,5 \text{ МПа}$  без використання комп'ютера в якості реєстратора. Проміжні показання манометра, встановленого на резервуарі стенду і відповідні йому результати тензометричних вимірів показані на рис. 3.3.20 – 3.3.22.



Рис. 3.3.19. Наповнення водою резервуара стенду



Рис. 3.3.20. Показники манометра, встановленого на резервуарі стенду

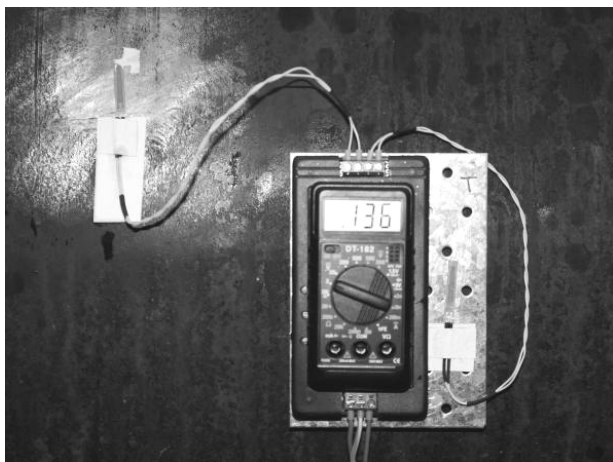


Рис. 3.3.21. Тензометричні виміри на стінці резервуара стенду



Рис. 3.3.22. Тензометричні виміри на стінці муфти

Після повного циклу вимірів тиск всередині резервуара і в підмуфтовому просторі були встановлені рівними  $P_v = P_m = 3,5 \text{ МПа}$ , після чого вимірювання проведені при зміні тиску всередині резервуара стенду від нуля до  $5,0 \text{ МПа}$ .

Аналогічні виміри проводилися при початкових значеннях тисків  $P_v = 3,5 \text{ МПа}$ ,  $P_m = 1,0 \text{ МПа}$ .

Результати вимірів наведені в таблицях 3.4.1–3.4.4 і представлені на графіках рис. 3.4.9 і 3.4.10.

Після отримання залежностей механічних окружних напружень на стінках труби і муфти від тиску всередині труби, масло з муфти було злито, а підмуфтовий простір промито етилацетатом з подальшою обробкою перетворювачем іржі. Зрозуміло з промиванням відпрацьовувалася методика гідравлічних випробувань муфти на герметичність підмуфтового простору.

На рис. 3.3.23 показаний процес промивання підмуфтового простору з використанням автоматичного нагнітача.

Після підготовки муфти, підмуфтовий простір був заповнений під розрахунковим тиском самотвердіючою масою на поліуретановій основі SZLAST, що ілюструється на рис. 3.3.23–3.3.26.



Рис. 3.3.23. Промивання підмуфтового простору



Рис. 3.3.24. Підготовка речовини для заповнення



Рис. 3.3.25. Підготовка до заповнення підмуфтового простору



Рис. 3.3.26. Заповнення підмуфтового простору

З метою максимальної імітації реальних умов застосування тиск всередині резервуара стенду перед запресуванням самотвердіючої маси в підмуфтовий простір було підвищено до значення  $P_v = 4,0 \text{ МПа}$ . При цьому тиск в

підмуфтовому просторі було встановлено на рівні  $P_M = 1,5 \text{ МПа}$ . Значення механічних кільцевих напружень, відповідно встановилися: на трубі  $k \cdot \sigma_{T0} = 179 \text{ у.е.}$ , на муфті  $k \cdot \sigma_{Mp} = 68 \text{ у.е.}$  Після закінчення обробки муфти, випробування були перервані до закінчення процесів затвердіння самотвердіючої маси.

Випробування були продовжені через 14 годин після запресовування в підмуфтовий простір самотвердіючої маси на поліуретановій основі SZLAST.

Аналіз пробного зразка самотвердіючої маси, залишений на резервуарі стенду, показав, що процеси затвердіння завершені.

Під час перерви в випробуваннях тиск всередині резервуара стенду знизився до рівня  $P_T = 3,4 \text{ МПа}$ , відповідно, змінилися і значення механічних кільцевих напружень в стінці труби до  $k \cdot \sigma_{T0} = 154 \text{ у.е.}$ , в стінці муфти – до  $k \cdot \sigma_{Mp} = 45 \text{ у.е.}$  Після підвищення тиску всередині резервуара стенду до  $P_T = 4,0 \text{ МПа}$  значення механічних кільцевих напружень в стінці муфти склало  $k \cdot \sigma_{Mp} = 57 \text{ у.е.}$ , тобто, знизилося, по відношенню до значення на момент заповнення, на 16,2 %.

Далі, тиск всередині резервуара стенду було знижено до нульового значення і, після закінчення перехідних процесів в електронних схемах, повільно піднято до рівня і тиск в резервуарі стенду було знижено до нуля, після чого воно, за допомогою водяного насоса, повільно піднімалась до значення  $P_p = 5,0 \text{ МПа}$ . Результати вимірів наведені в табл. 3.4 і проілюстровані графіком в розділі «Результати випробувань».

Після випробувань був зроблений контрольний розріз муфти з підмуфтовим поліуретановим шаром і трубою. Фотографії представлені на рис. 3.3.27.

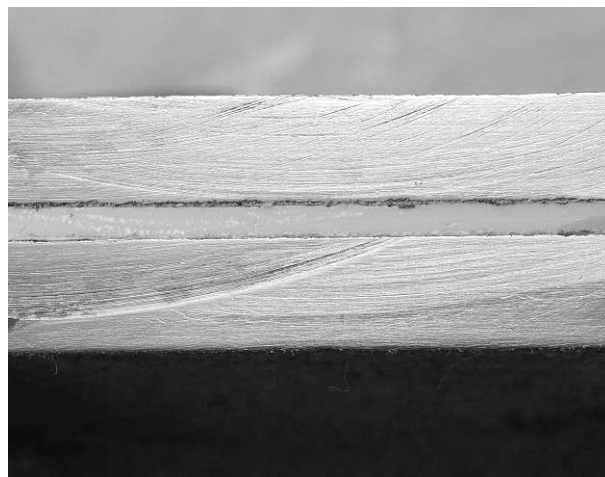


Рис. 3.3.27. Контрольний розріз муфти з підмуфтовим поліуретановим шаром і трубою

### 3.4. Результати експериментальних досліджень

Результати тензометричних вимірювань, проведених під час випробувань, наведені в таблицях 3.4.1–3.4.4.

Таблиця 3.4.1

#### Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с

$$P_v = 2,0 \text{ МПа}, \quad P_{mv} = 1,0 \text{ МПа}$$

$P_p, \text{МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_m, \text{МПа}$	0,25	0,5	0,75	<b>1,0</b>	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
$k \cdot \sigma_{T0}, \text{у.е.}$	22	45	67	<b>90</b>	113	136	158	181	203	227
$k \cdot \sigma_{mp}, \text{у.е.}$	11	23	34	<b>45</b>	57	69	79	95	106	116
$\sigma_{mp} / \sigma_{T0}$	0,5	0,51	0,51	<b>0,5</b>	0,50	0,51	0,5	0,52	0,52	0,51

Таблиця 3.4.2

#### Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с

$$P_v = 3,5 \text{ МПа}, \quad P_m = 3,5 \text{ МПа}$$

$P_p, \text{МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_m, \text{МПа}$	2	2,3	2,6	2,8	2,9	3,2	<b>3,5</b>	3,7	3,9	4,2
$k \cdot \sigma_{T0}, \text{у.е.}$	23	45	68	91	112	135	<b>157</b>	180	202	226
$k \cdot \sigma_{mp}, \text{у.е.}$	90	102	116	127	134	148	<b>156</b>	167	178	190
$\sigma_{mp} / \sigma_{T0}$	3,9	2,27	1,71	1,4	1,2	1,1	<b>1,0</b>	0,93	0,88	0,84

Таблиця 3.4.3

#### Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с

$$P_v = 3,5 \text{ МПа}, \quad P_m = 1,0 \text{ МПа}$$

$P_p, \text{МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_m, \text{МПа}$	Від'ємні значення	Від'ємні значення	0	0,2	0,5	0,8	<b>1,0</b>	1,2	1,4	1,6
$k \cdot \sigma_{T0}, \text{у.е.}$	22	46	67	91	113	133	<b>158</b>	180	203	226
$k \cdot \sigma_{mp}, \text{у.е.}$	Від'ємні значення	Від'ємні значення	1	9	22	35	<b>47</b>	54	63	75
$\sigma_{mp} / \sigma_{T0}$	Від'ємні значення	Від'ємні значення	0,01	0,1	0,19	0,26	<b>0,3</b>	0,3	0,31	0,33

Таблиця 3.4.4

**Заповнення підмуфтового простору поліуретановим складом SZLAST**

$$P_y = 4,0 \text{ МПа}, \quad P_M = 1,5 \text{ МПа} \quad k \cdot \sigma_{T0} = 179 \text{ у.е.}, \quad k \cdot \sigma_{Mp} = 68 \text{ у.е.}$$

(Дані, зняті з тензодатчиків через 14 годин після запресовування маси)

$$P_T = 3,4 \text{ МПа}, \quad k \cdot \sigma_{T0} = 154 \text{ у.о.}, \quad k \cdot \sigma_{Mp} = 45 \text{ у.о.}$$

$P_p, \text{МПа}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$k \cdot \sigma_{T0}, \text{у.е.}$	21	45	67	90	112	136	158	179	202	226
$k \cdot \sigma_{Mp}, \text{у.е.}$	Від'ємні значення	Від'ємні значення	6	16	26	36	47	57	66	76
$\sigma_{Mp} / \sigma_{T0}$	Від'ємні значення	Від'ємні значення	0,01	0,2	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,34

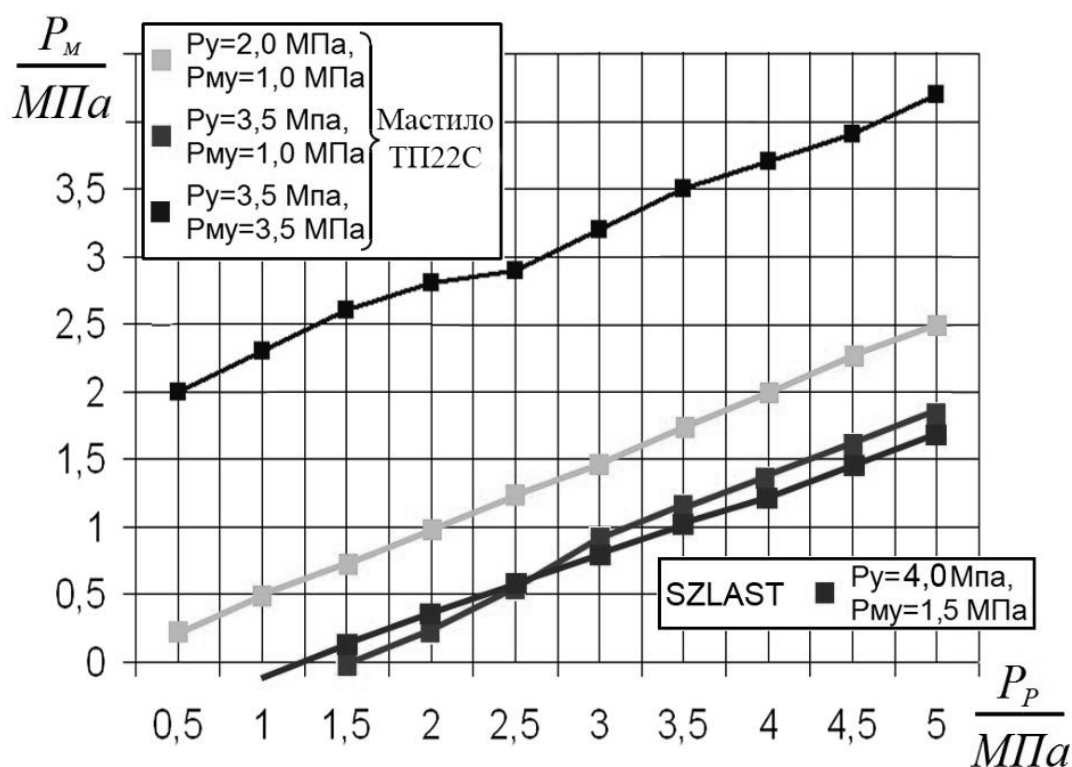


Рис. 3.4.9. Залежність тиску в підмуфтовому просторі  $P_M$  від тиску в резервуарі  $P_p$  при різних значеннях  $P_y$  та  $P_{My}$



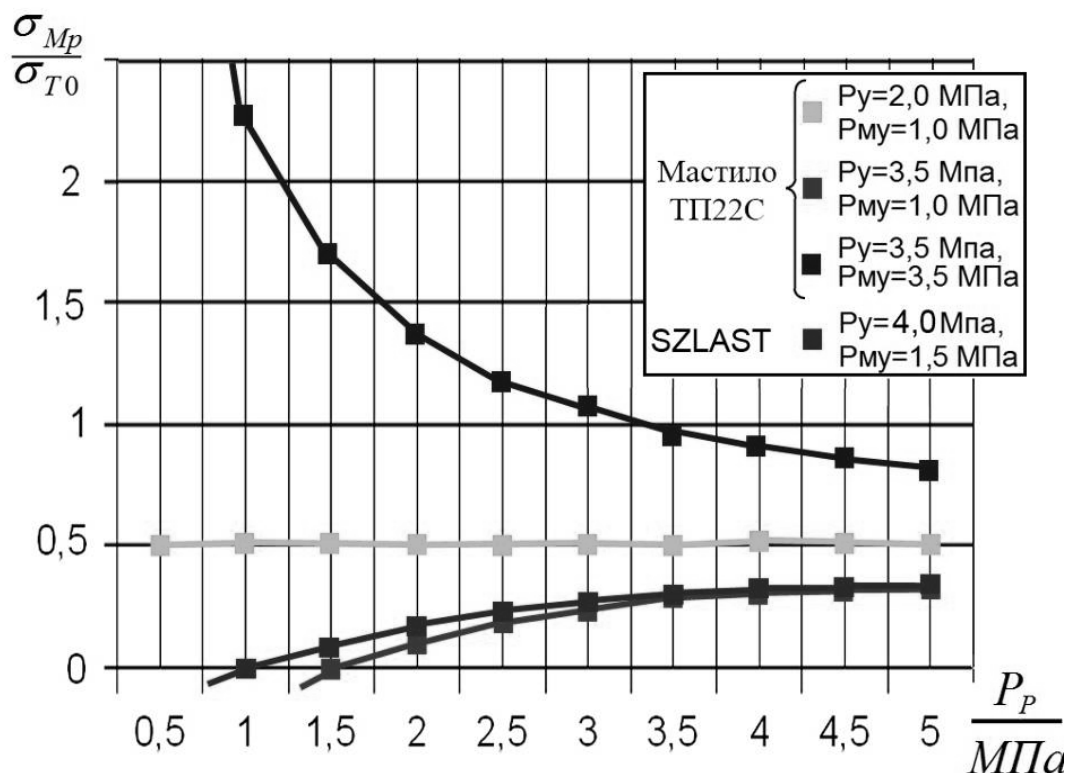


Рис. 3.4.10. Навантаження стінки труби поза зоною встановлення муфти і стінкою муфти при різних значеннях  $P_y$  та  $P_{my}$

### 3.5 Обробка результатів експерименту

У процесі проведення випробувань вимірювалися параметри, обумовлені в підрозділі 3.2. Зрозуміло, що вимірювання всіх значень здійснювалося з деякою помилкою.

Аналіз отриманих залежностей тиску в підмуфтовому просторі  $P_M$  від тиску в резервуарі стенду  $P_p$  і пов'язаних з ними механічних напружень в стінках муфти  $\sigma_M$  і труби  $\sigma_T$ , при різних значеннях тиску запресування речовини в підмуфтовій простір  $P_{my}$  при заданому тиску всередині резервуара стенду  $P_y$  представляє найбільший практичний інтерес.

Характер отриманих залежностей дозволив зробити попередній висновок про їх лінійності. Тобто, експериментально отримані залежності можуть бути виражені рівнянням прямої:

$$P_M = a \cdot P_p - P_{M0}, \quad (3.5.1)$$

де  $P_{M0}$  – тиск в підмуфтовому просторі при нульовому значенні тиску всередині трубопроводу;  $a$  – коефіцієнт, що показує ступінь впливу  $P_p$  на  $P_M$ .

Для оцінки збіжності теоретичних і експериментальних даних, проводився розрахунок залежностей  $P_M(P_P)$  за формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_M = \frac{P_P}{k} - \frac{P_Y}{k} + P_{MY}, \\ k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{III} \frac{E_M}{E_{III}}}{\frac{1 - \mu^2}{1 - 3\mu^2} \cdot D_T^2} + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M}, \\ \delta_{III} = \delta_{IIIУН} + \frac{P_{MY}}{4 \cdot E_T} \cdot \left( \frac{D_T^2}{\delta_T} + \frac{(D_T + 2 \cdot \delta_T + 2 \cdot \delta_{IIIУН})^2}{\delta_M} \right), \end{array} \right. \quad (3.5.2)$$

з використанням даних, наведених у таблиці 3.5.2

Таблиця 3.5.1

### Основні параметри стенду, муфти і речовини в підмуфтовому просторі

Внутрішній діаметр труби $D_T$	700 мм
Товщина стінки труби $\delta_T$	8 мм
Товщина стінки муфти $\delta_M$	8 мм
Глибина підмуфтового простору $\delta_{IIIУ}$	3 мм
Модуль пружності металу труби і муфти $C_M$	$2 \cdot 10^5$ МПа
Модуль пружності масла $C_{III\text{ мас}}$	$2,7 \cdot 10^3$ МПа
Модуль пружності SZLAST, затверділого без тиску $C_{III\text{ szlast}0}$ , визначений до випробувань	46 МПа
Модуль пружності SZLAST, затверділого під тиском $P_Y$ $C_{III\text{ szlast}Y}$ , розрахований по отриманим під час випробувань даними	64,9 МПа

Так як значення, отримані в результаті експерименту, включають деяку помилку, експериментально отримані крапки не лежать строго на одній прямій. У зв'язку з цим при обробці даних була проведена їх апроксимація (побудова лінії тренда) методом найменших квадратів з використанням статистичних функцій «НАХИЛ» і «ВІДПІЗОК», вбудованих в електронну таблицю Excel.

Зрозуміло, за відомими формулами, розраховувалися коефіцієнти  $a$  і  $P_{M0}$  теоретичної залежності. Після оцінки лінійності отриманих залежностей, перевірялася відповідність даних, отриманих в результаті аналітичного розрахунку з аналогічними експериментально отриманими даними. Далі обчислювалася відносна похибка експериментально отриманих даних.

Результати оцінки для даних, отриманих при запресуванні в підмуфтовій простір масла, наведені в таблицях 3.5.2–3.5.4.

Таблиця 3.5.2

**Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с**

$$P_y = 2,0 \text{ МПа}, \quad P_{MY} = 1,0 \text{ МПа}, \quad C_{\text{ПП.мас}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Теоретична залежність:							$P_M = 0,485 \cdot P_p + 0,03$			
Апроксимуюча залежність, виведена за методом найменших квадратів							$P_M = 0,5 \cdot P_p$			
$P_p, \text{ МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_{M \text{ екс}}, \text{ МПа}$ експеримент	0,25	0,5	0,75	<b>1,0</b>	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
$P_{M \text{ расч}}, \text{ МПа}$ розрахунок	0,275	0,517	0,758	<b>1,0</b>	1,242	1,484	1,725	1,967	2,209	2,451
похибка $\frac{ P_{M \text{ екс}} - P_{M \text{ расч}} }{P_{M \text{ расч}}} \cdot 100\%$	9,0%	3,2%	1,1%	<b>0%</b>	0,7%	1,1%	1,4%	1,7%	1,9%	2,0%

Таблиця 3.5.3

**Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с**

$$P_y = 3,5 \text{ МПа}, \quad P_{MY} = 3,5 \text{ МПа}, \quad C_{\text{ПП.мас}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

Теоретична залежність:							$P_M = 0,485 \cdot P_p + 1,803$			
Апроксимуюча залежність, виведена за методом найменших квадратів							$P_M = 0,472 \cdot P_p + 1,813$			

Продовження табл. 3.5.3

$P_p, \text{МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_{M \text{ екс}}, \text{МПа}$ експеримент	2	2,3	2,6	2,8	2,9	3,2	<b>3,5</b>	3,7	3,9	4,2
$P_{M \text{ расч}}, \text{МПа}$ розрахунок	2,050	2,291	2,533	2,775	3,017	3,298	<b>3,5</b>	3,742	3,984	4,225
похибка $\frac{ P_{M \text{ екс}} - P_{M \text{ расч}} }{P_{M \text{ расч}}} \cdot 100\%$	2,5%	0,4%	2,7%	0,9%	3,9%	1,8%	<b>0%</b>	1,1%	2,1%	0,6%

Таблиця 3.5.4

### Заповнення підмуфтового простору турбінним мастилом ТП-22с

$$P_y = 3,5 \text{ МПа}, \quad P_{MY} = 1,0 \text{ МПа}, \quad C_{\text{ПП.мас}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ МПа},$$

Теоретична залежність:							$P_M = 0,485 \cdot P_p - 0,698$			
Апроксимуюча залежність, виведена за методом найменших квадратів							$P_M = 0,464 \cdot P_p - 0,671$			
$P_p, \text{МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_{M \text{ екс}}, \text{МПа}$ експеримент	-	-	0	0,2	0,5	0,8	<b>1,0</b>	1,2	1,4	1,6
$P_{M \text{ расч}}, \text{МПа}$ розрахунок	-0,451	-0,209	0,033	0,275	0,517	0,578	<b>1,0</b>	1,242	1,484	1,725
похибка $\frac{ P_{M \text{ екс}} - P_{M \text{ расч}} }{P_{M \text{ расч}}} \cdot 100\%$	-	-	-	27,2%	3,2%	5,5%	<b>0%</b>	3,4%	5,6%	7,3%

При заповненні підмуфтового простору самотвердіючою масою SZLAST, можливості прямого виміру тиску за допомогою манометрів були обмежені. У зв'язку з цим для побудови залежностей використовувалися дані, які були одержані з тензорезисторів.

Багаторазові паралельні виміри тиску, що проводяться манометрами і механічні напруження, що проводяться за допомогою тензометричної станції, дозволяють провести статистичну оцінку можливості і точності визначення тиску в підмуфтовому просторі за інформацією з використовуваних на випробуваннях тензорезисторів.

Тензометричний вимір проводився за лінійної схемою, отже, показання тензометричної станції повинні мати лінійну залежність від величини тиску в трубопроводі і, в загальному випадку, описуватися залежністю:

$$U_T = b_T \cdot P_p + \Delta U_T, \quad (3.5.3)$$

де  $U_T = k \cdot \sigma_{T0}$  – показники реєстратора тензометричного каналу  $T$  (з тензорезистором, встановленому на трубі);  $b_T$  – коефіцієнт, що показує ступінь впливу  $P_p$  на  $U_T$  в тензометричному каналі  $T$ ;  $\Delta U_T$  – зміщення даних тензоамерів каналу  $T$ .

Аналогічно для каналу  $M$  (з тензорезистором, встановленому на стінці муфти):

$$U_M = b_M \cdot P_p + \Delta U_M, \quad (3.5.4)$$

де  $U_M = k \cdot \sigma_{Mp}$  – показники реєстратора тензометричного каналу  $M$ ;  $b_M$  – коефіцієнт, що показує ступінь впливу  $P_M$  на  $U_M$  в тензометричному каналі  $M$ ;  $\Delta U_M$  – зміщення даних тензоамерів каналу  $M$ .

У підрозділі 3.2 описувалася методика налаштування масштабуючих підсилювачів кожного з каналів, тобто, зміщення  $\Delta U_T$  і  $\Delta U_M$  повинні бути близькі до нульового значення, а коефіцієнти  $b_T$  і  $b_M$  повинні бути практично рівні між собою ( $b_T \approx b_M$ ).

Більш точні дані може дати статистичне опрацювання отриманих в процесі випробувань даних.

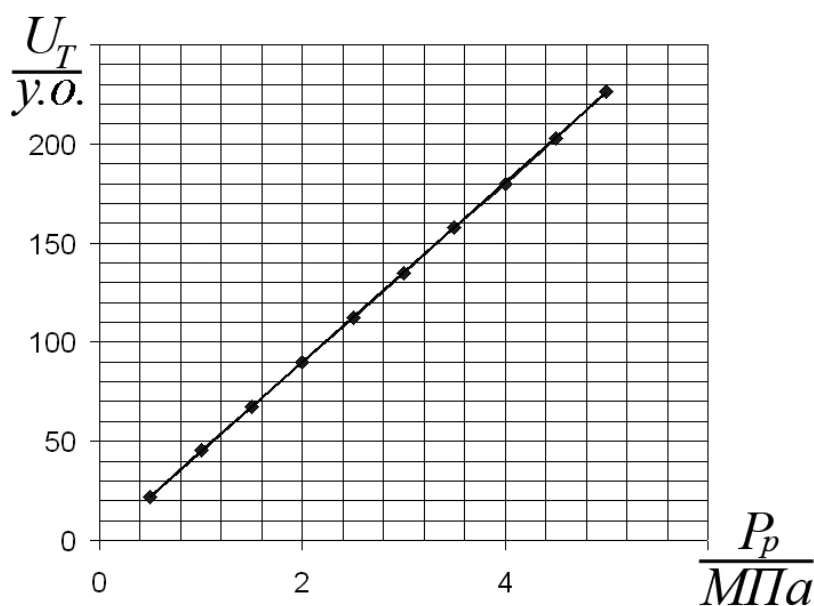
Дані чотирьох серій вимірів  $U_T(P_p)$  взяті з таблиць 3.4.1–3.4.4 та зведені в таблицю 3.5.5.

Дані вимірів  $U_T(P_p)$  (рис.3.5.1)

$P_p, \text{МПа}$		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$k \cdot \sigma_{T0}, \text{у.о.}$	1	22	45	67	90	113	136	158	181	203	227
	2	23	45	68	91	112	135	157	180	202	226
	3	22	46	67	91	113	133	158	180	203	226
	4	21	45	67	90	112	136	158	179	202	226
Сер		22	45,25	67,25	90,05	112,5	135	157,75	180	202,5	226,25

Показання експериментально отриманої залежності після апроксимації методом найменших квадратів, з достовірністю, близькою до одиниці (квадрат коефіцієнта Пірсона дорівнює одиниці) описується виразом:

$$U_T = 45,192 \cdot P_p - 0,423, \quad (3.5.5)$$

Рис. 3.5.1. Графік залежності  $U_T(P_p)$ 

Разом з тим, для подальших досліджень, практичний інтерес представляє оцінка можливості визначення тиску в підмуфтовому просторі за допомогою тензорезистора, встановленого на поверхні муфти.

Для тензорезистора каналу  $M$  дані вимірів  $U_M(P_p)$  взяті з таблиць 3.4.1–3.4.4 та зведені в таблицю 3.5.6.

Таблиця 3.5.6

Дані вимірів  $U_M(P_p)$  (рис. 3.5.2)

$P_M, \text{МПа}$	0,2	0,25	0,5	0,75	0,8	1,0	1,2	1,25	1,4	1,5	1,6	1,75
$k \cdot \sigma_{Mp}, \text{у.о.}$	9	11	22	34	35	47	54	57	63	69	75	79
$P_M, \text{МПа}$	2,0	2,25	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	3,2	3,5	3,7	3,9	4,2
$k \cdot \sigma_{Mp}, \text{у.о.}$	95	106	102	116	116	127	134	148	156	167	178	190

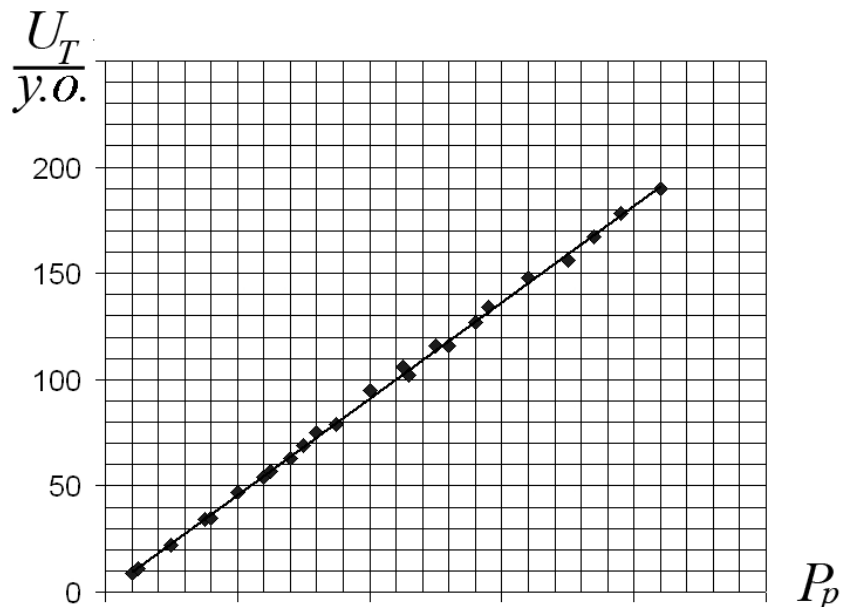


Рис. 3.5.2. Графік залежності  $U_M(P_p)$

Після апроксимації методом найменших квадратів, експериментально отримана залежність  $U_M(P_p)$ , описується виразом:

$$U_T = 45,428 \cdot P_p + 0,299, \quad (3.5.6)$$

Таким чином, дані тензометричного виміру по каналу  $M$  можуть бути використані для розрахунку тиску в підмуфтовому просторі в разі застосування самотвердіючої маси SZLAST. При цьому достовірність виміру, яка визначається квадратом коефіцієнта Пірсона, становить 0,999.

Результати перерахунку даних тензометрії в тиску представлені в табл. 3.5.7.

Таблиця 3.5.7

**Заповнення підмуфтового простору поліуретановим складом SZLAST**

$$P_y = 4,0 \text{ МПа}, \quad P_M = 1,5 \text{ МПа}$$

(дані тензометрії переведені в тиску через 14 годин)

$$P_T = 3,4 \text{ МПа}, \quad P_M = 0,98 \text{ МПа}$$

$P_p, \text{ МПа}$	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>
$P_M, \text{ МПа}$	-	-	0,13	0,35	0,57	0,79	1,03	1,25	1,45	1,67

Випробування показали, що тиск в підмуфтовому просторі за час полімеризації самотвердіючої маси знизився. Зменшення тиску може бути викликане як усадкою самої маси, так і обмеженою швидкістю розподілу самотвердіючої маси в торцевих областях підмуфтового простору, що мають складний профіль і вузький прохідний перетин. Крім того відомо, що показник стиснення самотвердіючих рідких речовин, а отже, і їх модуль пружності, залежить від тиску. При цьому з ростом тиску зазвичай спостерігається зростання модуля пружності. Разом з тим, модуль пружності самотвердіючої маси був раніше отриманий [135] для зразка, полімеризація якого проходила без надмірного тиску, порівняного з тиском в підмуфтовому просторі.

Отримана залежність після апроксимації методом найменших квадратів, з високою вірогідністю (квадрат коефіцієнта Пірсона дорівнює 0,999) описується виразом:

$$P_M = 0,442 \cdot P_p - 0,536, \quad (3.5.7)$$

коефіцієнт впливу  $a$  при даних параметрах трубопроводу і муфти буде дорівнювати  $a = 0,442$  при модулі пружності матеріалу підмуфтового шару  $C_{III \text{ szlast}} = 64,9 \text{ МПа}$ .

Усадка самотвердіючої маси SZLAST після закінчення процесів полімеризації може бути визначена з виразів (3.5.3) і (3.5.1) у такий спосіб:



$$\Delta P = P_{M0_T} - P_{M0_{\text{ж}}} , \quad (3.5.8)$$

де:  $P_{M0_T}$  – тиск в підмуфтовому просторі при нульовому значенні тиску всередині трубопроводу, з затверділим шаром SZLAST в підмуфтовому просторі (може бути отримано з виразу (3.5.3) для  $P_p = 0$ );  $P_{M0_{\text{ж}}}$  – тиск в підмуфтовому просторі при нульовому значенні тиску всередині трубопроводу, з рідким шаром SZLAST в підмуфтовому просторі відразу після закінчення запресування (може бути отримано з виразу (3.5.1) для  $P_p = 0$ );

$$\Delta P = P_{M0_P} - (a \cdot P_y - P_{MY}) = 0,536 - 0,442 \cdot 4 + 1,5 = 0,268 \text{ МПа} , \quad (3.5.9)$$

Знання значення усадки  $\Delta P$  використовуюваного для заповнення підмуфтового простору речовини має важливе практичне значення, так як дозволяє домогтися рівномірного розподілу навантаження між трубою і стінкою муфти при запресовуванні речовини під оптимальним тиском, що визначається співвідношенням:

$$P_{MY_{on}} = a \cdot P_y + \Delta P , \quad (3.5.1)$$

При ремонті трубопроводів великого діаметру та малій глибині підмуфтового простору, однакої товщині стінок труби і муфти і використанні практично нестисливої речовини, що не дає усадки ( $C_{\text{пп}} \approx C_M$ ,  $\delta_{\text{пп}} \approx 0$ ,  $D_M \approx D_T$ ,  $\Delta P \approx 0$ ), оптимальний тиск запресування речовини в підмуфтовій простір дорівнює половині тиску в трубопроводі на момент заповнення муфти.

В даному випадку, порівняння теоретичних і експериментальних досліджень при використанні самотвердіючої речовини не зовсім коректно через відсутність об'єктивних даних про величину його модуля пружності під тиском. Значення  $C_{\text{пп szlast}} = 64,9 \text{ МПа}$  і величина усадки, що викликає падіння тиску в підмуфтовому просторі  $\Delta P = 0,268 \text{ МПа}$  були визначені непрямым шляхом. При використанні в розрахунках цих даних, розбіжність між розрахунковими й експериментальними даними не перевищує двох відсотків.

Обробка результатів експерименту показала, що на ефективність посилення труби в значній мірі впливає величина модуля пружності речовини,

що закачується в підмуфтовій простір, який може бути істотно збільшений введенням в них спеціальних порошкових наповнювачів.

Показана хороша збіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень, похибка апроксимації експериментально отриманих даних експериментальними залежностями в основному не перевищує 9 %. Високі значення похибки апроксимації (27 %) при незначних тисках в підмуфтовому просторі (до 0,2 МПа) обумовлені похибкою зчитування інформації з манометрів на самому початку їх вимірювальної шкали.

Експериментально підтверджена можливість практичного використання розробленого в роботі способу оперативного контролю якості заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною за інформацією про величину механічних кільцевих напружень, виміряних на поверхні муфти і стінці труби поза зоною встановлення муфти.

## **4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВДОСКОНАЛЕННЮ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МОНТАЖУ КЛЕСЗВАРНОЇ МУФТИ ТА СПОСОБІВ МУФТОВОГО РЕМОНТУ ТРУБОПРОВODІВ**

### **4.1. Розробка способів контролю якості заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною**

Підмуфтовий простір муфт, як правило, має складну форму з непостійним прохідним перетином. Внутрішні підкладні кільця, технологічні установочні кільця, валики поздовжніх, кільцевих і спіральних зварних швів є перешкодою для руху самотвердіючої речовини. При високій швидкості заповнення підмуфтового простору це може привести до нерівномірного заповнення порожнини і ймовірної появи в підмуфтовому шарі повітряних бульбашок. Для запобігання цьому в документі, який регламентує порядок формування підмуфтового шару [156], обумовлено, що заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною має здійснюватися через штуцер, встановлений в нижній частині муфти, а швидкість введення речовини повинна забезпечувати нерівномірність зміни його рівня в підмуфтовому просторі, що не перевищує 30 мм по всій площі муфти.

У разі нерівномірного заповнення підмуфтового простору, пропонується зупинити процес подачі самотвердіючої речовини до вирівнювання верхньої поверхні речовини. При цьому контроль заповнення проводиться тільки на завершальному етапі заповнення муфти через дренажні отвори в верхній частині оболонки деяких видів муфт за допомогою спеціальних щупів, аналогічних широко відомим щупам контролю рівня масла в автомобілях. Іншим керівним документом РД-75.180.00-КТН-164-06 (Технологія проведення робіт по композитно-муфтовому ремонту магістральних трубопроводів) контроль заповнення пропонується проводити за допомогою технологічних отворів по всій площі оболонки муфти. Використовувані методи контролю трудомісткі і не гарантують формування однорідного підмуфтового шару і мають обмежене застосування при установці деяких видів муфт з великою глибиною

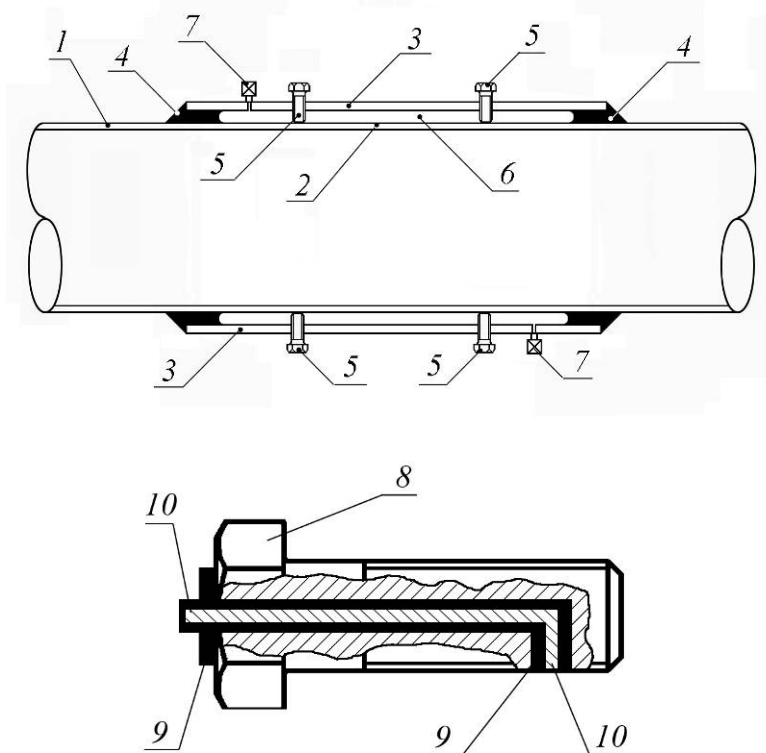
підмуфтового простору. Контроль заповнення в муфтах складної форми і малою глибиною підмуфтового простору не передбачається, а пропонується обмеження мінімального часу заповнення всього обсягу, що призводить до необґрунтованого затягування ремонтних робіт. При цьому вимоги справедливі тільки для одного виду компаунда.

Оперативний контроль заповнення підмуфтового простору методами неруйнівного контролю дозволить мінімізувати час проведення робіт і підвищити якість підмуфтового шару, в зв'язку з чим є важливим атрибутом технологічного ланцюжка муфтового ремонту трубопроводів, що дозволяє мінімізувати час. Оперативне виявлення нерівномірного заповнення підмуфтового простору дозволить оптимізувати процес закачування самотвердіючої речовини.

#### ***4.1.1. Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору муфт British Gas***

В основу технології муфтового ремонту British Gas [138] належить технічне рішення за патентом Великобританії [5]. Ремонтна конструкція складається з двох напівмуфт. В процесі роботи напівмуфти механічно з'єднуються один з одним, утворюючи замкнуту оболонку навколо ремонтної ділянки трубопроводу. Далі оболонка центрується за допомогою технологічних елементів (болтів), встановлених в отворах корпусу. Після цього простір між трубопроводом і муфтою герметизується з обох кінців за допомогою складу (цементу, епоксидної шпаклівки і т. д.) застигає. В ізолюваний проміжок через спеціальні штуцери накачується епоксидний склад, який забезпечує високу жорсткість конструкції. Технологія British Gas набула великого поширення в Європі і Росії.

Тип використовуваного датчика вибирають в залежності від параметра, по вимірюванню якого може контролюватися наявність або відсутність самотвердіючої маси (компаунда) в точці контролю. Наприклад, можуть використовуватися ємнісні датчики, датчики опору, магнітні датчики, датчики температури, хімічні датчики. На запропонований спосіб контролю отримано патент на корисну модель України [120].



*Рис. 4.1.1. Використання центруючих болтів для встановлення датчиків неруйнівного контролю*

1 – трубопровід, 2 – посилена ділянка труби, 3 – муфта, 4 – торцеві ущільнювачі, 5 – болти з датчиками неруйнівного контролю, 6 – підмуфтовий простір, 7 – штуцери для запресування самотвердіючої речовини, 8 – центруючий болт; 9 – діелектрична вставка; 10 – датчик

#### ***4.1.2. Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю***

У разі заповнення підмуфтового простору сталевих муфт самотвердіючою масою на епоксидній або поліуретановій основі, а так само легкоплавким розплавленим металом (наприклад свинцем, оловом або їх сплавами), контроль процесу формування підмуфтового шару може здійснюватися ультразвуковим методом. З урахуванням високої температури ремонтної конструкції під час виконання робіт при використанні розплавленого металу, яка визначається температурою його плавлення, застосування найбільш поширених пьезоелектричних перетворювачів, пов'язане з відомими труднощами (обмеженість діапазонів температури, складність або неможливість контролю забруднених поверхонь) [1, 7, 63, 64]. Тому в якості випромінювача і приймача ультразвукових

коливань в цьому випадку пропонується застосовувати електромагнітний перетворювач (ЕМАП).

В даний час теорія ЕМА-збудження ультразвукової хвилі добре розроблена, що дає можливість розглянути питання практичного застосування ЕМА методу для контролю процесу формування підмуфтового шару [129, 160].

Постановка завдання зводиться до наступного. Необхідно визначити характерні відмінності в сигналі, отриманому при зондуванні ділянок муфти із суцільним підмуфтовим шаром і ділянок, що містять повітряні бульбашки або сторонні включення (наприклад, рідина, що залишилася після гідравлічних випробувань муфти). Очевидно, що дана задача може бути ефективно вирішена при використанні луна-методу.

Не дивлячись на уявну простоту, проведення ЕМА-контролю підмуфтового простору має ряд особливостей, які вимагають обліку при написанні роботи.

У найпростішому випадку, збуджена в верхньому шарі оболонки муфти за допомогою ЕМАП або ПЕП ультразвукова хвиля вводиться перпендикулярно границі оболонки і підмуфтового простору (рис. 4.1.2). Якщо в підмуфтовому просторі знаходиться повітря, то межа сталь-повітря може бути прирівняна до границі з вакуумом, так як газоподібні речовини мають вкрай малі звукові опори в порівнянні зі сталлю. Для повітря  $Z = 0,0004 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ , тому на границі сталь-повітря коефіцієнт відображення відрізняється всього на  $2 \cdot 10^{-5}$  [46]. Таким чином, з достатньою для практики точністю можна вважати, що хвиля таку границю не проходить і повертається в середину. Відбитий від границі імпульс може бути легко зареєстрований ЕМАП, підключеним до входу реєстратора.

У разі, якщо контрольовану ділянку підмуфтового простору заповнити самотвердіючою речовиною на епоксидній або поліуретановій основі, або ж розплавленим металом (наприклад, оловом або свинцем), характер поширення хвилі змінюється, так як частина хвилі буде поширюватися в підмуфтовий шар і з нього в тіло труби.

У зв'язку з тим, що розглядається перпендикулярні границі введення плоскої ультразвукової хвилі, то відображені хвилі будуть поширюватися так само перпендикулярно цій границі.

З урахуванням невеликої глибини підмуфтового простору, обмеженою висотою валика поздовжніх і кільцевих зварних швів, яка, за чинними нормативними документами не повинна перевищувати 3 мм, можна виділити три типові варіанти формування підмуфтового шару, проілюстрованих рис. 4.1.3.

Варіанту (а) відповідає наявність повітряного пузиря в підмуфтовому просторі або незаповнений підмуфтовий простір в точці вимірювання. Варіант (б) характеризується відсутністю адгезії речовини підмуфтового шару до внутрішньої поверхні муфти, що створює перешкоду для проходження ультразвукової хвилі. Варіанту (в) відповідає частково заповнений підмуфтовий простір.

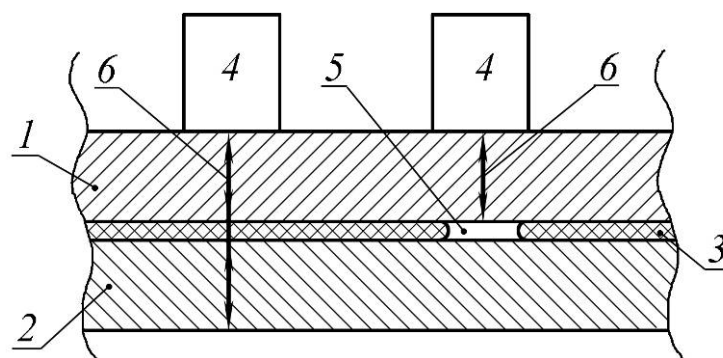


Рис. 4.1.2. Контроль формування підмуфтового шару  
ультразвуковим луна-методом

1 – оболонка муфти, 2 – посилююча труба, 3 – підмуфтовий шар,  
4 – УЗ датчики, 5 – повітряний пузир, 6 – ультразвукова хвиля

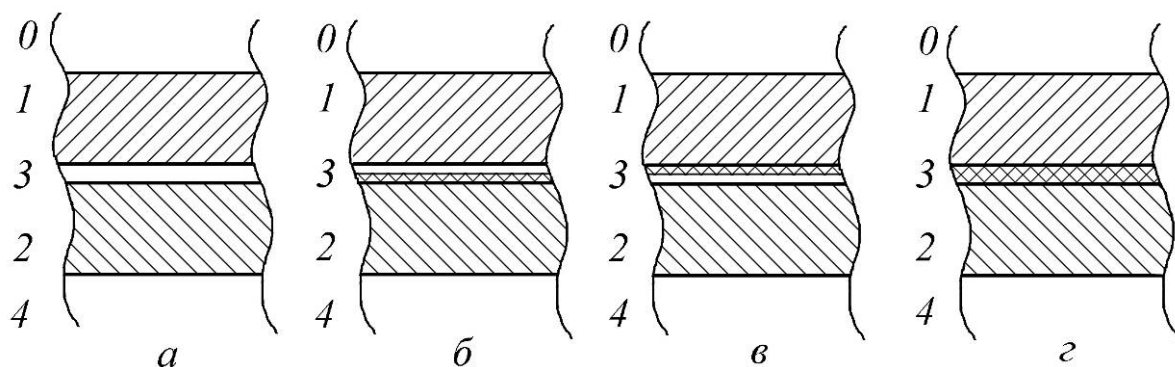


Рис. 4.1.3. Основні варіанти заповнення підмуфтового простору

0 – повітря, 1 – оболонка муфти, 2 – посилююча труба, 3 – підмуфтовий шар,  
4 – транспортування продукту; а – відсутність заповнення, б і в – часткове заповнення,  
г – повністю заповнений підмуфтовий простір

Варіант (в) характеризується гарним акустичним контактом між внутрішньою поверхнею муфти і підмуфтовим шаром і поганим між підмуфтовим шаром і посилюваної трубою. Варіант можливий, наприклад, при використанні заздалегідь залуження внутрішньою поверхнею муфти при заповненні підмуфтового простору розплавленим металом і відсутність заповнення, або хорошому заповненні підмуфтового шару, але поганого акустичного контакту з трубою через погано підготовленою в польових умовах поверхні труби, наявності шару іржі, або місць шпаклівки дефектів. Варіанту (г) відповідає повністю заповнений речовиною підмуфтовий простір з гарною адгезією поверхонь муфти і труби до речовини підмуфтового шару, що створює якісний акустичний контакт між шарами конструкції.

Таким чином, ультразвукова хвиля, збуджена ультразвуковим датчиком в шарі муфти 1, повинна подолати границю 1–3, пройти через підмуфтовий шар 3, границю 3–2 між підмуфтовим шаром 3 і трубою 2, відбитися від внутрішньої поверхні труби (межа 2–4) і повернутися аналогічним шляхом в стінку муфти, після чого вона буде зареєстрована ультразвуковим датчиком. Очевидно, що проходячи шари і границі між ними, звукова хвиля (імпульс) буде піддаватися відомим змін (відображенню, поглинання, розсіювання). В результаті багаторазових поділів і відображень хвилі на кожній межі, при наявності нескінченної вхідний хвилі виникає накладення і інтерференція.

У разі, якщо підмуфтовий простір заповнений повітрям (варіант (а)), буде мати місце повного відображення звукової хвилі від границі 1–3, що характеризується наявністю загасаючої послідовності імпульсів на виході ультразвукового датчика, викликаних впливом багаторазового відбиття хвилі між границями стінки муфти.

Після якісного заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною або розплавленим металом (варіант (в)), ультразвуковий імпульс розділиться на границю 1–3, при цьому, звукові тиску розділених хвиль будуть визначатися акустичними властивостями матеріалу підмуфтового простору. В цьому випадку, якщо звуковий тиск падає на границю 1–3 хвилі позначити як  $p_{11}$ , відображеної, як  $p_{12}$ , а минулої як  $p_{31}$ , то коефіцієнт відображення границі 1–3 може бути визначений як

$$k_p = \frac{p_{12}}{p_{11}}, \quad (4.1.9)$$



а коефіцієнт пропускання, як

$$k_r = \frac{p_{31}}{p_{11}}. \quad (4.1.9)$$

При цьому, значення коефіцієнтів відбиття і пропускання границі 1–3 можуть бути визначені з виразів [46]:

$$k_p = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1}, \quad (4.1.10)$$

$$k_r = \frac{2 \cdot Z_3}{Z_3 + Z_1}, \quad (4.1.11)$$

де:

$$Z_1 = \rho_1 \cdot c_1, \quad Z_3 = \rho_3 \cdot c_3 \quad (4.1.12)$$

– звуковий опір (імпеданс), відповідно, матеріалів стінки муфти і підмуфтового шару,  $\rho_1, \rho_3$  – щільність матеріалів стінки муфти і підмуфтового шару,  $c_1, c_3$  – швидкість звуку (для поздовжніх хвиль) в матеріалах стінки муфти і підмуфтового шару.

У переважній більшості випадків, муфти роблять з того ж матеріалу, що і посилювана труба. Для магістральних газопроводів це сталь, що характеризується звуковим опором  $Z_1 = Z_2 = 45 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^3$ . Для прикладу, в якості матеріалу підмуфтового простору може бути розглянута і масово застосовується для муфтового ремонту самотвердіюча речовина на поліуретановій основі SZLAST, звукове опір  $Z_3$  якого може бути визначено відповідно до вираження 4.1.12. Вхідне в вираз значення швидкості звуку  $c_3$  для поздовжньої ультразвукової хвилі може бути розрахована за параметрами, визначальними властивості міцності матеріалу, за формулою, запропонованою в [46]:

$$c_3 = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_3} \cdot \frac{1 - \mu_3}{(1 + \mu_3)(1 + 2 \cdot \mu_3)}}, \quad (4.1.13)$$

де  $E_3, \mu_3$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу підмуфтового шару.

Коефіцієнт Пуассона і модуль пружності самотвердіючої речовини SZLAST був визначений експериментально на обладнанні TIRA-test кафедри опору матеріалів Київського політехнічного інституту [135], їх значення склали

$\mu_3 = 0.487$ ,  $E_3 = 64,9 \text{ МПа}$ . Щільність відповідно до паспортних даних становить  $\rho_3 = 1.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Таким чином, швидкість звуку в матеріалі SZLAST становить:

$$c_3 = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_3} \cdot \frac{1 - \mu_3}{(1 + \mu_3)(1 + 2 \cdot \mu_3)}} = 2,75 \text{ км/с}. \quad (4.1.14)$$

Звідки звукове опір матеріалу SZLAST:

$$Z_3 = \rho_3 \cdot c_3 = 4,125 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)} = 4,125 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^3. \quad (4.1.15)$$

У разі заповнення підмуфтового простору оловом, звуковий опір матеріалу підмуфтового шару дорівнюватиме  $Z_3 = 24 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^3$ .

Для компаундного підмуфтового шару, сформованого з матеріалу SZLAST, для межі 1–3,  $k_p = -0,832$ ,  $k_r = 0,168$ , тобто, звуковий тиск відображеної звукової хвилі становить – 83,2 % падаючої, а минулої 16,8 %. Для границі 3–2 (перехід з підмуфтового простору в стінку труби, ці значення будуть складати  $k_p = 0,832$ ,  $k_r = 1,832$ , (звуковий тиск відображений від границі 2–3 хвилі становить 83,2 % і на неї падає, а минулої 183,2 %). Збільшення звукового тиску при проходженні границі 2–3 пояснюється значно більшим, в порівнянні з поліуретаном, звуковим опором стали.

В газопроводах внутрішня поверхня труби межує з газом, тому границі 3–4 можна вважати вільною, коефіцієнт відображення якої дорівнює одиниці.

Для підмуфтового шару, сформованого з олова, для межі 1–3,  $k_p = -0,3$ ,  $k_r = 0,7$ , тобто, звуковий тиск відображеної звукової хвилі становить –30 % падаючої, а минулої 70%. Для границі 3–2 (перехід з підмуфтового простору в стінку труби, ці значення будуть складати  $k_p = 0,3$ ,  $k_r = 1,30$ , (звуковий тиск відображений від границі 2–3 хвилі становить 30 % і на неї падає, а минулої 130 %). Отримані дані зведені в таблицю 4.1.

У процесі поширення ультразвукової хвилі в шарах в результаті процесів розсіювання на неоднорідних структурах шарів і поглинанні частини енергії матеріалом шарів, відбувається її загасання. Обидва види втрат обмежують практичне використання ультразвукового методу для контролю процесу формування підмуфтового шару. Серйозні труднощі при контролі можуть виникнути через появу численних відображень, які відповідають різному часу приходу хвиль.

**Проходження ультразвукової хвилі через границю розділу шарів  
муфтової конструкції**

Границя	Звуковий тиск в % від звукового тиску хвилі на границі					
	незаповнений ПП		Компаундне заповнення ПП (SZLAST)		заповнення ПП розплавленим металом (олово)	
	Відобр. хвиля	Пройд. хвиля	Відобр. хвиля	Пройд. хвиля	Відобр. хвиля	Пройд. хвиля
1–3 муфта-ПП шар	$\approx -100\%$	–	$-83,2\%$	$16,8\%$	$-30\%$	$70\%$
2–3 ПП шар труба	–	–	$83,2\%$	$183,2\%$	$30\%$	$130\%$
2–4 труба газ	–	–	$\approx -100\%$	–	$\approx -100\%$	–

Зміна звукового тиску в ультразвукової хвилі, що пройшла деяку відстань в однорідному середовищі, описується експоненціальним рівнянням виду [46]:

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (4.1.16)$$

де:  $p$  – звуковий тиск на виході ділянки довжиною  $l$  однорідного матеріалу,  $p_0$  – звуковий тиск на початку ділянки,  $\alpha$  – коефіцієнт загасання.

Таким чином, звуковий тиск  $p_0$  хвилі, що пройшла ділянку 1 (муфта), на границі 1–3 знизиться до величини  $p_{11} = p_0 \cdot e^{-\alpha_M \cdot \delta_M}$ , де  $\alpha_M$  – коефіцієнт загасання матеріалу муфти. Минулий через границю 1-3 хвиля буде створювати звуковий тиск  $p_{31} = D \cdot p_{11}$ , який знизиться до величини  $p_{32} = p_{31} \cdot e^{-\alpha_{III} \cdot \delta_{III}}$ , де  $\alpha_{III}$  – коефіцієнт загасання матеріалу підмуфтового простору на границі 3–2.

Тобто, звуковий тиск буде змінюватися на ях середовищ і зменшуватися в міру поширення в матеріалах шарів.

Якщо знехтувати загасанням в шарах і обмежитися розглядом тільки головних максимумів, то можна виділити чотири основних характерних луна-імпульсу, на підставі аналізу яких можна судити про якість формування підмуфтового шару (рис. 4.1.4).

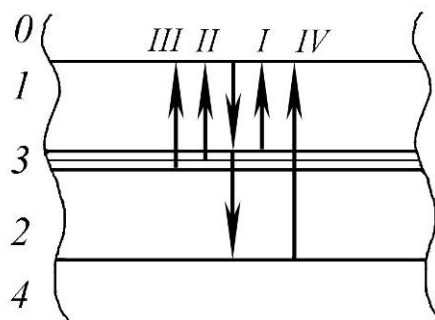


Рис. 4.1.4. Формування характерних луна-імпульсів

0 – повітря, 1 – оболонка муфти, 2 – посилювана труба,  
3 – підмуфтовий шар, 4 – транспортування продукту;

На малюнку позначені: I – луна-імпульс, відбитий від границі муфта-підмуфтовий шар, II – луна-імпульс, відбитий від внутрішньої межі підмуфтового шару (варіанти б і в рис. 4.1.3), III – луна-імпульс, відбитий від границі підмуфтовий шар труба, IV – луна-імпульс, відбитий від границю труба-транспортування продукту.

Дані розрахунку звукового тиску, створюваного характерними луна-імпульсами при різних варіантах формування підмуфтового шару, представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

#### Звуковий тиск, що створюється характерними луна-імпульсами

Луна-імпульси	компаундне заповнення ПП (SZLAST)			заповнення ПП розплавленим металом (олово)		
	варіант а, б	варіант в	варіант г	варіант а, б	варіант в	варіант г
I	$\approx p_0$	$0,832 p_0$	$0,832 p_0$	$\approx -p_0$	$0,3 p_0$	$0,3 p_0$
II	–	$0,308 p_0$	–	–	$0,91 p_0$	–
III	–	–	$0,256 p_0$	–	–	$0,273 p_0$
IV	–	–	$0,095 p_0$	–	–	$0,828 p_0$

Для наочності, отримані дані можуть бути представлені у вигляді графічних діаграм (рис. 4.1.5).

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що ультразвуковий метод може бути використаний для контролю якості формування підмуфтового шару, сформованого як з рідкого компаунда, так і з розплавленого металу. Разом з тим,

слід зазначити, що його застосування для контролю процесу заповнення підмуфтового простору компаундом пов'язано з труднощами виділення корисного сигналу на тлі багатократних віддзеркалень ультразвукової хвилі від стінок оболонки муфти, які є в даному випадку шумом. Дане питання вимагає коректної схемотехнічної побудови ультразвукового приладу.



Рис. 4.1.5. Звуковий тиск, що створюється характерними луна-імпульсами

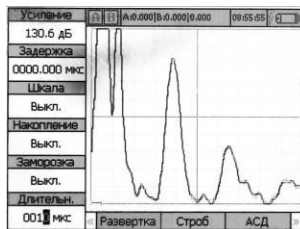
Контроль якості формування підмуфтового шару з розплавленого металу не повинен викликати труднощів через простоту реєстрації яскраво виражених сигналів, що характеризують стан підмуфтового простору. Для цілей контролю може бути використаний ультразвуковий товщинометр, побудований, наприклад, на основі ЕМА перетворювача, працездатного в умовах підвищених температур. У разі проведення вимірювань по луна-імпульсу, який має максимальну амплітуду, ЕМА товщинометру дозволить отримати достовірну інформацію про стан підмуфтового простору. Для збудження ультразвукової хвилі в стінці муфти, що має підвищену температуру, може бути використаний альтернативний спосіб, що не вимагає застосування зовнішніх магнітів [86, 110].

#### ***4.1.3. Експериментальна перевірка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю***

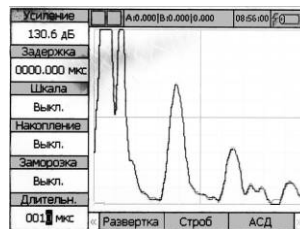
Для експериментальної перевірки способу контролю якості заповнення підмуфтового простору за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю використовувався ультразвуковий дефектоскоп УД-4Т. Як об'єкт контролю використовувалися частини оболонки муфти і труби, на яких змодельовані варіанти заповнення підмуфтового простору, наведені на рис. 4.1.3.

Як матеріал для формування підмуфтового шару використовувався композитний матеріал на поліуретановій основі SZLAST і олово.

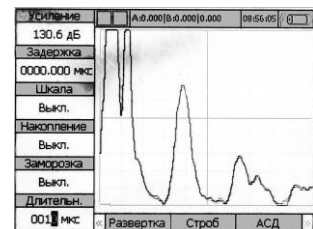
Результати експериментальної перевірки показані на фотографіях, представлених на рис. 4.1.6 і рис. 4.1.7



Варіант а, б

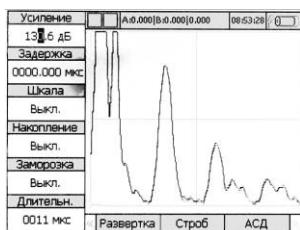


Варіант в

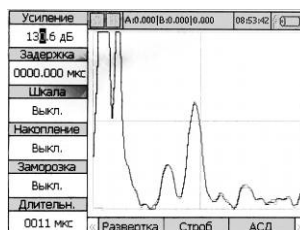


Варіант г

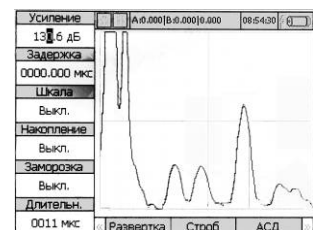
*Рис. 4.1.6. Фотографії екрану дефектоскопа з луна-імпульсами при ультразвуковому зондуванні муфти з підмуфтовим простором, заповненим композитною речовиною SZLAST*



Варіант а, б



Варіант в



Варіант г

*Рис. 4.1.7. Фотографії екрану дефектоскопа з луна-імпульсами при ультразвуковому зондуванні муфти з підмуфтовим простором, заповненим розплавленим оловом*

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що використання ультразвукового дефектоскопа УД-4Т не дозволяє здійснити достовірний контроль якості заповнення підмуфтового простору компаундною речовиною на

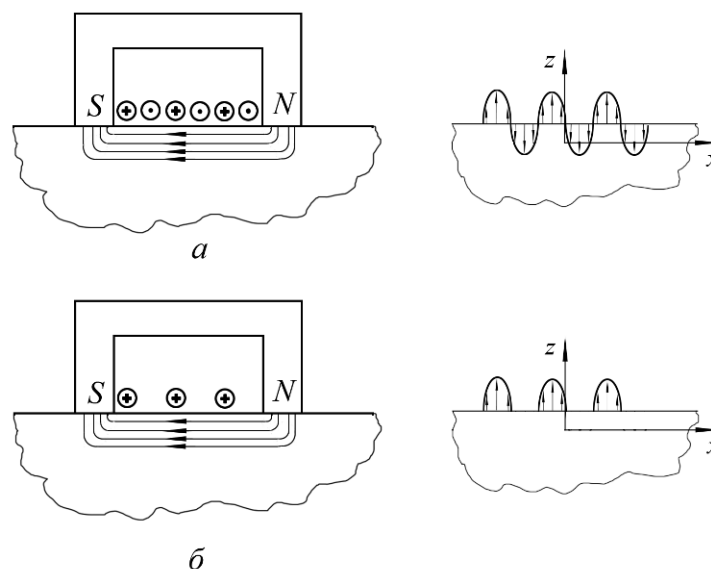
поліуретановій основі SZLAST через складність виділення луна-сигналів, що несуть корисну інформацію від паразитних сигналів, що виникають при багаторазовому відбитті ультразвукової хвилі від поверхонь стін муфти. У той же час, аналіз ехосигналів дає достовірну інформацію про стан підмуфтового шару з олова.

#### ***4.1.4. Експериментальні дослідження можливості контролю якості формування підмуфтового шару розплавленим металом за допомогою ЕМА-методу неруйнівного контролю***

Теорія розрахунку ЕМА перетворювачів, призначених для роботи з електропровідними матеріалами, досить повно розкрита в ряді робіт [26, 27, 51, 52, 144, 177]. Отримані в них вираження і залежності можуть бути покладені в основу практичного розрахунку ЕМА перетворювача для проведення експериментальних досліджень.

Для формування поздовжніх хвиль в габаритних об'єктах в [144] рекомендується використовувати схеми, представлені на рис. 4.1.8

Дана схема найбільш ефективна для контролю виробів з феромагнітних матеріалів. В цьому випадку збудження здійснюється за допомогою ниток-випромінювачів (решітки). В роботі [26], що містять експериментально отримані дані, показано, що діаграми спрямованості подібного ЕМА датчика поздовжніх хвиль і стандартного ПЕП практично збігаються.



*Рис. 4.1.8. Схеми електромагнітно-акустичного збудження поздовжніх хвиль  
а – протифазні випромінювачі; б – синфазні випромінювачі*

Групою дослідників [27, 129] були проведені дослідження ЕМА перетворювачів з порушенням від періодичної решітки випромінювачів. Показано, що порушення об'єкта контролю системою синфазних випромінювачів крок (відстань між нитками-випромінювачами)  $l = \lambda$ ; при порушенні систем протифазних випромінювачів  $l = \frac{\lambda}{2}$ , де  $\lambda = \frac{c_c}{f}$  – довжина нормальної хвилі у відповідній робочій точці;  $c_c$  – фазова швидкість УЗ хвилі;  $f$  – робоча частота УЗ випромінювання. Показано, що найбільш ефективно дана схема побудови ЕМА може застосовуватися при контролі виробів з феромагнітних матеріалів.

Поруч дослідників [52, 38] показано, що існує значення зовнішнього магнітного поля  $B_{\text{в}} = 0,3 \text{ Тл}$ , яке є оптимальним для феромагнітних матеріалів як для збудження ультразвукових коливань, так і для їх прийому.

Зарубіжні дослідники, які віддають перевагу експериментальному дослідженню ЕМА перетворювачів пропонують проводити виготовлення котушок збудження шляхом фотодруку, що виключає виникнення інтерференційних ефектів в порушуємо хвилі.

У разі пропускання по нитці-випромінювача (рис. 4.1.9) гармонійно змінного струму, на поверхню оболонки муфти матиме місце розподіл тисків, яке описується виразом 4.1.17 [144]:

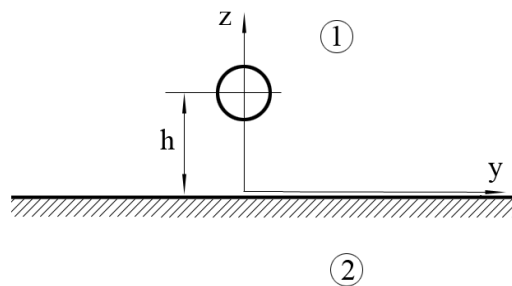


Рис. 4.1.9. Розташування нитки-випромінювача щодо оболонки муфти 2

$$p = -\mu_0 \cdot \mu \frac{I_0^2 \cdot h^2}{4 \cdot \pi \cdot (h^2 + y^2)^2} (1 + \cos 2 \cdot \omega \cdot t), \quad (4.1.17)$$

де:  $I_0$  – амплітудне значення струму нитки;  $\omega$  – кругова частота;  $f$  – частота струму в нитки.

Відомо, що ефективність ЕМА перетворення підвищується при наявності зовнішнього (досить потужного) магнітного поля [178]. Це впливає з теорії



ферромагнетизму і пояснюється тим, що великий внесок в загасання УЗ коливань в ферромагнетиках вносять втрати на вихрові струми, що виникають при переміщенні доменів. Зовнішнє магнітне поле призводить до впорядкування доменної структури і зменшує загасання ультразвуку. В цьому випадку магнітне поле струмів ( $B_{\approx}$ ) адитивно складається з зовнішнім постійним магнітним полем ( $B_{\equiv}$ ):

$$B_{\Sigma} = B_{\approx} + B_{\equiv}, \quad (4.1.18)$$

Вираз, що описує закон розподілу тисків на поверхню муфти в цьому випадку записується у вигляді [144]:

$$p = -\mu_0 \cdot \mu \frac{I_0^2 \cdot h^2}{4 \cdot \pi \cdot (h^2 + y^2)^2} (1 + \cos 2 \cdot \omega \cdot t) - \mu_0 \cdot \mu \frac{I_0 \cdot h \cdot H_{\equiv}}{\pi \cdot (h^2 + y^2)} \cos \omega \cdot t, \quad (4.1.19)$$

де  $H_{\equiv}$  – напруженість зовнішнього постійного магнітного поля.

З виразу [4.1.19] видно, що зовнішнє магнітне поле впливає на процес формування акустичної хвилі. Зрозуміло з цим, зовнішнє магнітне поле впливає і на процес поширення акустичної хвилі в об'єкті контролю, впливаючи на доменні структури речовини, змінюючи тим самим затухання ультразвуку. Крім того, параметри відбитої акустичної хвилі оцінюються по вихровим струмам, що виникають в результаті взаємодії силових ліній магнітного поля з хитаються частинками речовини. Отже, параметри магнітного поля визначають ефективність всього процесу контролю об'єкта ЕМА методом [38].

Численні експериментальні дослідження, проведені різними авторами, дозволяють зробити висновок, що для більшості ферромагнітних сталей існує оптимальна напруженість зовнішнього магнітного поля, при якій ефективність неруйнівного контролю ЕМА методом буде максимальною. Наприклад, при контролі ферромагнітних листів в роботі [52] визначено оптимальне значення магнітної індукції зовнішнього поля  $B_{\equiv} = 0,3 \text{ Тл}$ .

Очевидно, що магнітна система ЕМА датчика, що розробляється для проведення експериментальних досліджень, повинна забезпечувати оперативне регулювання магнітної індукції в контрольованому об'єкті з метою вибору її оптимального значення.

У статті [130] зроблено аналіз відомих формувань магнітного поля для ЕМА датчика з нитками-випромінювачами, показаних на рис. 4.1.10.

У схемах (а, б, в) оптимальне значення магнітної індукції задається за допомогою переміщення магніту щодо магнітопроводів, в результаті чого змінюється загальна магнітна проникність сердечника. У схемі (г) значення магнітної індукції задається шляхом зміни МДС електромагніту. При цьому МДС може регулюватися дискретно, шляхом зміни числа витків котушки або плавно, шляхом зміни струму, що протікає в котушці. Число витків котушки може змінюватися за допомогою електронного комутатора, що підключає до джерела струму необхідну групу обмоток. В роботі [130] наведені графіки, що ілюструють роботу кожної схеми побудови формувача зовнішнього магнітного поля, отримані в результаті розрахунків з використанням програмного пакета Elcut [140].

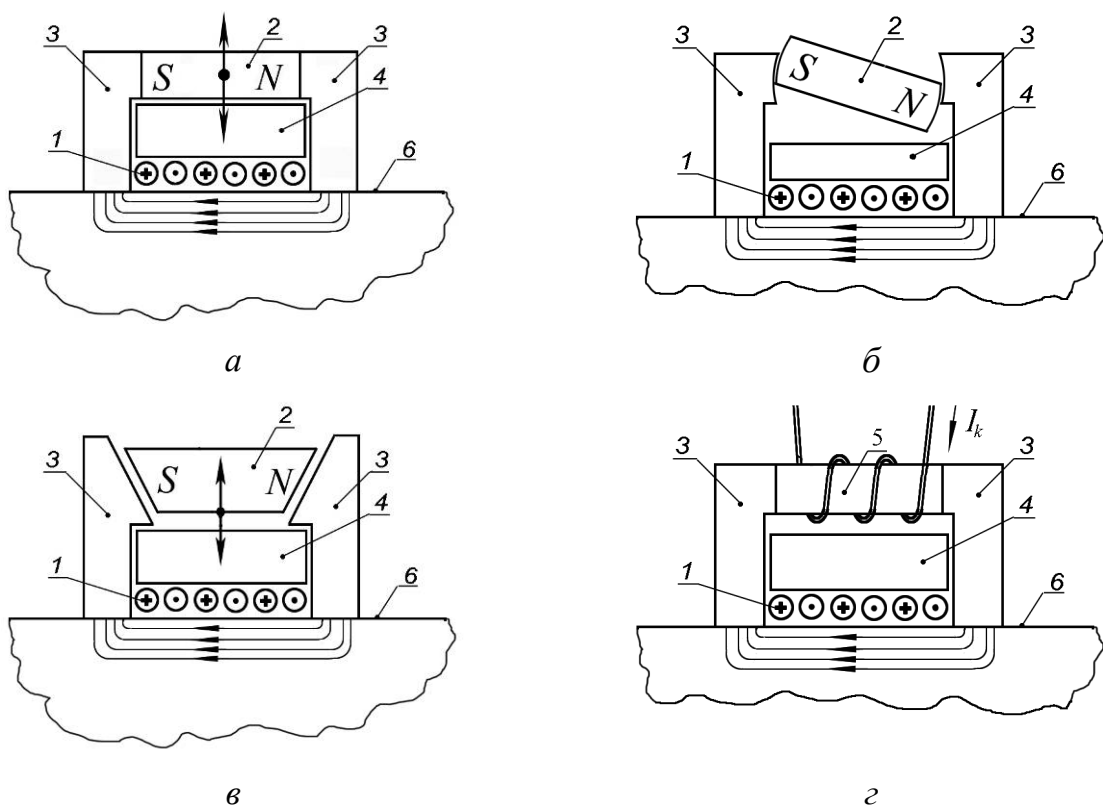


Рис. 4.1.10. Схеми формувачів зовнішнього магнітного поля

1 – нитки-випромінювачі, 2 – магніт, 3 – магнітопроводи, 4 – кріпильна вставка,  
5 – електромагніт, 6 – поверхня муфти

Отримані залежності показують, що при наявності невеликого повітряного зазору, для створення оптимальної магнітної індукції потрібне застосування електромагніту з відносно великою МДС (200–300 аВ), що призводить до підвищеного енергоспоживання. Використання імпульсного підмагнічувачів має обмеження через перехідні процесів. У зв'язку з цим, в ЕМА перетворювачів, що

використовують гребінчастий спосіб збудження нормальних акустичних хвиль, для регулювання магнітної індукції більш доцільно використовувати схеми побудови з рухомим або обертовим магнітом.

Розглянуті конструкції датчиків дозволяють змінювати значення магнітної індукції зовнішнього поля на поверхні контрольованого виробу в широких межах. Разом з тим, при проведенні вимірювань в умовах значних зовнішніх полів, напрямок результуючого вектора магнітної індукції поля на поверхні контрольованого об'єкта може не збігатися з напрямком вектора магнітної індукції поля, що формується вузлом підмагнічування. Конструкція вузла підмагнічування в розглянутих конструкціях не дозволяє змінювати значення магнітної індукції поздовжнього поля. Наявність некомпенсованої поздовжньої складової поля може привести до непостійності результатів вимірювання одного і того ж об'єкту, що знаходиться в різних умовах впливу зовнішніх магнітних полів. У зв'язку з цим, для контролю заповнення підмуфтового простору розплавленим металом, ЕМА перетворювач складається з вузла підмагнічування і випромінювача. Випромінювач являє собою решітку, що складається з декількох розташованих в одній площині паралельно один одному провідників (ниток-випромінювачів). Решітка розташована між полюсами вузла підмагнічування, в безпосередній близькості від поверхні контрольованого виробу паралельно їй. Нитки-випромінювачі повинні розташовуватися один від одного на відстані  $l$ , пропорційному  $\lambda$  – довжині нормальної акустичної хвилі, порушуємо ЕМА перетворювачем. Тобто,  $l = \lambda/n$ , де  $n = 1, 2, \dots, k$  – ціле число. У більшості випадків практичного застосування перетворювачів  $n = 1$  або  $n = 2$ . При контролі виробів з феромагнітних матеріалів може бути використана високочастотна решітка з  $n = 6$  [27].

Вузол підмагнічування складається з чотирьох магнітоводів, встановлених перпендикулярно поверхні контрольованого виробу, навколо випромінювача. При цьому полюса двох магнітопроводів розташовані паралельно ниткам, а двох інших (додаткових) – перпендикулярно ниткам решітки. Верхні торці магнітоводів спрямовані до центру магніту. Магніт, розташований між верхніми торцями магнітоводів, виконаний у вигляді паралелепіпеда з закругленими краями. При цьому забезпечено можливість обертання магніту навколо своєї точки симетрії.

Для зручності практичної експлуатації, магніт поміщений всередину кулі з діаманітного матеріалу, наприклад, способом запресування.

Магнітоводи, випромінювач і куля магніту зафіксовані один щодо одного за допомогою прямокутного бруска, виготовленого з діелектричного матеріалу. При цьому випромінювач прикріплений до нижньої сторони бруска, до бічних сторін якого прикріплені внутрішні сторони магнітоводів. На верхній стороні діелектричного бруска зроблена сферична виїмка.

Для зручності куля може бути забезпечена ручкою, а на поверхні кулі нанесена координатна сітка.

Робота пропонованого ЕМА перетворювача полягає в наступному. Для проведення неруйнівного контролю ЕМА перетворювач встановлюють на поверхню контролюваного виробу. При цьому випромінювач розташовують в безпосередній близькості від поверхні. За допомогою вузла підмагнічування в верхньому шарі об'єкта контролю створюється постійне магнітне поле. Необхідні характеристики магнітного поля отримують, обертаючи магніт щодо точки його симетрії. При обертанні магніту буде змінюватися значення магнітної індукції зовнішнього поля на поверхні контролюваного виробу. У певному положенні магніту буде забезпечена максимальна компенсація поздовжньої складової зовнішнього магнітного поля, при заданому значенні магнітної індукції поперечної складової. Після цього на нитки випромінювача подається електричний сигнал, в результаті чого в поверхневому шарі об'єкта контролю індуктуються вихрові струми. Взаємодія первинного і наведеного струмів призводить до появи тисків, що змінюються з ультразвуковою частотою. Ультразвукові коливання, в свою чергу, створюють в металі просторово-періодичне поле, під впливом якого частки середовища роблять коливання. При перетині хитаються частинками силових ліній магнітного поля, в поверхневому шарі металу виникають вихрові струми, які реєструються за допомогою приймальної частини системи неруйнівного контролю під впливом якого частки середовища роблять коливання. При перетині хитаються частинками силових ліній магнітного поля в поверхневому шарі металу виникають вихрові струми, які реєструються за допомогою приймальної частини системи неруйнівного контролю під впливом якого частки середовища роблять коливання. При перетині хитаються частинками силових ліній магнітного поля, в поверхневому

шарі металу виникають вихрові струми, які реєструються за допомогою приймальної частини системи неруйнівного контролю.

Конструкція запропонованого ЕМА перетворювача пояснюється рис.4.1.11. До певних недоліків запропонованої конструкції слід віднести її відносну громіздкість. Габарити датчика можуть бути істотно зменшені шляхом використання високих частот випромінювання.

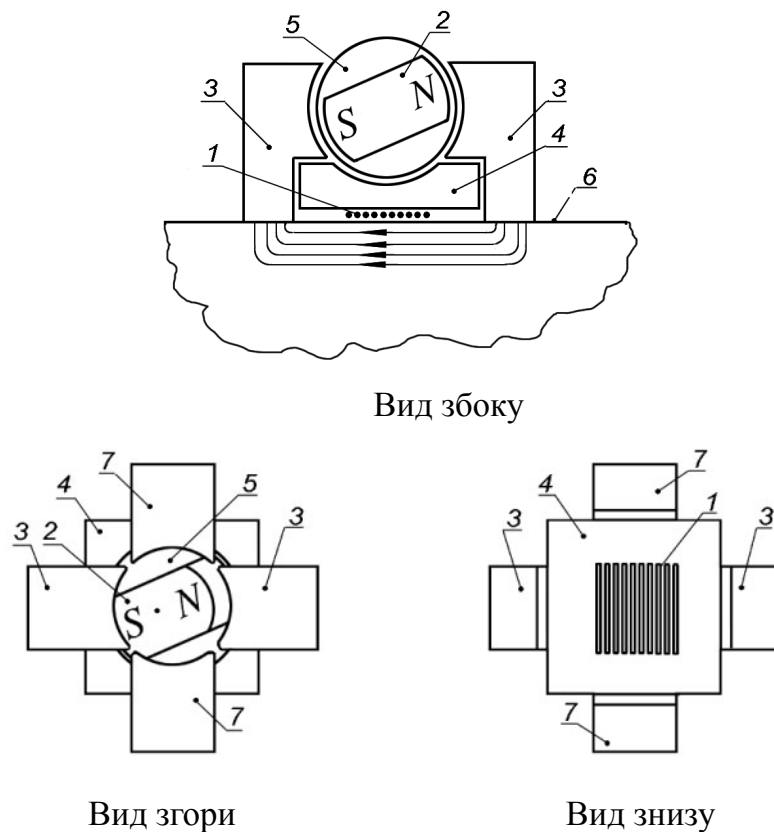


Рис. 4.1.11. Конструкція ЕМА датчика для контролю якості формування підмуфтового шару:

1 – випромінювач, 2 – магніт, 3 – магнітowodи, 4 – кріпильна вставка, 5 – куля, 6 – муфта, 7 – додаткові магнітowodи

Не дивлячись на явні переваги розробленої конструкції, вона є досить складною для практичного виготовлення та використання при проведенні експериментальних досліджень. У зв'язку з цим в основу побудови ЕМА датчика макета буде покладена схема (а) рис. 4.1.10, що відрізняється простотою конструкції.

В якості випромінювача застосована гребінчата схема побудови, нитки якої виготовлені, що виключає виникнення інтерференційних ефектів в порушуємо хвилі, шляхом фотодруку.

Конструкція ЕМА датчика діючого макету показана на рис. 4.1.12. Магнітотвори датчика виготовлені з феромагнітної сталі. Для формування магнітного поля використані потужні неодимові магніти (неодим-залізо-бор NdFeB) [3,57].

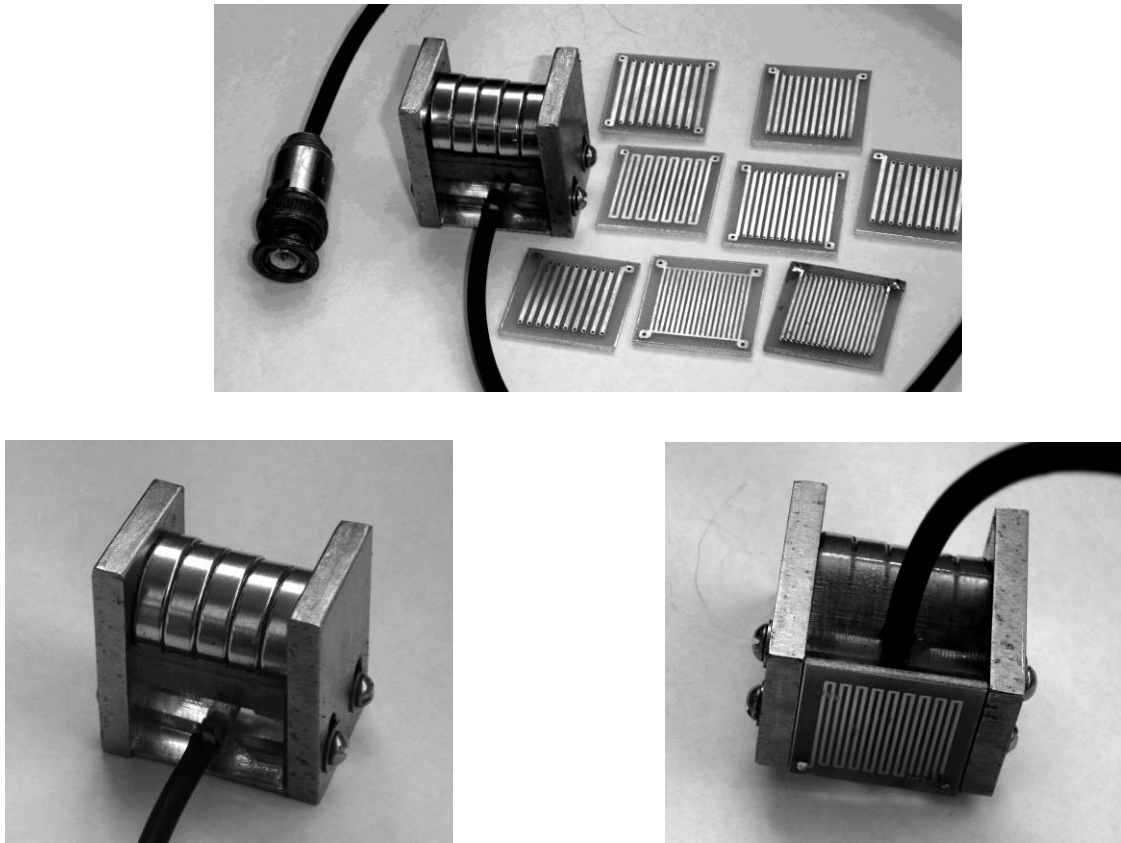


Рис. 4.1.12. Конструкція ЕМА датчика діючого макету

При проведенні експериментальних досліджень планується здійснювати управління ЕМА-датчиком і проводити реєстрацію і аналіз одержуваного з нього сигналу за допомогою ультразвукового дефектоскопа УД-4Т. Пристрій для формування зондувальних імпульсів в даному дефектоскопі не розрахований на збудження датчиків такого виду, у зв'язку з чим виникає задача розробки і виготовлення спеціалізованого формувача імпульсів зондування, синхронізуються від дефектоскопа УД-4Т.

Аналіз відомих схем збудження ЕМА датчиків з гребінчастим нитками-випромінювачами показав, що найбільш перспективним можна вважати застосування DDS (Direct Digital Synthesizers) – цифрові синтезатори частот, керованих мікроконтролером. Дані синтезатори серійно випускаються

декількома фірмами, проте, безсумнівним лідером на ринку є компанія Analog Devices. Параметри, що випускаються даною компанією синтезаторів, дозволяють побудувати ефективні формувачі імпульсів зондування практично будь-якої форми. Наприклад, при частоті тактового генератора 125 МГц (для AD9850) на виході мікросхеми можна сформувати гармонійний сигнал від 0 до 62,5 МГц з кроком близько 0,03 Гц.

Незважаючи на явні переваги синтезатори DDS мають ряд недоліків, що обмежують їх застосування в схемах формування зондувальних імпульсів. Перш за все, це наявність побічних сигналів, рівень яких залежить від тактової й вихідних частот (і їх співвідношення), і в смузі 0–100 МГц може мати значення -50 ... -80 дБ. При вихідній частоті більше 1/3 від частоти тактового генератора їх рівень різко збільшується. Крім того, в даний час, має місце тривалий термін поставки поставки синтезаторів AD9959 на Україну офіційними дилерами. Синтезатори припускають наявність спеціалізованих програматорів, що ускладнює їх практичне використання і швидке впровадження. З проблемами придбання і програмування синтезатора зіткнувся і автор даної роботи при виготовленні макета для проведення експериментальних досліджень можливості організації ЕМА контролю якості формування підмуфтового простору. У зв'язку з чим, виникла практична необхідність в розробці способу формування колоколообразних імпульсів і власне самого формувача.

Розроблений спосіб [87, 111, 165] заснований на симетричності елементів колоколоподібного сигналу в межах періоду щодо осей абсцис і ординат. Маючи інформацію про зміну сигналу в межах  $\left[0 \dots \frac{\pi}{2}\right]$ , можна отримати його зміну в межах  $\left[\frac{\pi}{2} \dots \pi\right]$  (відобразивши його щодо осі ординат), а також в межах  $\left[\pi \dots \frac{3}{2}\pi\right]$  і  $\left[\frac{3}{2}\pi \dots 2\pi\right]$  (при відображенні сигналу за напівперіоду щодо осі абсцис).

Спосіб здійснюють наступним чином [166]. На початковому етапі формують послідовність імпульсів, наступних з частотою:

$$f_{II} = \frac{4 \cdot (N-1)}{T_3}, \quad (4.1.20)$$

Імпульси подають на лічильник. При виконанні умови (3.5.2), лічильник в активному режимі буде повністю заповнюватися за час, що дорівнює чверті періоду імпульсу зондування. При цьому значення числа, записаного в лічильнику, постійно перетворюють в аналоговий сигнал (зокрема струм) відповідно до залежності:

$$I(i) = I_m \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{i}{N} \right) \right), \quad (4.1.21)$$

де  $I_m$  – амплітудне значення аналогового сигналу на вході випромінювача ЕМА перетворювача,  $i$  – число, записане в лічильнику.

Цикл формування імпульсів зондування починають з обнулення лічильника. У міру надходження імпульсів до повного заповнення всіх розрядів лічильника, що відповідає зміні імпульсу зондування в межах  $\left[ 0 \dots \frac{\pi}{2} \right]$ , аналоговий сигнал формують відповідно до залежності:

$$I_I(i) = I(i), \quad (4.1.22)$$

далі, після заповнення лічильника, його переводять в реверсивний режим, в результаті чого число, записане в лічильнику, починає зменшуватися від максимального до мінімального значення, що відповідає зміні імпульсу зондування в межах  $\left[ \frac{\pi}{2} \dots \pi \right]$ . Після обнулення лічильника, його знову переводять в режим прямого підрахунку імпульсів. Процес заповнення лічильника на даному етапі відповідає зміні імпульсу зондування в межах  $\left[ \pi \dots \frac{3}{2}\pi \right]$ . Аналоговий сигнал на другому та третьому етапах формують відповідно до залежностями:

$$I_{II}(i) = 2 \cdot I_m - I(i), \quad (4.1.23)$$

$$I_{III}(i) = 2 \cdot I_m - I(i). \quad (4.1.24)$$

На четвертому етапі, відповідному зміні імпульсу зондування в межах  $\left[ \frac{3}{2}\pi \dots 2\pi \right]$ , лічильник знову переводять в реверсивний режим, і, до обнулення, формують аналоговий сигнал відповідно до залежності:

$$I_{IV}(i) = I(i). \quad (4.1.25)$$

При необхідності формування послідовності імпульсів зондування цикли повторюють необхідне число раз.



Спосіб пояснюється циклограмою, наведеної на рис. 4.1.13.

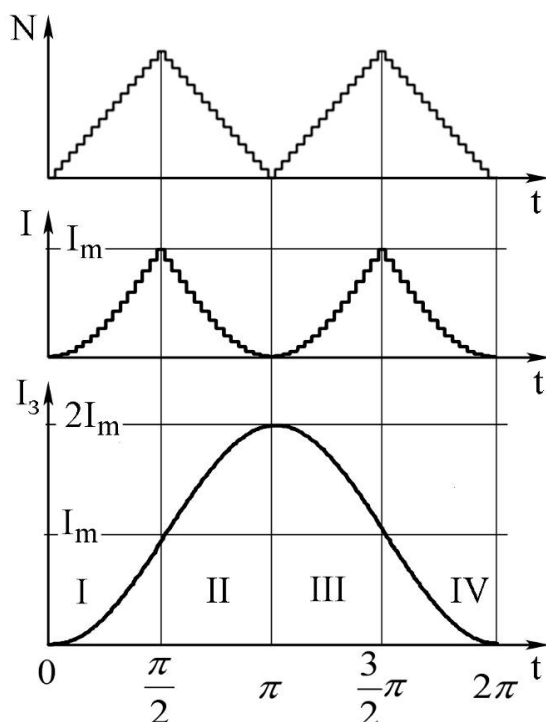


Рис. 4.1.13. Циклограмма формування імпульсу зондування

де:  $i$  – число, записане в лічильнику;  $I(i)$  – функція перетворення числа  $i$  в аналоговий сигнал;  $I_3(i)$  – аналоговий сигнал на вході випромінювача ЕМА перетворювача (імпульс зондування), I, II, III, IV – етапи формування аналогового сигналу.

Робота формувача імпульсів зондування для ЕМА перетворювача, що здійснює запропонований спосіб, проілюстрована на рис.4.1.14 і рис.4.1.15.

Робота формувача імпульсів зондування для ЕМА перетворювача полягає в наступному. За допомогою пристрою управління 5 на вхід  $R_0$  реверсивного лічильника 2 подають імпульс скидання, за яким лічильник 2 обнуляється. Від генератора 1 на рахунковий вхід  $C$  реверсивного лічильника 2 надходять імпульси, що впливають із частотою, яка визначається виразом (5). На першому виході дешифратора 3, відповідного нульового числа на виходах лічильника 2 формується логічний сигнал, що надходить на вхід  $R$   $R-S$ -тригер 6 і переводить сигнал на його прямому вихід  $i$ , відповідно на вході  $A$  лічильника 2 в стан, що дозволяє прямий підрахунок імпульсів. По мірі збільшення числа, записаного в лічильнику 2, змінюються активні виходи дешифратора 3, а на виході схеми масштабування 8 з'являється сигнал відповідно до залежності:

$$U_8(i) = U_m \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{i}{N} \right) \right), \quad (4.1.26)$$

де  $U_m$  – амплітудне значення напруги на виході схеми масштабування 8,  $i$  – число, записане в лічильнику 2.

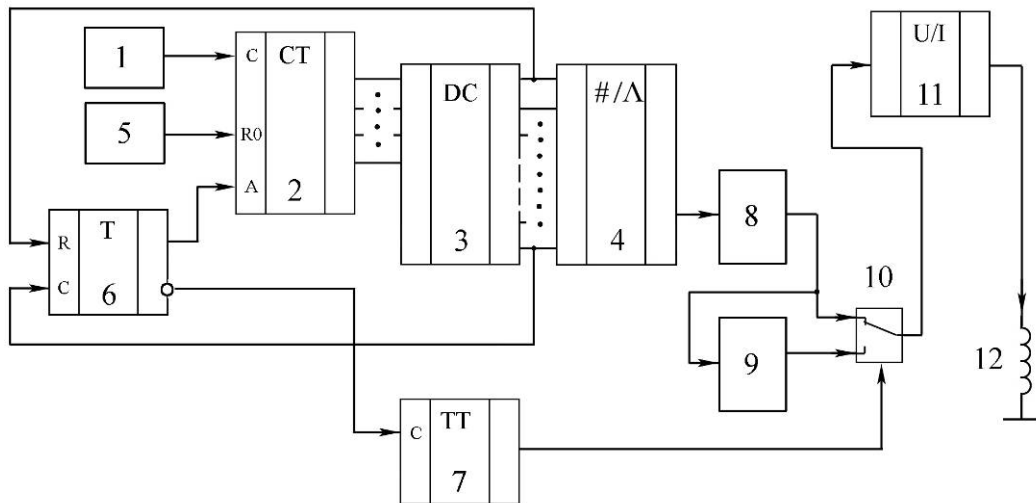


Рис. 4.1.14. Функціональна схема формувача

1 – генератор імпульсів, 2 – реверсивний лічильник, 3 – дешифратор, 4 – функціональний цифровий перетворювач, 5 – пристрій управління, 6 –  $R-S$ -тригер, 7 – рахунковий  $T$ -тригер, 8 – схема масштабування, 9 – додаткова схема масштабування, 10 – аналоговий комутатор, 11 – перетворювач напруга-струм, 12 – випромінювач ЕМА перетворювача

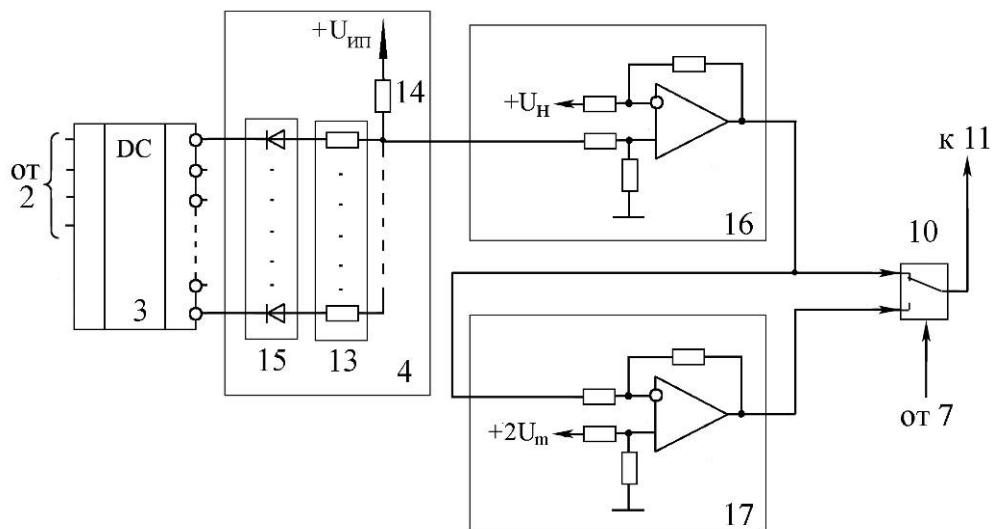


Рис. 4.1.15. Функціональна схема варіанту виконання функціонального цифрового перетворювача і схем масштабування

13 – резистори матриці, 14 – додатковий резистор, 15 – діоди, 16 – диференціальний підсилювач, що представляє схему масштабування, 17 – диференціальний підсилювач, що представляє додаткову схему масштабування

Під час першого прямого заповнення лічильника 2 сигнал на виході рахункового  $T$  – тригера 7 утримує перемикач аналогового комутатора 10 у верхньому по схемі (рис. 4.1.14) положенні. Отже, на вході перетворювача напруга-струм 11 буде формуватися сигнал, зміна якого описуватися залежністю (4.1.20). Відповідно, зміна струму на його виході буде визначатися залежністю (7).

Після заповнення лічильника 2 активізується вихід дешифратора 3, який відповідає максимальному числу  $N$ . Логічний сигнал з цього виходу надходить на вхід  $R-S$  – тригер 6 і переводить сигнал на його прямому виході  $i$ , відповідно на вході А лічильника 2 в стан, що дозволяє зворотний підрахунок імпульсів. Зрозуміло з цим, рахунковий  $T$ - тригер 7, що працює по фронту вхідного сигналу, переводить перемикач аналогового комутатора 10 в нижнє за схемою (рис. 4.1.14) становище. Додаткова схема масштабування 9 налаштована таким чином, щоб напруга на її виході визначалося залежністю:

$$U_9(i) = 2 \cdot U_m - U_8(i). \quad (4.1.27)$$

Отже, напруга на вході перетворювача напруга-струм 11 на даному етапі формування буде визначатися виразом (4.1.27), а струм на його виході – виразом (4.1.23). Після обнулення лічильника, за сигналом, що йде з дешифратора 3,  $R-S$ - тригер 6 знову змінює напрямок рахунку, однак зміна його стану не призводить до зміни стану на виході працюючого по фронту вхідного сигналу рахункового  $T$  – тригера 7. В результаті цього, перемикач аналогового комутатора залишається в нижньому за схемою (рис. 4.1.14) положенні, а струм на виході перетворювача напруга-струм 11 визначається залежністю (4.1.24).

Після заповнення лічильника 2 і чергової зміни напрямку рахунку, рахунковий  $T$  – тригера 7 змінить стан на свій вихід, перевівши перемикач аналогового комутатора 11 у верхнє за схемою (рис. 4.1.14) становище, в результаті чого, струм на виході перетворювача напруга-струм 11 на останньому етапі формування імпульсу зондування, почне визначатися виразом (4.1.25).

Для зниження «ступінчастості» формованого сигналу, додатково використовують смуговий фільтр, який включають після схеми масштабування або після аналогового комутатора.

Функціональний цифро-аналоговий перетворювач 4 може бути побудований на основі резисторной матриці (рис. 4.1.15). В цьому випадку в

схемі використовують дешифратор з інверсними виходами, підключеними через діоди до входів відповідних резисторів матриці. Об'єднані виходи резисторної матриці з'єднані через додатковий резистор з джерелом позитивної напруги, при цьому діоди з резисторами матриці з'єднані анодами. Опору резисторів матриці вибирають з умови  $\frac{R_k}{R_d} = \frac{U_d - U_H - \zeta(k)}{\zeta(k) + U_H - U_{ин}}$ , де  $R_d$  – опір додаткового резистора,  $U_d$  – пряме падіння напруги на внутрішніх вихідних ланцюгах активного виходу дешифратора і діод,  $U_H$  – мінімальна напруга на виходах резисторної матриці,  $U_{ин}$  – напруга на виході джерела позитивної напруги,  $\zeta(k) = U_m \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k}{N} \right) \right)$ , де  $k = i$  – номер резистора матриці, підключеного до виходу дешифратора, відповідному числу  $i$  на виходах реверсивного лічильника,  $U_m$  – максимальне значення напруги на виходах резисторної матриці.

Напруга на виході функціонального аналого-цифрового перетворювача в цьому випадку, змінюється за рахунок того, що до загального проведення в конкретний момент часу виявляється підключений тільки один резистор матриці 13. Діоди 15 необхідні для зниження впливу на вихідну напругу сигналів високого логічного рівня, які присутні на неактивних виходах дешифратора. Очевидно, що в цьому випадку, напруга на об'єднаних виходах резисторів матриці 13, не може бути нижче деякого мінімального значення, що визначається падінням напруги на відкритих  $p-n$  – переходах вихідних ланцюгів дешифратора 3 і діода 15. Даний початковий рівень,  $U_H$  може бути легко врахований в схемі масштабування 8. Для цього, схеми масштабування можуть являти собою диференціальні підсилювачі 16 і 17.

Розроблений спосіб формування колоколообразних імпульсів зондування був покладений в основу виготовленого для проведення експериментальних досліджень діючого макету формувача, функціональна схема якого представлена на рис. 4.1.18.

При проектуванні діючого макету ЕМА пристрої, передбачені питання його синхронізації від ультразвукового дефектоскопа УД-4Т, питання комутації датчика і попереднього посилення знімається з ЕМА датчика сигналу.

Зовнішній вигляд монтажної плати формувача з встановленими елементами і конструкція макета показані на рис. 4.1.16 і рис. 4.1.17.



Рис. 4.1.16. Зовнішній вигляд монтажної плати формувача

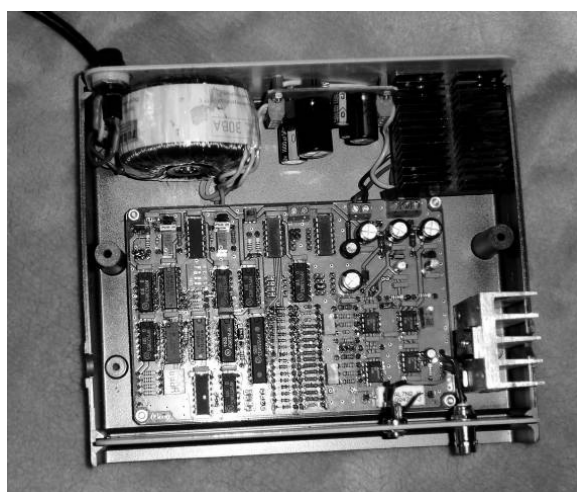
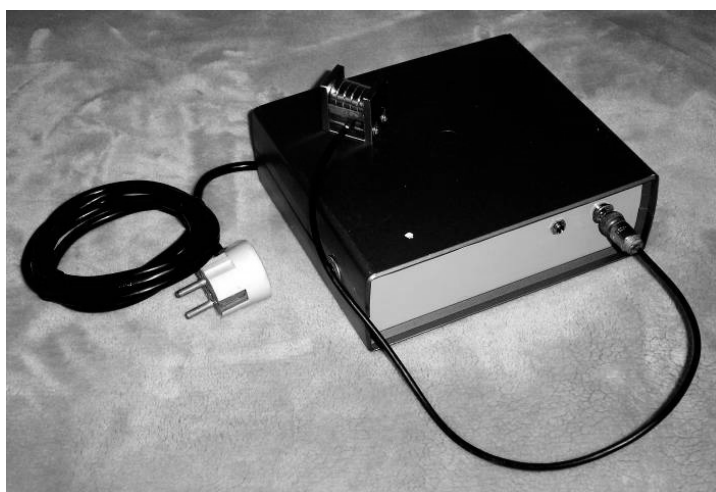


Рис. 4.1.17. Конструкція формувача імпульсів зондування макета

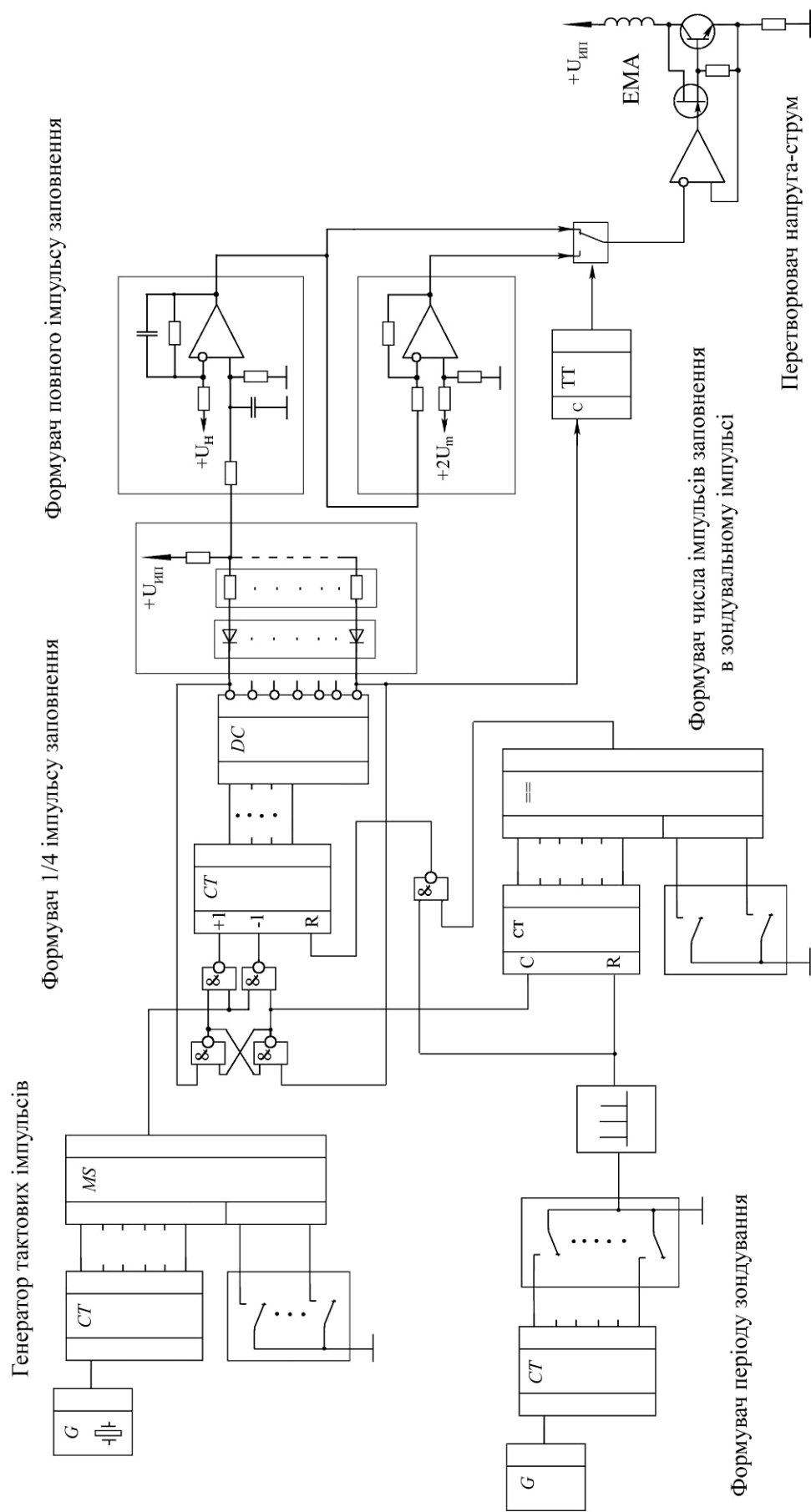
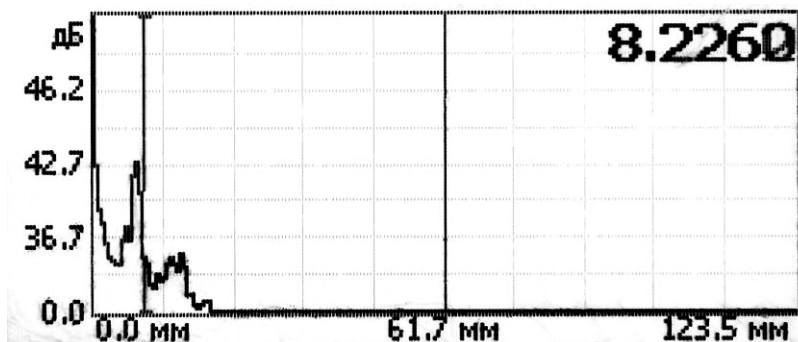
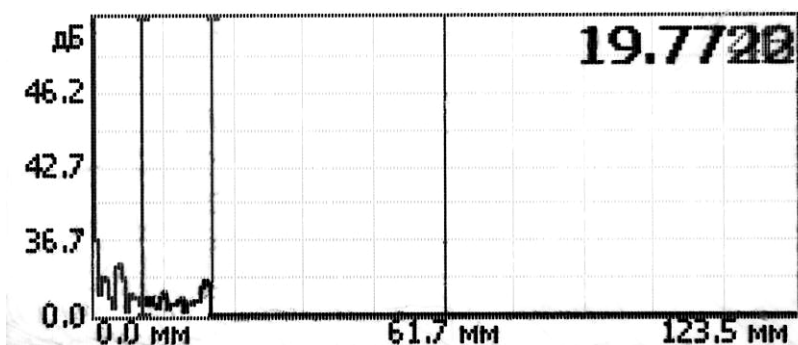


Рис. 4.1.18. Функціональна схема формувача імпульсів зондування макета

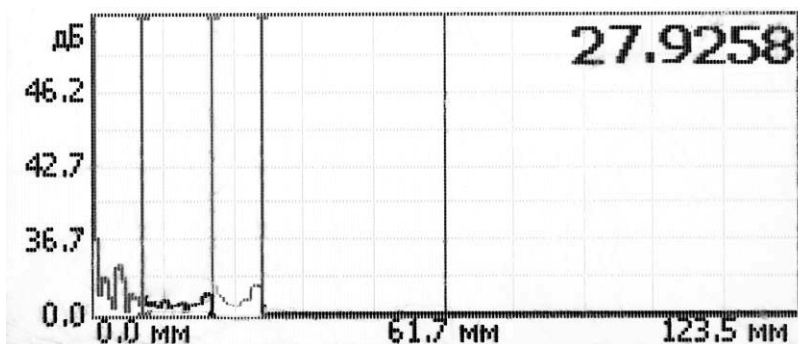
Вимірювання проводились після перекладу дефектоскопа в режим «Товщиномір». Результати вимірювань проілюстровані на рис. 4.1.19.



Варіант (а) – відсутність заповнення підмуфтового простору



Варіант (в) – олово ,наплавлено на внутрішню поверхню муфти,  
контакт з посилюваною трубою відсутній



Варіант (г) – олово заповнило підмуфтовий простір,  
хороший акустичний контакт з трубою і муфтою

Рис. 4.1.19. Фотографії екрану дефектоскопа в режимі «Товщиномір»  
при заповненні підмуфтового простору оловом

Проведені експериментальні дослідження підтвердили попередні теоретичні висновки про можливість використання ЕМА методу для контролю якості заповнення підмуфтового простору оловом.

#### ***4.1.5. Розробка способу контролю якості заповнення підмуфтового простору муфт з діамантного матеріалу за допомогою магнітного методу неруйнівного контролю***

Основним недоліком розробленого в пункті 4.1.1 способу контролю процесу підмуфтового простору є те, що він не є неруйнівним. Для його здійснення потрібна наявність отворів в поверхні ремонтної муфти. Спосіб, зручний на муфтах, які передбачають центрування за допомогою болтів (муфтах Брітішгаз [138], РАО ГАЗПРОМ, офіційно не допущених до використання на магістральних трубопроводах України). Разом з тим, спосіб непридатний на муфтах, що встановлюються на технологічних кільцях.

Практичний інтерес представляє неруйнівний спосіб отримання інформації про наявність та стан самотвердіючої маси в заданих точках підмуфтового простору (рис. 4.1.20). Розглянутий в пункті 4.1.2 ультразвуковий спосіб контролю якості формування підмуфтового шару застосовуємо на металевих муфтах. У той же час для ремонту металевих і неметалевих трубопроводів широко використовуються муфти на основі склопластику або вуглепластика, які так само можуть заповнюватися під тиском самотвердіючого компаунда. Ультразвуковий контроль таких подібних муфт пов'язаний з певними труднощами, зумовленими специфічними особливостями поширення ультразвукової хвилі в багатошарових неізотропних конструкціях.

Для цілей контролю розподілу самотвердіючої речовини в під муфтовому просторі подібних муфт може бути використаний магнітний метод неруйнівного контролю, заснований на вимірюванні магнітного опору кола, що включає стінку труби, муфти і підмуфтового простору в заданій точці [159]. Для реалізації запропонованого способу і заповнення підмуфтовго простору використовують самотвердіючу речовину, що володіє магнітними властивостями. Для додавання самотвердіючої речовини магнітних властивостей, в нього завчасно вводять дрібнодисперсні фракції магнітних матеріалів (ферромагнетиків: фериту, магнетиту, і т. д.), які стабілізують за допомогою поверхнево-активних речовин або полімерів.



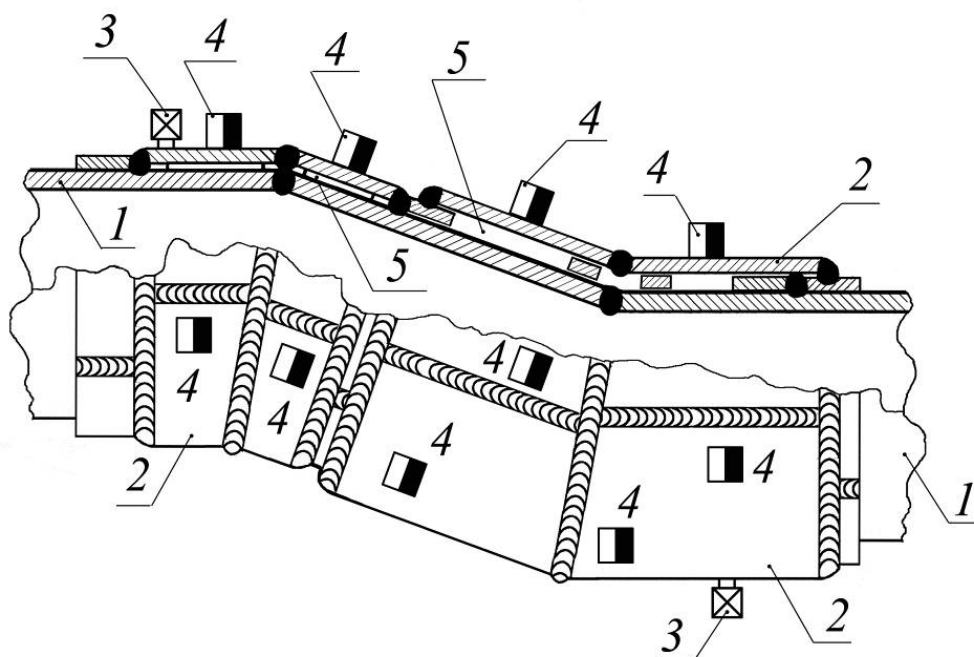


Рис. 4.1.20. Встановлення датчиків неруйнівного контролю на поверхні муфти складної форми:

1 – трубопровід, 2 – складова муфта, 3 – штуцери для запресування самотвердіючої речовини, 4 – датчики неруйнівного контролю, 5 – підмуфтовий простір

На зовнішній стороні поверхні, в цікавих місцях встановленої на трубопровід муфти, розміщують П-подібні магніти (рис. 4.1.21). Після цього підмуфтовий простір починають заповнювати самотвердіючою речовиною, що володіє магнітними властивостями. Зрозуміло з заповненням, прямим або непрямым чином вимірюють значення магнітного опору ланцюгів проходження магнітних ліній між полюсами встановлених магнітів. У разі появи самотвердіючої речовини в районі цікавого магнітного датчика (П-образного магніту), магнітний опір ланцюга, по якій замикаються магнітні лінії, зменшиться.

Очевидно, що можливість практичного застосування даного методу буде визначатися чутливістю вимірювальної апаратури, що дозволяє виявити зміни магнітного опору кола.

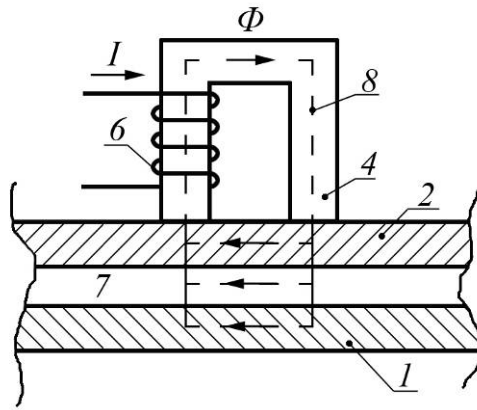


Рис. 4.1.21. Конструкція магнітного датчика, встановленого на муфту  
 1 – трубопровід, 2 – муфта, 4 – магнітний датчик (П-подібний магніт або сердечник магніту), 6 – котушка підмагнічування (в разі використання електромагніту), 7 – підмуфтовий простір з самотвердіючою масою, 8 – середня магнітна лінія

Інформація про поточний магнітному опорі ланцюга, спрощена еквівалентна схема заміщення якої показана на рис. 4.1.22, може бути отримана різними способами. Наприклад, шляхом вимірювання магнітного потоку в осереді магніту, шляхом вимірювання індуктивності котушки підмагнічування у разі використання електромагніта або шляхом вимірювання сили тяжіння магніту до поверхні муфти.

У разі використання в якості магнітного датчика електромагніту МДС визначається виразом [180]

$$F = w \cdot I, \quad (4.1.28)$$

де  $w$  – число витків котушки підмагнічування,  $I$  – сила струму в котушці підмагнічування.

Закон Ома для магнітного кола, зображеного на рис. 4.1.22, може бути записаний у вигляді [180]:

$$\Phi = F / R_{MG}, \quad (4.1.29)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік,  $R_{MG}$  – магнітний опір ланцюга.

У свою чергу, магнітне опір деякого  $i$ -ого однорідної ділянки магнітного ланцюга  $R_{MGi}$  визначається виразом [180]:

$$R_{MFi} = \frac{l_i}{\mu_0 \cdot \mu_i \cdot S_i}, \quad (4.1.3)$$

0)

де  $l_i$  і  $S_i$  - довжина і поперечний переріз однорідної ділянки магнітного ланцюга  $\mu_i$  - відносна магнітна проникність однорідного ділянки магнітного ланцюга,  $\mu_0$  - магнітна постійна.

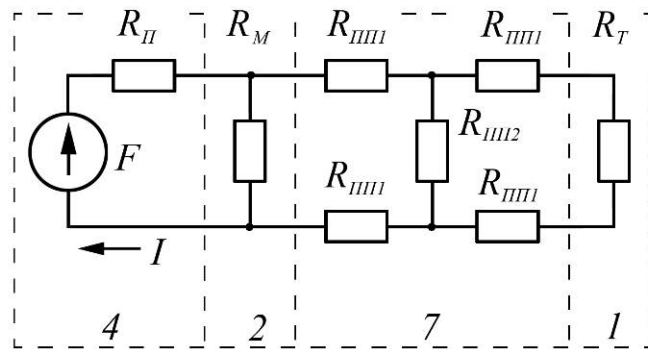


Рис. 4.1.22. Спрощена еквівалентна схема заміщення магнітного кола

Датчик – муфта – підмуфтовий шар-труба:

1 – трубопровід, 2 – муфта, 4 – магнітний датчик, 7 – підмуфтовий простір,

$R_{II}$  – магнітний опір сердечника магніту уздовж середньої магнітної лінії,

$R_M$  – магнітний опір ділянки муфти між полюсами магніту,  $2 \cdot R_{III1}$  – магнітний опір ділянки підмуфтового простору в перпендикулярному трубі напрямку,

$R_{III2}$  – магнітний опір ділянки підмуфтового простору між полюсами магніту

в напрямку, паралельному трубі,  $R_T$  – магнітне опір ділянки трубопроводу вздовж магнітної лінії,  $F$  – магнітно рушійна сила (МДС), що визначається характеристиками магніту

Під час заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною, що володіє високою, у порівнянні що витісняється повітрям, магнітною проникністю, зменшуються магнітні опору  $R_{III1}$  і  $R_{III2}$ , що призводить до зменшення загального магнітного опору всієї магнітної ланцюга і збільшення магнітного потоку в осерді магніту. Отже, з'являється можливість шляхом вимірювання магнітного поля в осереді магніту контролювати процес заповнення підмуфтового простору самотвердіючою масою.

Під час заповнення підмуфтового простору самотвердіючою речовиною, що володіє високою, у порівнянні що витісняється повітрям, магнітною проникністю, зменшується магнітний опір ,що знаходиться під індукційним

датчиком ділянки підмуфтового простору, що призводить до шунтування магнітних опорів сполучених з ним ділянок муфти і труби, що, в свою чергу, призводить до зменшення загального магнітного опору магнітного ланцюга і збільшення індуктивності котушки електромагніту. Таким чином, контроль процесу заповнення підмуфтового простору може здійснюватися шляхом вимірювання індуктивності котушок електромагнітів, яка, в свою чергу, може проводитися будь-якими відомими способами.

Контроль процесу заповнення підмуфтового простору самотвердіючою масою магнітним методом можливий і шляхом вимірювання сили тяжіння магніту до поверхні муфти. Сила тяжіння магніту залежить, крім інших параметрів, і від магнітного опору кола проходження магнітних ліній між полюсами встановлених магнітів яке, в свою чергу, залежить від магнітної проникності підмуфтового простору в точці вимірювання. Для вимірювання сили тяжіння магнітів до поверхні муфти використовують датчики сили стиснення, які мають у своєму розпорядженні між магнітами і поверхнею муфти. Крім того, силу тяжіння магнітів до поверхні муфти можуть оцінювати по силі відриву магнітів від даної поверхні в нормальному до неї напрямку.

Практичне використання запропонованого підходу вимагає проведення додаткових досліджень.

#### ***4.1.6. Розробка способу контролю герметичності під муфтового простору***

У попередньому розділі була показана необхідність забезпечення повної герметичності підмуфтового простору протягом усього часу формування підмуфтового шару. Як зазначалося раніше, відомі способи контролю якості встановлення муфт не забезпечується надійний контроль якості їх встановлення. При заповненні підмуфтового простору самотвердіючою речовиною в умовах відсутності його герметичності виникають складнощі створення необхідного тиску. Відсутність необхідного тиску в підмуфтовому просторі робить всю ремонтну конструкцію неробочою. Найчастіше, течі самотвердіючої речовини з'являються при середніх і високих величинах тиску запресування через щілини, що не виявляються в процесі неруйнівного контролю, проведеного відразу після встановлення муфти.

На фотографіях (рис. 4.1.23 і рис. 4.1.24) показані випадки течі самотвердіючої маси через тріщини в зварних швах, не виявлені після їх ретельного рентгенологічного контролю.



*Рис. 4.1.23*



*Рис. 4.1.24*

Течі самотвердіючої речовини по зварних швах муфти

Для усунення дефекту потрібне проведення механічних та вогневих робіт, що пов'язано, з урахуванням виходу самотвердіючої маси, з серйозними труднощами і не гарантують формування якісних зварних швів. Крім того, перерви в запрессовке самотвердіючої маси можуть привести до нерівномірності заповнення підмуфтового простору або неможливості подальшого його заповнення.

Крім того, існуючі методи встановлення муфт допускають нерівномірну адгезію самотвердіючої речовини до різних ділянок внутрішньої поверхні муфти. Це викликано їх забрудненням в процесі встановлення елементів муфти на трубопровід. Після встановлення муфти, підмуфтовий простір не піддається додатковій обробці. При цьому для клейових муфт висока адгезія самотвердіючої речовини до труби і муфти, на відміну від муфт, приварюється до тіла труби, і має велике значення, так як за рахунок неї відбувається компенсація поздовжніх напружень. Крім того, в реальних умовах встановлення муфт зазвичай має місце підвищена витрата самотвердіючої маси через складність в точному визначенні

обсягу підмуфтового простору при ремонті ділянок, уражених глибокої корозією або мають геометричні деформації (гофр, вм'ятини і ін.).

Найбільш простим, але ефективним методом контролю герметичності підмуфтового простору є його гідравлічні випробування, суміщені з обробкою зв'язаних поверхонь труби і муфти.

Для реалізації запропонованого способу контролю герметичності підмуфтового простору [84], після закінчення повного складання ремонтної конструкції, підмуфтовий простір заповнюють рідиною, яка містить адгезив. Тиск рідини підвищують до розрахункового тиску, в загальному випадку, до тиску, з яким в подальшому буде запресовуватися самотвердіюча речовина. Після цього, протягом деякого розрахункового часу, зі зміни показань манометрів, встановлених на різних ділянках ремонтної конструкції, оцінюють герметичність муфти. У разі якщо муфта виявляється не герметичною, дефектні місця визначають по виходу рідини на поверхню. Далі проводять ремонт муфти, після чого повторюють гідравлічні випробування. Після того, як гідравлічні випробування показали герметичність ремонтної конструкції, рідину зливають, точно оцінюючи обсяг підмуфтового простору. Це дозволить оптимізувати витрати самотвердіючої маси, приготувавши її в необхідному обсязі.

Для прискореного зливу рідини, використовуваної для гідравлічних випробувань, може бути застосоване стиснене повітря, яке подають через штуцер, встановлений у верхній частині муфти, а рідину зливають через штуцер, встановлений в нижній частині муфти. Після зливу рідини, використовуваної для гідравлічних випробувань, підмуфтовий простір продувають розігрітим повітрям. При цьому за допомогою газоаналізатора контролюють вихід потік повітря. Продувку завершують після зниження в вихідному повітрі концентрації парів рідини до певного рівня. Після продувки підмуфтовий простір під потрібним тиском заповнюють самотвердіючою речовиною.

Гідравлічні випробування можуть проводитися в кілька етапів. На першому етапі, підмуфтовий простір промивають знежирюючим складом (наприклад, етилацетат). На другому – складом, що містить адгезив (наприклад, десяти процентним водним розчином ортофосфорної кислоти). На останньому етапі підмуфтовий простір заповнюють складом, який нейтралізує залишки адгезиву (наприклад, етилацетат) і з яким проводять гідравлічні випробування.

Для полегшення пошуку дефектних місць для гідравлічних випробувань використовують рідину, що має спеціальні властивості. Наприклад, в рідину може бути доданий холодоагент. В цьому випадку, виток рідини визначають шляхом вимірювання температурного градієнта по зовнішній поверхні муфти. У рідину для гідравлічних випробувань може бути доданий дрібнофракційний барвник, наприклад, флуарісціюючий. В цьому випадку, виток визначають шляхом опромінення зовнішніх частин муфти ультрафіолетовим випромінюванням. Виток можуть бути визначений і хімічним способом з використанням природних властивостей рідини, що застосовується для гідравлічних випробувань. Для цього на зовнішню сторону муфти наносять індикатор, що змінює свої властивості (наприклад, колір) при взаємодії з застосовуваною для гідравлічних випробувань рідиною.

Розроблений спосіб [84] пояснюється рис. 4.1.25.

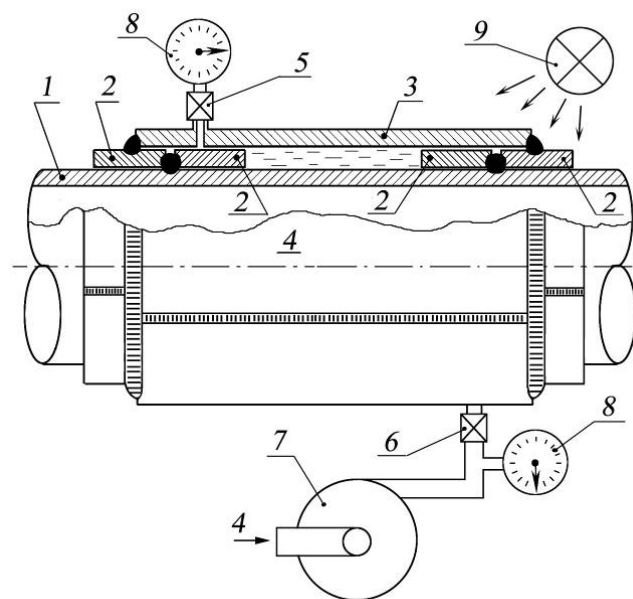


Рис. 4.1.25. Гідравлічні випробування підмуфтового простору:

1 – трубопровід, 2 – технологічні кільця, 3 – муфта, 4 – рідина з адгезивом, 5 – верхній кран, 6 – нижній кран, 7 – нагнітач, 8 – манометри, 9 – УФ-випромінювач

Таким чином в роботі показан розроблений спосіб контролю герметичності підмуфтового простору шляхом проведення гідравлічних випробувань, суміщених з етапом обробки попередньої внутрішньої поверхні муфт адгезивом. Також розглянуто питання виявлення витоків в разі розгерметизації підмуфтового простору.

Новизна запропонованого способу контролю герметичності підмуфтового простору, поєднаного з обробкою поверхні труби і муфти, підтверджена патентом України на винахід [84], виданим після проведення кваліфікаційної експертизи, що включає і експертизу на світову новизну.

Запропонований спосіб включений в якості обов'язкового елемента загальної технології встановлення ремонтних муфт на газопроводах України [24].

## **4.2. Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім наповненням**

### ***4.2.1. Підвищення ефективності муфтового посилення трубопроводу шляхом зменшення глибини підмуфтового простору***

У розділі 2 показано, що ефективність посилення трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім наповненням підвищується, при інших рівних умовах, зі зменшенням товщини підмуфтового шару і підвищення його модуля пружності. При цьому мінімальна глибина підмуфтового простору обмежена висотою валика зварного шва трубопроводу в межах підсилення ділянки і складає, для труб сучасних магістральних газопроводів високого тиску, 3 мм.

У розділі 3 запропоновані три варіанти конструкцій клеєзварних муфт, що дозволяють підвищити ефективність посилення труби за обраним критерієм за рахунок мінімізації товщини підмуфтового шару (рис. 4.2.1 – 4.2.3).

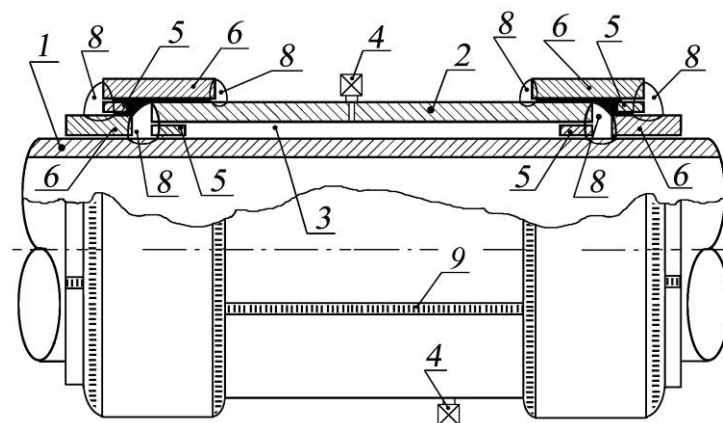


Рис. 4.2.1. Конструкція муфти з малою глибиною підмуфтового простору

і зварюванням торцевого ущільнювача з тілом труби:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – штуцери для заповнення підмуфтового простору, 5 -тонкостінні кільця, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажне кільце, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжній зварний шов



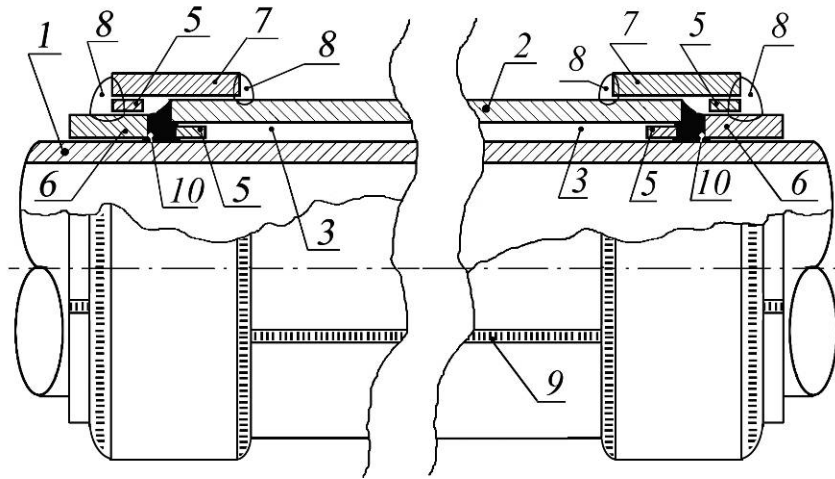


Рис. 4.2.2. Конструкція муфти з малою глибиною підмуфтового простору, монтуємої без зварювання з трубопроводом:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 5 – тонкостінні кільця, 6 – технологічне кільце, 7 – бандажне кільце, 8 – кільцеві зварні шви, 9 – поздовжній зварний шов, 10 – термостійкий герметик

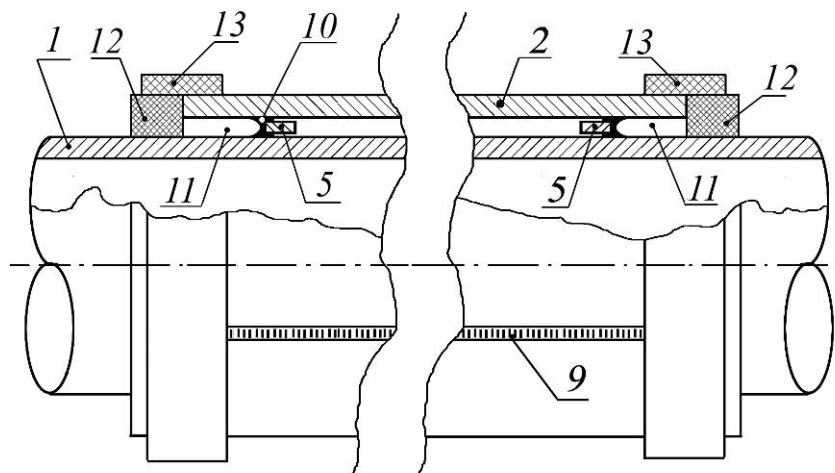


Рис. 4.2.3. Конструкція торцевих ущільнювачів пропонованої муфти, монтуємої без зварювання з трубопроводом:

1 – трубопровід, 2 – оболонка муфти, 3 – підмуфтовий простір, 5 – тонкостінні кільця, 9 – поздовжній зварний шов, 10 – термостійкий герметик, 11 – кільцевий зазор, 12 – манжета, 13 – бандажне композитне кільце

Варіанти посиленого торцевого ущільнювача, жорстко звареного з тілом труби (рис. 4.2.1) і торцевого ущільнювача, що не має зварного з'єднання з трубою (рис. 4.2.2) пройшли натурні випробування і отримали широке поширення при ремонті лінійної частини ГТС України.

#### ***4.2.2. Підвищення ефективності посилення протяжних ділянок трубопроводу шляхом встановлення складових муфт з мінімізованої глибиною підмуфтового простору***

Важливою особливістю запропонованих конструкцій муфт, які забезпечують максимальну ефективність посилення труби за обраним критерієм, є можливість їх використання для підвищення категорійності трубопроводів і їх ділянок.

Умови роботи різних ділянок магістральних газопроводів можуть істотно відрізнятися один від одного (ділянки з наземною, підводною і підземною прокладкою, переходи через яри і водні перешкоди, автомобільні і залізні дороги, ділянки трубопроводів в гірській і пустельній місцевості, переходи через селеві потоки і зсуви райони, ділянки, що проходять через населені пункти і т. д.). У зв'язку з цим, ділянки магістральних трубопроводів, в залежності від пред'явлених до них вимог по надійності, а також міцності і стійкості до зовнішніх механічних і кліматичних впливів, умовно поділяються на п'ять основних категорій, визначених нормативними документами [150]. Кожна категорія характеризується коефіцієнтом умов роботи  $\chi$ , який дорівнює 0,6 для трубопроводів вищої категорії, 0,75 для трубопроводів першої і другої категорії, 0,9 для трубопроводів третьої і четвертої категорії. Коефіцієнт умов роботи повинен враховуватися при розрахунку трубопроводів на міцність, стійкість і деформативність. Зокрема значення, що лежать в основі розрахунків на міцність значення опорів розтягування (стисненню)  $R_1$  і  $R_2$  визначаються за формулами:

$$R_1 = \frac{R_1^* \cdot \chi}{k_{N1} \cdot k_{NN}}, \quad R_2 = \frac{R_2^* \cdot \chi}{k_{N2} \cdot k_{NN}}, \quad (4.2.1)$$

де  $R_1^*$ ,  $R_2^*$  – нормативні значення опорів розтягу (стиску) металу труб і зварних з'єднань, рівні відповідно мінімальних значень тимчасового опору і межі текучості, що приймається за державними стандартами і технічними умовами на труби [30];  $k_{N1}$ ,  $k_{N2}$  – коефіцієнти надійності за матеріалом;  $k_{NN}$  – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу.

Більшість існуючих трубопроводів проектувалися і будувалися кілька десятиліть тому, при цьому категорії конкретних ділянок задавалися з урахуванням пред'явлених до них на момент будівництва вимогам. З плином часу може відбуватися суттєва зміна зовнішніх умов експлуатації трубопроводів

(заболочування місцевості, поява додаткових зсувів, селевих потоків і т. д.). Крім того, досить широкі охоронні зони вздовж магістральних трубопроводів низьких категорій, найчастіше істотно обмежують розвиток інфраструктури сучасних населених пунктів. У зв'язку з цим, для забезпечення безпечної експлуатації трубопровідної системи в нових умовах, а також звуження охоронних зон, постає завдання підвищення категорії окремих ділянок магістральних трубопроводів [80, 155, 161]. В Україні в останні роки гостро постало завдання підвищення категорії ділянок магістральних газопроводів, в місцях їх перетину з знову будуються автомобільними магістралями. Зокрема, проект Великої кільцевої автомобільної дорога навколо Києва передбачає як мінімум 11 місць такого перетину з магістральними газопроводами високого тиску.

Радикальним способом підвищення категорії довільної ділянки магістрального трубопроводу є заміна існуючої труби на трубу, відповідної необхідної категорії, товщину стінки якої вибирають відповідно до формули [150]:

$$\delta_T = \frac{n \cdot P_P \cdot D_T}{2(R_1 + n \cdot P_P)}, \quad (4.2.2)$$

де  $n$  – коефіцієнт надійності по навантаженню.

При однакових умовах роботи і однакових значеннях основних коефіцієнтів, що входять в формули (4.2.1, 4.2.2), товщина стінки є основним параметром, що дозволяє віднести трубопровід до тієї чи іншої категорії [12]. Очевидно, що товщина стінки при заданому тиску в трубопроводі визначає кільцеві механічні напружки, які розраховуються відповідно до [150].

Спосіб, пов'язаний із заміною труби на нову з більшою товщиною стінки, є найбільш поширеним і добре відпрацьованим на практиці. Разом з тим, він є дорогим і вимагає припинення перекачування транспорту на час проведення робіт.

Згідно з тим же нормативним документом [150] категорія ділянки трубопроводу визначається максимально допустимими кільцевими і поздовжніми напруженнями, які, в свою чергу, залежать від опору трубопроводу до розтягування (стисненню). Очевидно, щоб підвищити категорію трубопроводу можна шляхом посилення його стінки за допомогою додаткової твердої оболонки, яка буде приймати на себе частину кільцевих і поздовжніх осьових напружень, розвантажуючи основну трубу.

В цьому випадку муфта повинна забезпечити ступінь зниження окружних напружень, яка визначається за формулою

$$\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{\chi_B}{\chi_H}, \quad (4.2.3)$$

де  $\chi_H$  – коефіцієнт умов роботи ділянки трубопроводу, що підлягає перекладу в більш високу категорію;  $\chi_B$  – коефіцієнт умов роботи ділянки трубопроводу для необхідної категорії.

Наприклад, переклад трубопроводу IV категорії у вищу можливий при установці на ньому муфти, знижує окружні напруження в стінці труби в 1,5 рази  $\left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{T0}} = \frac{0,6}{0,9} \approx 0,67 \right)$ . Теоретична можливість такого посилення обґрунтована в

попередніх главах. Складнощі в перекладі трубопроводів в більш високу категорію визначаються виключно технологічними особливостями виготовлення довгих муфт. Наприклад, при посиленні ділянок перетину магістральних трубопроводів з автомобільними магістралями, довжина муфти може досягати сотень метрів. В цьому випадку, муфта може складатися з декількох розглянутих муфт, встановлених кроковим способом. Торці сусідніх муфт при цьому стикаються на тонкостінних підкладних кільцях і кріпляться між собою за допомогою зварювання (рис. 4.2.4).

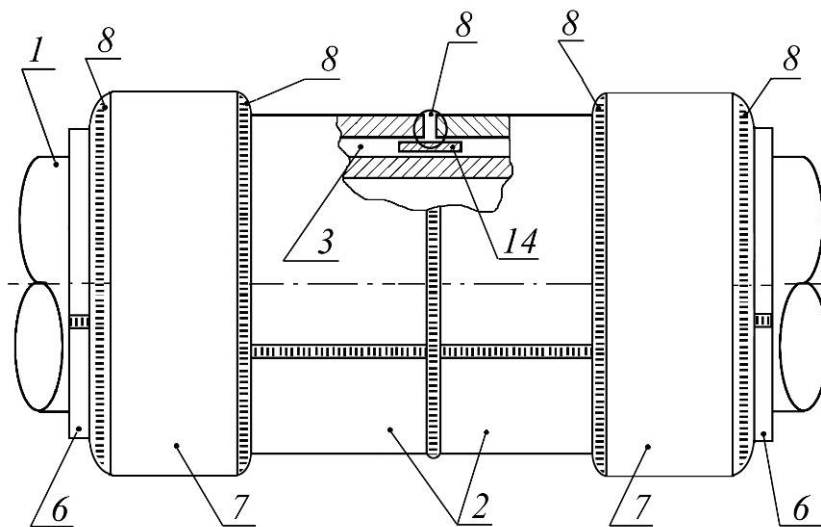


Рис. 4.2.4. Монтаж частин багатосекційної складовою муфти на підкладних кільцях при посиленні протяжних ділянок трубопроводів:

1 – трубопровід, 2 – оболонки муфт, 3 – підмуфтовий шар, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажні кільця, 8 – кільцеві шви, 14 – підкладне кільце

Висоту тонкостінних підкладних кілець 14 вибирають рівну товщині тонкостінних кілець 5 (рис.4.2.4). У деяких випадках виникає необхідність поділу спільного підмуфтового простору на відносно невеликі зони з послідовним заповненням кожної зони самотвердіючою масою. Така необхідність може виникнути, наприклад, при проведенні робіт з підвищення категорії ділянки трубопроводу, що має велику протяжність, при якому трубу послідовно звільняють від ґрунту і після посилення закопують. У таких випадках, муфту складають з декількох встановлених кроковим способом муфт. Внутрішні торці кожної з муфт 2 встановлюють на відповідному тонкостінному кільці 5, попередньо змонтованому на трубопроводі, з зазором до сполученого внутрішнього торця сусідній муфти 2.

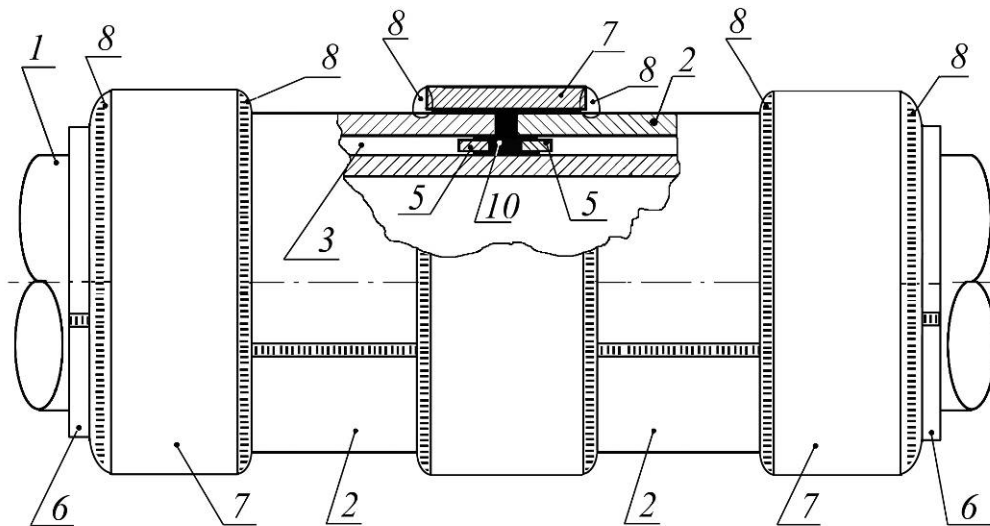


Рис. 4.2.5. Сполучення частин складовою муфти за допомогою роздільників підмуфтового простору:

1 – трубопровід, 2 – оболонки муфт, 3 – підмуфтовий шар, 5 – тонкостінні кільця, 6 – технологічні кільця, 7 – бандажні кільця, 8 – кільцеві шви, 10 – герметик

Торці бандажних кілець 7 зварюють з поверхнею відповідних муфт 2 кільцевими кутовими швами 8, після чого порожнину під додатковими бандажними кільцями заповнюють під тиском герметизуючим складом. В результаті цього, підмуфтовий простір виявляється розділеним на зони, герметично розділеним за допомогою сформованих ущільнювачів. На завершальному етапі ремонту підмуфтовий простір кожної зони заповнюють

самотвердіючою масою, яка формує, після закінчення перехідних процесів затвердіння підмуфтовий шар 3.

При використанні для посилення протяжного ділянки магістрального трубопроводу муфт з полімерними торцевими ущільнювачами, вони також можуть встановлюватися кроковим способом, причому для з'єднання сусідніх муфт використовується загальні манжета і бандажне кільце (рис. 4.2.6).

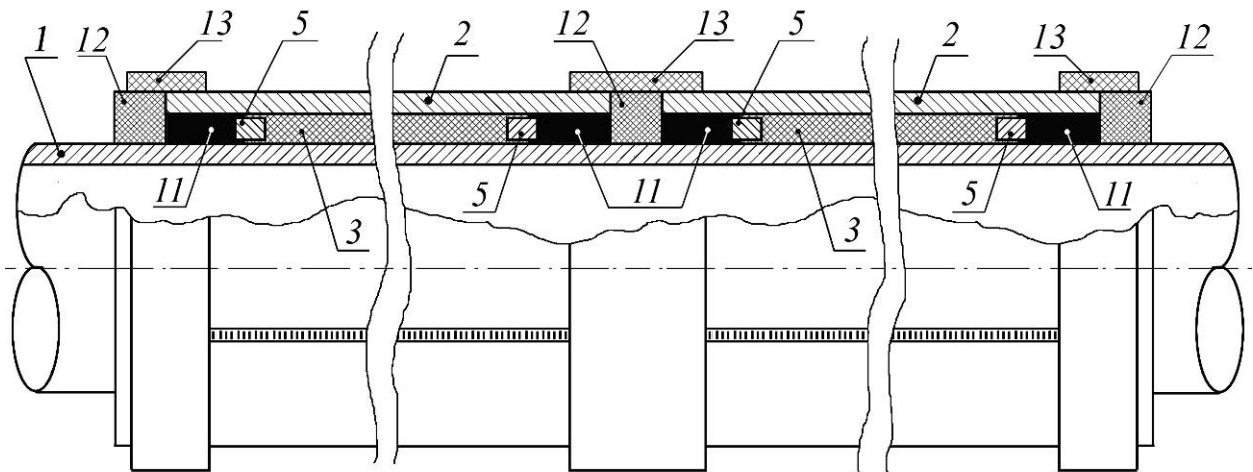


Рис. 4.2.6. Складова муфта з торцевими ущільнювачами і роздільниками підмуфтового простору з композитних матеріалів:

1 – трубопровід, 2 – оболонки муфт, 3 – підмуфтовий шар, 5 – тонкостінні кільця, 11 – кільцевий зазор, заповнений герметиком, 12 – манжета, 13 – бандажне композитне кільце

Новизна запропонованих способів ремонту трубопроводів, що знаходяться під тиском, підтверджена трьома патентами на винахід України та Російської Федерації [82, 83, 114], виданими після проведення державної кваліфікаційної експертизи, що включає експертизу на світову новизну.

Розроблені способи набули широкого поширення при ремонті магістральних газопроводів України в підрозділах ДК «Укртангазу» НАК «Нафтогаз України» і включені до галузевих будівельних норм ГБН В.3.1-00013741-12: 2011 «Магістральні газопроводи, ремонт дугового зварювання в умовах ЕКСПЛУАТАЦІЇ» [24 ] і «Технологічний регламент Підвищення несучої здатності труби та категорійності діляниць магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт» [155].

#### **4.2.3. Підвищення ефективності посилення трубопроводу шляхом збільшення модуля пружності підмуфтового шару**

У розділі 2 зроблено висновок, що ефективність посилення ділянки трубопроводу залежить, крім геометричних параметрів трубопроводу і муфти, ще і від параметрів, що визначають властивості міцності шару підмуфтового простору, а так же мірі усадки речовини в процесі його твердіння. При цьому модуль пружності підмуфтового шару може стати основним параметром, що визначає ефективність муфтового ремонту.

##### **4.2.3.1. Видалення повітря з речовини, що формує підмуфтовий шар**

Важливим питанням, яке має бути вирішене при запресовуванні самотвердіючої речовини, є видалення розчиненого в ньому газу (повітря), що є основною причиною стисливості рідких речовин. Рівень розчиненого в рідкому самотвердіючому речовині газу зазвичай підвищується під час перемішування компонентів маси за допомогою міксера, який зазвичай проводять безпосередньо перед його запресовкою в підмуфтовий простір (процес змішування основи і затверджувача). Кількісною характеристикою даних властивостей рідкої речовини є коефіцієнт стисливості, який пов'язаний з об'ємним модулем пружності простим співвідношенням [44]:

$$\beta = -\frac{dV}{V_{00} \cdot dP} = \frac{1}{E_{00}}, \quad (4.2.4)$$

де  $V_{00}$  – початковий обсяг рідкої речовини,  $dP$  – зміна тиску, що викликає зміну обсягу на величину  $dV$ ,  $E_{00}$  – об'ємний модуль пружності рідкого речовини.

Згідно [44,47] розчинність газів в рідині залежить від ряду зовнішніх чинників, найважливішими з яких є температура рідкої речовини, тиск на границі між рідиною і газом і площа їх контактної границі. При збільшенні температури і зниженні тиску розчинність газів у рідині зменшується, що призводить часткового видалення газу з рідини і, як наслідок, до підвищення модуля пружності підмуфтового шару.

У зв'язку з цим пропонується наступна технологія (рис. 4.2.7).

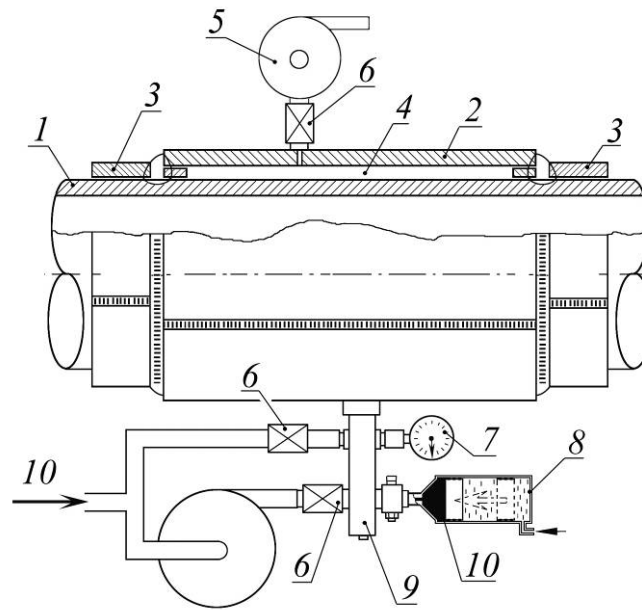


Рис. 4.2.7. Використання вакуумного насоса:

1 – трубопровід, 2 – муфта, 3 – технологічні кільця, 4 – під муфтовий простір,  
5 – вакуумний насос, 6 – крани, 7 – манометр, 8 – шприц, 9 – колектор,  
10 – самотвердіюча маса, 11 – нагнітач

Безпосередньо перед запресовкою самотвердіючу речовину поміщають в резервуар, всередині якого створюють розрядження (знижений тиск). Рідку речовину витримують в плоскому резервуарі певний час, необхідний для виділення з неї частини розчиненого газу (повітря). Після цього, рідку самотвердіючу речовину подають в підмуфтовий простір. Первинне заповнення підмуфтового простору бажано проводити шляхом всмоктування за допомогою вакуумного насоса 4 (рис. 4.2.7), а для створення необхідного тиску можуть використовуватися шприц 5 і нагнітач 6, підключені до муфти через колектор 7. Для підвищення ефективності видалення газу процедура витримування речовини в резервуарі зі зниженим тиском може бути поєднана з його нагріванням.

4.2.3.2. Використання при посиленні трубопроводів середніх і малих діаметрів розплавленого металу для формування підмуфтового шару

У розділі 2 на підставі розрахунків зроблено висновок, що ремонт трубопроводів середніх і малих діаметрів за допомогою муфт, що заповнюються полімерним компаундом, малоефективний через найнижче значення модуля пружності використовуваних в даний час в промисловості компаундов. Наприклад, потрібно посилити ділянку трубопроводу з товщиною



стілки  $\delta_T = 9 \text{ мм}$ . Для посилення використовується муфта з товщиною стінки  $\delta_T = \delta_M = 9 \text{ мм}$ , яка встановлюється на трубопровід з мінімально можливою глибиною підмуфтового простору  $\delta_{III} = 3 \text{ мм}$ . Муфта заповнюється під оптимальним тиском (вираз 2.2.46) поліуретанової самотвердіючої масою SZLAST з модулем пружності  $E_{III} = 55 \text{ МПа}$ . У цьому випадку розрахунки показують, що при посиленні трубопроводу діаметром 1400 мм, ремонтна труба розвантажується на  $47\% \left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,53 \right)$ , трубопроводу діаметром 700 мм – на 42 %  $\left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,58 \right)$ , трубопроводу діаметром 350 мм – на 29 %  $\left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,71 \right)$ , а трубопроводу діаметром 150 мм труба розвантажується всього на 10 %  $\left( \frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,9 \right)$ .

Модуль пружності компаундів, використовуваних для заповнення підмуфтового простору, зазвичай знаходиться в межах 40-100 МПа [54, 151, 153], що є недостатнім для ремонту труб щодо малого діаметра. Модуль пружності речовини може бути підвищений введенням в нього спеціальних порошкових наповнювачів. При цьому модуль пружності затверділого компаунда з наповнювачем визначається процентним вмістом наповнювача. При збільшенні частки наповнювача, модуль пружності компаундного шару підмуфтового простору зростає, але при цьому зростає його щільність і в'язкість. Це викликає складності при запресовуванні компаунда з наповнювачем в вузькі зазори підмуфтового простору. Крім того, за рахунок великого часу розподілу в'язкого компаунда в обсягах складної форми, якими є торцеві ущільнювачі муфт, в процесі полімеризації відбувається часткове зниження тиску в підмуфтовому просторі. Це призводить до погіршення розвантаження ремонтної труби. Тому, звичайно, склад компаунда вибирають виходячи з компромісу між його в'язкістю і модулем пружності. Компаунди, що володіють підвищеним модулем пружності (вище 500 МПа) дорогі і малодоступні.

В цьому випадку домогтися необхідного ступеня розвантаження посилюваної труби можливо при використанні в якості самотвердіючої речовини розплавленого металу, що має низьку температуру плавлення.

У роботі показана технологія посилення трубопроводу за допомогою паяно-зварної муфти [129], що розігрівається індуктором. Основну увагу приділено контролю якості ремонту і забезпечення правильного обліку  $\Delta P$  і коефіцієнта зв'язку  $k$ , необхідних для виконання умови (3). Разом з тим, домогтися виконання умови (3) під час проведення робіт можна тільки при забезпеченні герметичності підмуфтового простору, що висуває підвищені вимоги до якості торцевих ущільнювачів.

Пропонована технологія підвищення міцності ділянки трубопроводу полягає в наступному. На підсилювальній ділянці трубопроводу встановлюються технологічні елементи муфти, які після скріплення між собою відомими способами, утворюють навколо труби замкнуту оболонку з кільцевими порожнинами для формування торцевих ущільнювачів [115, 121]. Далі герметизуються торці муфти за допомогою сплаву (металу), що володіє більш високою температурою плавлення (додатковий сплав), ніж сплав (метал), який використовується для формування підмуфтового шару (основний сплав). Для герметизації торців муфти проводиться попередній розігрів муфти в районі кільцевих порожнин до температури, що перевищує температуру плавлення додаткового сплаву, але не перевищує його температуру кипіння. Після цього порожнини заповнюються розплавленим додатковим сплавом, який подається під тиском. Після заповнення кільцевих порожнин, температура муфти знижується, в результаті чого формуються герметичні торцеві ущільнювачі. Далі вся муфта прогрівається до температури, більшої температури плавлення основного сплаву, але меншою температури плавлення додаткового сплаву, після чого підмуфтовий простір заповнюється основним розплавленим металом, що подається під заданим тиском.

Процес формування підмуфтового шару ілюструється рис. 4.2.8, а варіанти конструктивного виконання кільцевих порожнин показані на рис.4.2.9 – 4.2.16.

Далі муфта остигає природним шляхом або охолоджується примусово. При відносно невеликій довжині муфти і обмеженому часу проведення робіт можливий прогрів всієї муфти до температури, що перевищує температуру додаткового сплаву, формування торцевих ущільнювачів зі слухним зниженням температури муфти і заповненні підмуфтового простору основним сплавом, що подається під заданим тиском.

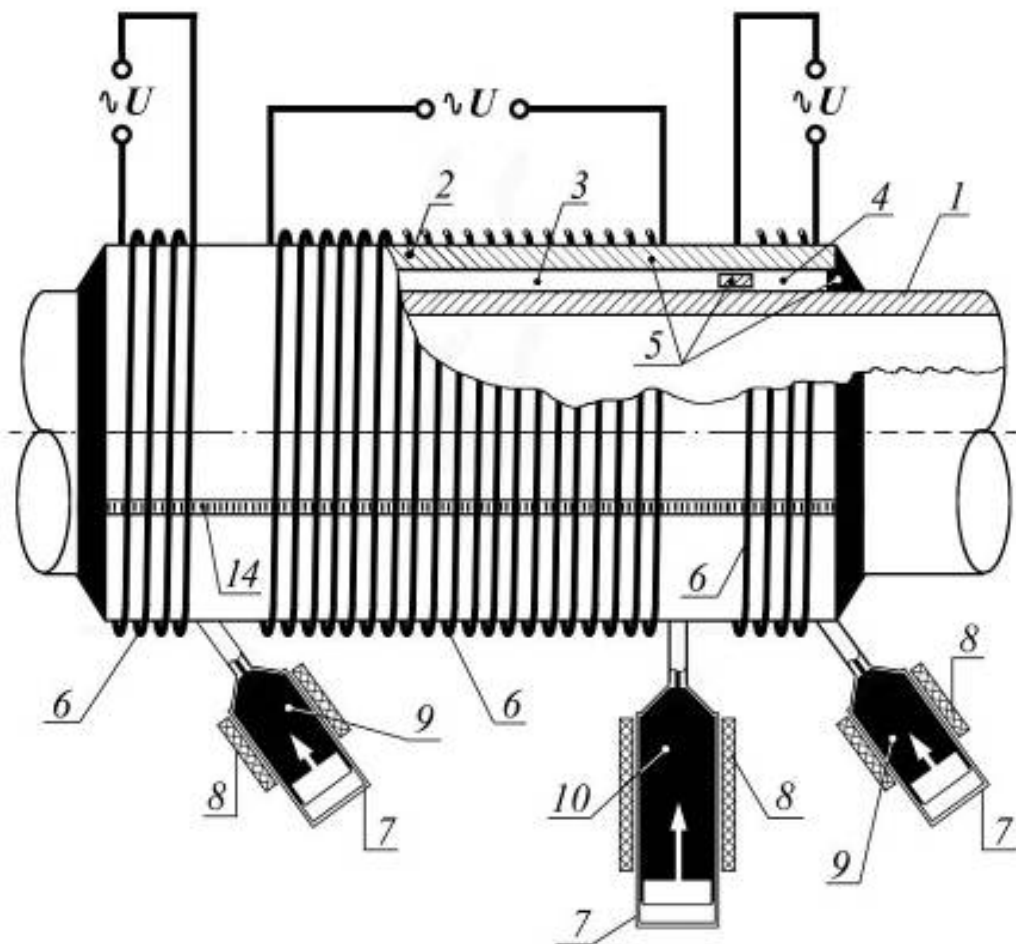


Рис. 4.2.8. Організація формування торцевих ущільнювачів і заповнення підмуфтового простору розплавленим металом:

1 – трубопровід; 2 – оболонки муфти, 3 – підмуфтовий простір, 4 – кільцева порожнина, 5 – технологічні елементи муфти, 6 – індуктори, 7 – шприци, 8 – нагрівачі, 9 – додатковий сплав (метал), 10 – основний сплав (метал), 11 – підкладні кільця, 12 – манжета, 13 – технологічні кільця, 14 – зварений шов, 15 – ущільнювач, 16 – складова фланець, 17 – кріплення фланцевого з'єднання

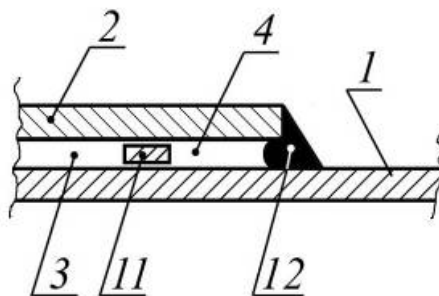


Рис.4.2.9. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

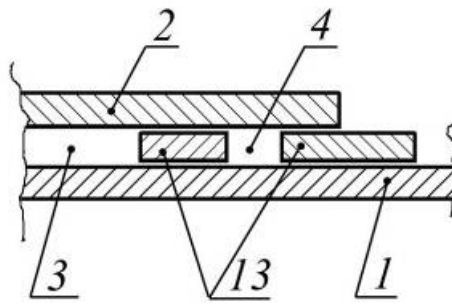


Рис. 4.2.10. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

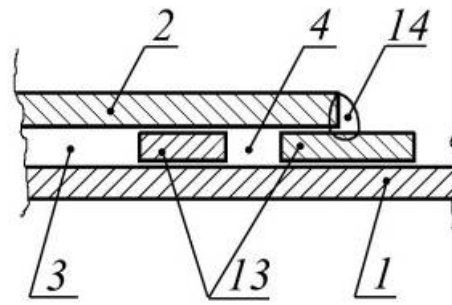


Рис. 4.2.11. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

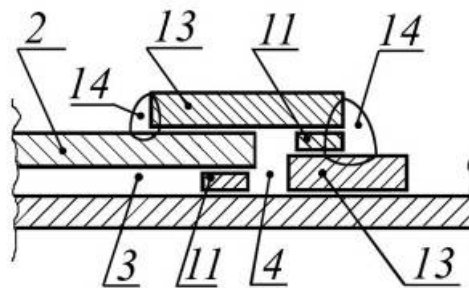


Рис. 4.2.12. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

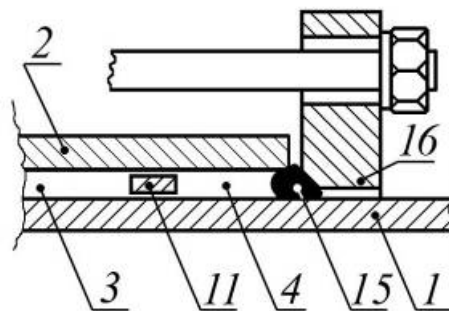


Рис. 4.2.13. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

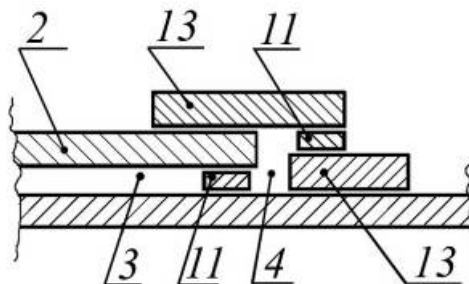


Рис. 4.2.14. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

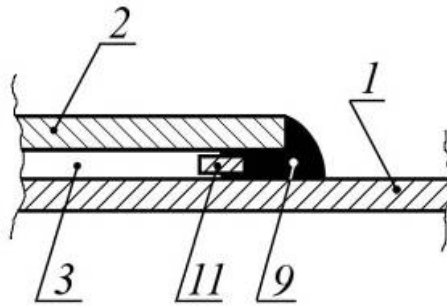


Рис. 4.2.15. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

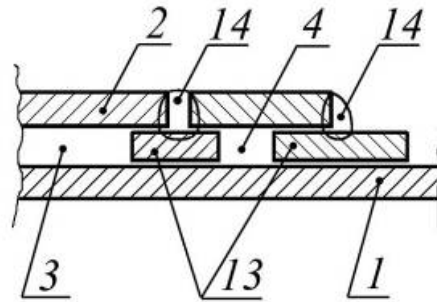


Рис. 4.2.16. Варіант конструктивного виконання кільцевих порожнин

Для забезпечення необхідного значення ступеня зниження окружних напружень в трубі, при рівномірному розподілі навантаження між стінками труби і муфти, тиск в підмуфтовому просторі повинно змінюватися пропорційно тиску в трубопроводі  $P_M = P_p \cdot k^{-1}$ , що забезпечується в разі, якщо вибір тиску заповнення підмуфтового простору основним сплавом буде здійснюватися виходячи з умови описаних в розділі 2. Разом з тим, виконання умови на практиці пов'язане з певними труднощами прогнозування кінцевих значень коефіцієнта зв'язку  $k$  і  $\Delta P$ , що мають складну залежність від температури. Запропонований в роботі підхід до вибору оптимального тиску запресування розплавленого металу в підмуфтовий простір має обмежене застосування, так передбачає формування підмуфтового шару в два етапи з проміжним охолодженням конструкції. У зв'язку з цим практичний і науковий інтерес представляє одержання залежностей, що дозволяють сформувати підмуфтовий шар з оптимальними параметрами в один етап.

Питання організації контролю монтажу муфти з формуванням підмуфтового шару з розплавленого металу детально розглянуті в підглаві 2.4.

Розрахунки показують [127], що використання свинцю, запресованого в підмуфтовий простір відповідно до запропонованого способу, дозволить різко підвищити ефективність посилення трубопроводу, збільшивши ступінь зниження

кільцевих напружень в ремонтваній трубі діаметром  $D_T = 150 \text{ мм}$  з  $\left(\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,9\right)$  (10 % розвантаження при використанні самотвердіючої маси SZLAST, що має з модуль пружності  $E_{III} = 55 \text{ МПа}$  і коефіцієнт Пуассона  $\mu_{III} = 0,48$ ) до  $\left(\frac{\sigma_{Tp}}{\sigma_{To}} = 0,58\right)$  (42 % розвантаження при використанні свинцю, має модуль пружності  $E_{III} = 0,18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  і коефіцієнт Пуассона  $\mu_{III} = 0,42$ ). Наведені дані пояснюються графіком, представленим на рис. 4.2.17.

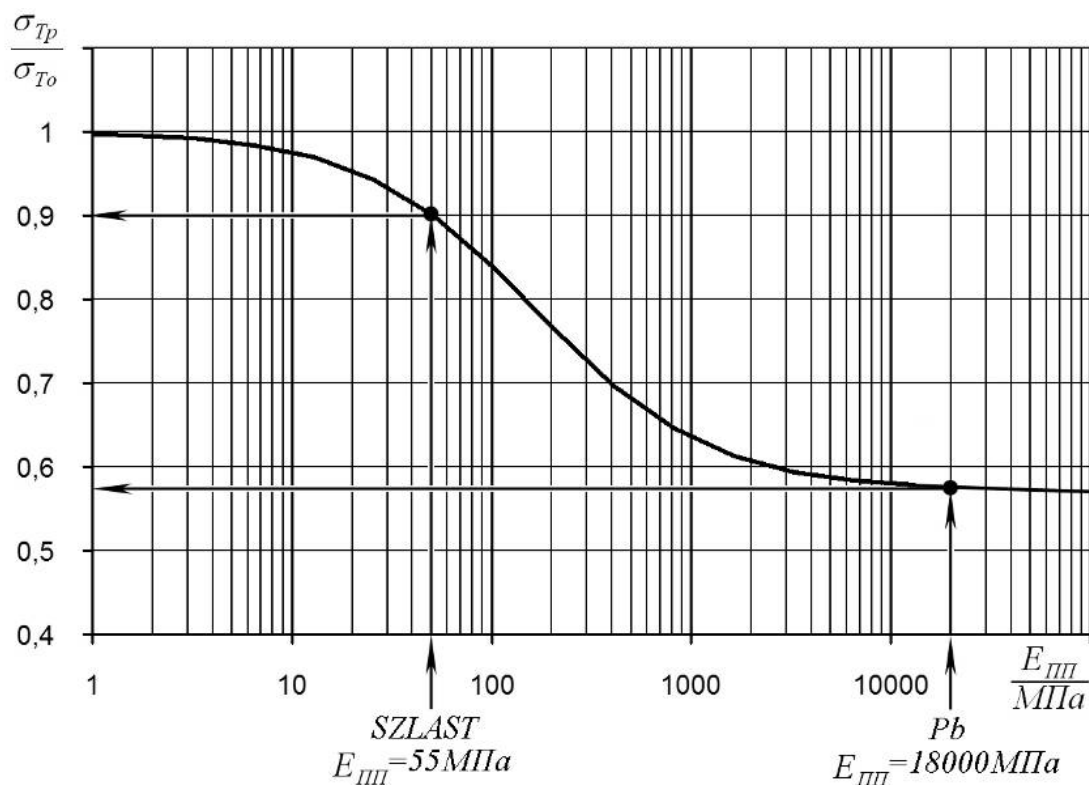


Рис. 4.2.17. Графік, що пояснює спосіб ремонту трубопроводу за допомогою муфти, що заповнюється розплавленим металом

Велика усадка свинцю під час застигання (до 4 %) може бути ефективно знижена введенням додаткових добавок.

Питання зниження усадки свинцю розглянуті в спеціалізованій літературі, присвяченій виготовленню куль для вогнепальної зброї і в обсязі застосування для заповнення підмуфтового простору можуть вважатися вивченими [176].

Новизна, показана в роботі способу муфтового ремонту трубопроводів із заповненням підмуфтового простору розплавленим металом, підтверджена патентом України на винахід [122].

Таким чином, розроблені рекомендації щодо підвищення ефективності обслуговування трубопроводів за допомогою муфт з внутрішнім заповненням шляхом зменшення глибини підмуфтового простору, застосування складових муфт, підвищення модуля пружності підмуфтового шару шляхом видалення розчиненого в самотвердіючої речовині газу і використання розплавленого металу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cole P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonic. 1978. № 4 (16) P. 151–155.
2. Lazor R. Validation of sleeve weld integrity and workmanship level development. / Lazor R., Bolton B., Dinovitzer A. // IPC2006-10425, Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, Calgary, 2006.
3. Luo Yang, «Development of NdFeB C Magnet Industry in new century», Proc. of the 19th Int. Workshop on REPM&their appl. Beijing, China , 2006, P-1
4. Otegui J. L. Local collapse of gas pipelines under repairs. / Otegui J. L., Urquiza S., Rivas A., Trunzo A. // Int. J. Pressure Vessels and Piping. 2000. 77. P. 555–566.
5. Pat. GB 2210134 United Kingdom, UK CL (Edition J) F16L55/18 Method of repairing a pipe / William Pallan ; date of filing 21.09.1987 ; date of A publication 01.06.1989
6. Grigoriy S. Tymchik, Oleksandr O. Podolian, Andriy V. Pavlovych, Iuliia Iu. Lysenko, Paweł Komada, Ainur Kozbakova Quality control system of well-bonded coupling fitting onto high pressure gas-main pipelines// Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108085A (1 October 2018).
7. Whittington K. R. Ultrasonic testing at higt temperatures // Phys. Techn. 1978. N 2. P. 62–67.
8. А. с. 1058182 СССР, МКИ5 В 23 К 31/01. Способ приварки технологических элементов к трубопроводу. / А. Е. Аснис, Й. М. Савич, В. И. Титаренко и др ; заявл. 05.01.81 ; опубл. 30.05.91, Бюл. №20.
9. А. с. 1680473 СССР, МКИ5 В 23 К 31/00. Способ ремонта трубопровода. / А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнуллин, А. С. Собачкин и др ; заявл. 12.01.89 ; опубл. 30.09.91, Бюл. № 38.
10. А. с. 1774118 СССР, МКИ5 F 16 L 55/175. Способ ремонта трубопровода. / Т. В. Молочная, Ю. А. Гоголев ; заявл. 09.07.90 ; опубл. 07.11.92, Бюл. № 41.
11. Айнбиндер А. Б. Расчёт магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие/ А. Б. Айнбиндер – М.: Недра, 1991, 287 с.
12. Андріїшин М.П. Аналіз муфтових підсилювальних елементів, які використовують для ремонту магістральних газопроводів / Андріїшин М. П.,



Баранецький І. Б., Матяш В. І. та ін. // Аналіз Нафтова і газова промисловість – 2009. – № 4. – С. 35–40.

13. Бегнер Ф. Расчет цилиндрической оболочки методом конечных элементов / Бегнер Ф., Фокс Р., Шмидт Л // Рак. техн. и косм. – 1967. – № 4. – С. 170–175.

14. Беккер М. В. Ремонт магістральних трубопроводів під тиском / Беккер М. В., Бут В. С., Говдяк Р. М. и др.. – К.: Кий, 2008. – 240 с.

15. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем/ Берталанфи Л. фон.// Системные исследования. — М.: Наука, 1973.

16. Бирилло И. Н. Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния системы «труба-муфта» / И. Н. Бирилло, Ю. В. Александров, А. С. Попков // Наука в нефтяной и газовой промышленности, 2010, вып. № 4. – С. 2–6.

17. Бровкина Н. Д. Контроль и ревизия: учеб. пособие./ Бровкина Н. Д. – Москва: ИНФРА-М, 2007. – С. 5–10. – 346 с.

18. Бут В. С. Присоединение дуговой сваркой отводов к магистральным нефтепроводам под давлением/ Бут В. С.// Нефтяная и газовая промышленность. Обзорная информация. Серия транспорт и хранение нефти. –М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 92.с

19. ВБН В.3.1-00013741-07:2007. Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок: – К.: НАК «Нафтогаз України», 2007. – 110 с.

20. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов./ Владимиров В. И. – М.: Металлургия, 1984 – 280 с.

21. Волкова В. Н. Теория систем: учебное пособие./ Волкова В. Н., Денисов А. А. – М.: Высшая школа, 2006. – 511 с. – ISBN 5-06-005550-7

22. ВСН 004-88. Строительство магистральных трубопроводов. Технология и организация: – М.: ВНИИСТ, 1990. – 94 с.

23. ВСН 012-88. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Контроль качества и приёмка работ. Часть 2. – М.: ВНИИСТ, 1990. – 150 с.

24. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації: – К.: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 152 с.

25. Гетман А. Ф., Козин Ю. Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления М.: Энергоатомиздат, 1997. – 288с.

26. Глухов Н. А. О направленности электромагнитного акустического датчика сдвиговых колебаний / Глухов Н. А. // Дефектоскопия. – 1971, вып. № 1 – с. 13–19.

27. Глухов Н. А. Электромагнитно-акустические преобразователи для упругих волноводов./ Глухов Н. А., Бобров В. Т., Верemenко С. В. и др. // Дефектоскопия. – 1972, вып. № 4 – С. 38–45.

28. Говдяк Р. М. Підвищення ефективності магістральних газопроводів на пізній стадії експлуатації: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 05.15.13 «Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища». /Р. М. Говдяк – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2008.. – 20 с.

29. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих оболочек./ А. Л. Гольденвейзер – М.: Наука, 1976. 512 с.

30. ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. – М.:ИПК Издательство стандартов, 2003, – 12 с.

31. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. М.: Изд-во стандартов. 31с.

32. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М.: Изд-во стандартов. 39 с.

33. ГОСТ Р ИСО МЭК 15288-2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2006. – 54 с.

34. Гумеров А. Г. Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов/ Гумеров А. Г., Ахметов Х. А., Гумеров Р. С., Векштейн М. Г. // Под ред. А. Г. Гумерова.-М.: «Недра-Бизнесцентр», 1988. – стр. 88–91.

35. Гумеров А. К. Механизмы разрушения магистральных трубопроводов с приварными элементами/ Гумеров А. К., Шмаков В. А., Хайрутдинов Ф. Ш. // Нефтегазовое дело, 2006, вып. 4. – С. 227.

36. Гурвич А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов./ Гурвич А. К., Ермолов И. Н. – К.:Техніка, 1972, – 460 с.

37. Детермінація проекту спільного впровадження « Впровадження заходів з ресурсо- та енергозбереження в Дочірній компанії «Укртрансгаз» Національної Акціонерної Компанії «Нафтогаз України»»:детермінаційний звіт/ТЮФ Рейланд Груп; звіт №TRU022JI-DR; Перегляд №2. – 2011 – 70 с.

38. Ейчина В. Г. Влияние магнитного поля на затухание ультразвуковых колебаний./ Ейчина В. Г., Кеслер Н. А. //Дефектоскопия. – 1972, вып. № 3 – С. 53 –58.
39. Ермаков А. А. Ремонт дефектов труб с использованием бандаж / А. А. Ермаков, Б. А. Клюк, В. Г. Поляков, М. М. Окромчедлов // Газовая промышленность. – 1989. – № 8. С. 58–61.
40. Зандберг А. С. Основы проектирования сварных герметизирующих конструкций магистральных трубопроводов. Стальные муфты и тройники [Текст]/ Зандберг А. С. // Сварочное производство, 2010, № 11. – С. 3–9. – Библиогр.: с. 9.
41. Зубилов Г. И. Обеспечение безопасности длительно эксплуатируемых стальных трубопроводов газораспределительных систем: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 25.00.19 –Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ». /Г. И. Зубилов– Уфа: Ин-т проблем трансп. энергоресурсов, 2007. – 20 с.
42. Ільницький Ю. В. Ремонт магістральних газопроводів з використанням муфт на розширному бетоні / Ільницький Ю. В., Якимечко Р. Я. //Трубопровідний транспорт. – 2008. – № 4. – С. 23–25.
43. Інструкція з технології ремонту магістральних газопроводів під тиском до 0,3 МПа із застосуванням дугового зварювання. – Київ: Інститут електрозварювання ім.. Є. О. Патона, 1997.
44. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. 3-е изд. / Карапетьянц М. Х. – М., Химия, 1975 – 583 с.
45. Кориков А. М., Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. / Кориков А. М., Павлов С. Н. – Томск: Томс. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008. – 264 с. – ISBN 978-5-86889-478-7.
46. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов/ Крауткремер Й., Крауткремер Г. : Справочник.; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
47. Кричевский И. Р. Фазовые равновесия в растворах при высоких давлениях. / Кричевский И. Р. – М.Л., ГНТИХЛ, 1952 – 168 с.
48. Лютак З. П. «Технологія акустичного контролю нафтогазового обладнання» / Лютак З. П., Лютак І. З. (№1/11-11633 від 16.07.12) – Івано-Франківськ, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2012.
49. Лютак І. З. Ультразвуковий контроль параметрів технічного стану магістральних трубопроводів : монографія / І. З. Лютак, І. С. Кісіль. – Івано-Франківськ , 2010. – 285 с.

50. Мазель А. Г. Сварные муфты для ремонта трубопроводов / А. Г. Мазель, А. Гобарев, К. М. Нагорнов, А. И. Рыбаков // Газовая промышленность. – 1996. , № 9–10. – С. 55–57.
51. Малинка А. В. Возбуждение и регистрация ультразвуковых колебаний ЕМА методом. / Малинка А. В., Неволин О. В., Пачковский Л. С. // Неразрушающие физические методы и средства контроля. – Кишинев: ВНИИНК, 1977, д. 01/113. С. 421–424.
52. Малинка А. В. Электромагнитно-акустический метод контроля ферромагнитных листов и труб./ Малинка А. В., Драпкин И. А., Коломоец Н. Т. // Дефектоскопия. – 1972, вып. № 4 – С. 44–48.
53. Малолетко А. Н. Контроль и ревизия: учеб. пособие. / Малолетко А. Н. – Москва: КНОРУС, 2006. – С. 9–26. – 312 с.
54. Матренин С. В. Композиционные материалы и покрытия на полимерной основе: учебное пособие./ Матренин С. В., Овечкин Б. Б. – Томск, 2008 – 197 с.
55. Мельник М. В. Ревизия и контроль / М. В. Мельник, А. С. Пантелеев, А. П. Звездин // под ред. проф. М. В. Мельник. – М.: КНОРУС, 2007. – 640 с.
56. Месарович М. Общая теория систем: математические основы./ Месарович М., Такахара И. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
57. Мищенко А. С., Тишин А. М. «Перспективные материалы для постоянных магнитов», [http://www.ndfeb.ru/articles/perm mag.htm](http://www.ndfeb.ru/articles/perm%20mag.htm)
58. Моргунова О. Н. Методы и алгоритмы исследования эффективности сложных иерархических систем автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)» / О. Н. Моргунова – Красноярск, 2006. – 20 с.
59. Надежность технических систем/ Под ред. И. А. Ушакова. – М.: 1985.
60. Надежность и эффективность в технике: справочник / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. В 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / Подред. А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
61. Надежность и эффективность в технике: справочник / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / Подобщ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – 328 с.
62. Нерабайло Б. В. Локальные задачи прочности цилиндрических оболочек. / Б. В. Нерабайло – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.

63. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др; Под ред. В. В. Клюева М. 3-е изд. испрт. и доп. : Машиностроение, 2005. – 656 с.

64. Николаева Е.В. ФОПИ: Измерительные преобразователи. Принципы измерения физических величин: учеб. пособие/ Е. В. Николаева, В. В. Макаров. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 96 с.

65. Новые методы ремонта линейной части магистральных газопроводов. – Москва: ВНИИСТ, 1981, стр. 33–34 – установка заплат

66. Олійник О. І. Підвищення ефективності і безпеки ремонту дуговим зварюванням магістральних газопроводів в умовах експлуатації: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / О. І. Олійник – Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012.. — 20 с.

67. ОР 13.01-74.30.00-КТН-005-5-02 «Регламент планирования, выполнения диагностики и анализа ее результатов на магистральных нефтепроводах». Введ.28.11.2002. – ООО АК Транснефть, Утв.28.11.2002.

68. Пат. на винахід 38190 Україна, МПК7 F16L 55/175. Спосіб ремонту магістрального трубопроводу / Дрогомирецький М. М., Петровський Б. С., Рильніков Б. С. та Ін. ; заявл. 06.06.2000 ; опубл. 15.05.2001, бюл. № 4.

69. Пат. на винахід 42602 Україна, МПК7 F16L 55/16. Спосіб встановлення муфти на дефектну ділянку трубопроводу / Коломєєв В. М., Бут В. С., Розгонюк В. В. та Ін. ; заявл. 20.04.2001 ; опубл. 15.10.2001, бюл. № 9.

70. Пат. на винахід 46544 Україна, МПК6 F16L 55/16. Спосіб ремонту діючого трубопроводу з локальними наскрізними дефектами / Коваль Р. І., Пришляк А. М., Бут В. С. ті Ін. ; заявл. 08.08.2001 ; опубл. 15.05.2002, бюл. № 5.

71. Пат. на винахід 53444 Україна, МПК7 F16L 55/16. Спосіб ремонту діючого трубопроводу з локальними наскрізними дефектами / Мандра А. С., Бут В. С., Бобов В. П. та Ін. ; заявл. 27.05.2002 ; опубл. 15.01.2003, бюл. № 1.

72. Пат. на винахід 62661 Україна, МПК7 F16L 55/16. Спосіб ремонту діючого трубопроводу з локальними наскрізними дефектами та пристрій для його здійснення / Бут В. С., Пришляк А. М., Дрогомирецький М. М. та Ін. ; заявл. 23.04.2003 ; опубл. 15.12.2003, бюл. № 12.

73. Пат. на винахід 72840 Україна, МПК (2006) F16L 55/16. Спосіб ремонту лінійної ділянки трубопроводу / Руднік А. А., Беккер М. В., Дрогомирецький М. М. та ін. ; заявл. 07.07.2004 ; опубл. 15.04.2005, бюл. № 4.

74. Пат. на винахід 75859 Україна, МПК (2006) F16L 55/16. Спосіб ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу / Бут В. С., Беккре М. В., Дрогомирецький М. М. та Ін. ; заявл. 13.02.2006 ; опубл. 15.05.2006, бюл. № 5.

75. Пат. на винахід 76390 Україна, МПК (2006) B23R 31/02. Спосіб ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу / Бут В. С., Беккре М. В., Дрогомирецький М. М. та Ін. ; заявл. 01.03.2006 ; опубл. 17.07.2006, бюл. № 7.

76. Пат. на винахід 76391 Україна, МПК (2006) B23R 31/02. Спосіб ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу / Андрійшин М. П., Бут В. С., Горностаєв Г. П. та Ін. ; заявл. 27.03.2006 ; опубл. 17.07.2006, бюл. № 7.

77. Пат. на винахід 77930 Україна, МПК (2006) B23R 31/02. Спосіб ремонту діючого трубопроводу з наскрізним дефектом / Бут В. С., Беккре М. В., Дрогомирецький М. М. та Ін. ; заявл. 06.09.2006 ; опубл. 15.01.2007, бюл. № 1.

78. Пат. на винахід 77931 Україна, МПК (2006) B23R 31/02. Спосіб ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу, що знаходиться під тиском / Бут В. С., Марчук Я. С., Беккре М. В. та Ін. ; заявл. 20.10.2006 ; опубл. 15.01.2007, бюл. № 1.

79. Пат. на винахід 78664 Україна, МПК (2006) F16L 55/18. Спосіб ремонту протяжних ділянок діючого трубопроводу / Шимко Р. Я., Беккре М. В., Лохман І. В. та ін. ; заявл. 02.08.2006 ; опубл. 10.04.2007, бюл. № 4.

80. Пат. на винахід 78963 Україна, МПК (2006) F16L 55/18. Спосіб підвищення категорії протяжної лінійної ділянки діючого трубопроводу (варіанти) / Марчук Я. С., Андрійшин М. П., Рудко В. В. та Ін. ; заявл. 15.02.2007 ; опубл. 25.04.2007, бюл. № 5.

81. Пат. на винахід 79417 Україна, МПК (2006) F16L 55/18. Спосіб ремонту протяжної лінійної ділянки діючого трубопроводу / Бут В. С., Лохман І. В., Дрогомирецький М. М. та Ін. ; заявл. 27.12.2006 ; опубл. 11.06.2007, бюл. № 8.

82. Пат. на винахід 81894 Україна, МПК (2006) F16L 55/18, F16L 55/16. Спосіб ремонту дефектної ділянки трубопроводу без зміни режимів транспортування продукту / Лохман І. В., Рудко В. В., Подолян О. О. та ін.; заявл. 28.11.2007 ; опубл. 11.02.2008, бюл. № 3.

83. Пат. на винахід 81895 Україна, МПК (2006) F16L 55/18. Спосіб ремонту трубопроводу в умовах експлуатації / Бут В. С., Лохман І. В., Подолян О. О. та ін.; заявл. 12.12.2007 ; опубл. 11.02.2008, бюл. № 3.

84. Пат. на винахід 82038 Україна, МПК (2006) F16L 55/00, G01M 3/00. Спосіб муфтового ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу з контролем

якості монтажу / Бут В. С., Мандра А. С., Подолян О. О. та ін. ; заявл. 27.11.2007 ; опубл. 25.02.2008, бюл. № 4.

85. Пат. на винахід 82723 Україна, МПК (2006) G01N 29/04. ЕМА перетворювач / Подолян О. О. ; заявл. 27.04.2006 ; опубл. 12.05.2008, бюл. № 8.

86. Пат. на винахід 83295 Україна, МПК (2006) G01N 29/04. Спосіб формування акустичної хвилі / Подолян О. О. ; заявл. 20.10.2006 ; опубл. 25.06.2008, бюл. № 12.

87. Пат. на винахід 89290 Україна, МПК (2006) G01N 29/04, H03K 4/00. Спосіб формування дзвіноподібних імпульсів зондування для ЕМА перетворювача та пристрій для його здійснення / Подолян О. О., Протасов А. Г., Лігоміна С. М. ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, бюл. № 12.

88. Пат. на винахід 92125 Україна, МПК (2006) G01N 29/04. Спосіб неруйнівного контролю якості робіт при муфтовому ремонті трубопроводів / Тимчик Г. С., Подолян О. О., Пудрий С. В., Томашук О. І. ; заявл. 31.12.2009 ; опубл. 27.09.2010, бюл. № 18.

89. Пат. на винахід 92575 Україна, МПК (2006) F16L 55/16, F16L 55/18. Спосіб муфтового ремонту трубопроводу (варіанти) / Бут В. С., Пудрий С. В., Подолян О. О. та ін. ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 10.11.2010, бюл. № 21.

90. Пат. на винахід 98440 Україна, МПК (2006) F16L 55/175. Спосіб ремонту діючого трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням / Ориняк І. В., Тимчик Г. С., Подолян О. О. та ін. ; заявл. 01.03.2012 ; опубл. 10.05.2012, бюл. № 18.

91. Пат. на изобретение 2066017 Российская Федерация, МПК 6 F16L55/18 Способ ремонта трубопровода с локальными дефектами / Самойлов Б. В., Зайцев С. П., Макаров С. П., Некрасов А. П. ; заявл. 12.04.1994 ; опубл. 27.08.1996.

92. Пат. на изобретение 2078667 Российская Федерация, МПК 6 B23K37/00 Устройство для сборки и сварки/ Двуреченский А. Г., Сельский Б. Е., Капустин В. Е. и др; заявл. 30.09.1995 ; опубл. 10.05.1997.

93. Пат. на изобретение 2104439 Российская Федерация, МПК 6 F16L55/175 Способ ремонта локальных повреждений трубопровода / Альфео Гоглио, Валентино Пистоне ; заявл. 17.03.1993 ; опубл. 10.02.1998.

94. Пат. на изобретение -рд14 Российская Федерация, МПК 6 F16L55/18 Способ ремонта трубы / Норман С. Фоли, Джастин Шмидт, Норм Блок, Пол Келти. ; заявл. 24.08.1993 ; опубл. 10.04.1998.

95. Пат. на изобретение 2155905 Российская Федерация, МПК7 F16L55/17 . Способ ремонта металлических трубопроводов (варианты) / Гончаров Н. Г., Гобарев Л. А., Лопатин Е. В. и др ; заявл. 19.05.1999 ; опубл. 10.09.2000.

96. Пат. на изобретение 2165345 Российская Федерация, МПК7 B23K 31/02 . Способ монтажа усиливающей муфты на дефектный стык действующего трубопровода / Коломеев В. Н., Розгонюк В. В., Бут В. С. и др ; заявл. 11.04.2000 ; опубл. 20.04.2001.

97. Пат. на изобретение 2170380 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 . Способ ремонта трубопроводов / Вершинин В. Н., Хомяк В. И., Димов Л. А. ; заявл. 24.01.2000 ; опубл. 10.07.2001.

98. Пат. на изобретение 2191317 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 . Способ ремонта трубопроводов / Лапицкая Т. В., Лапицкий В. А., Кученев Д. А. ; заявл. 05.01.2001 ; опубл. 20.10.2002.

99. Пат. на изобретение 2194911 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 . Способ ремонта трубы / Нечаев Ю. В., Павлов Ю. К., Пономаренко Д. В. и др. ; заявл. 17.07.2000 ; опубл. 20.12.2002.

100. Пат. на изобретение 2211991 Российская Федерация, МПК7 F16L55/10 . Способ «Полипромсинтеза» изготовления полимерного бандажа при ремонте магистрального и технологического трубопровода / Кадай С. И., Башун В. В. ; заявл. 12.01.2001 ; опубл. 10.09.2003.

101. Пат. на изобретение 2213289 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 Способ ремонта локальных повреждений трубопроводов / Зотов В. И., Смирнов В. С., Шепелов В. Н. и др. ; заявл. 10.12.2001 ; опубл. 27.09.2003.

102. Пат. на изобретение 2219423 Российская Федерация, МПК7 F16L55/175 Полимерная муфта для ремонта труб с локальными коррозионными дефектами и способ ее установки / Шарыгин Ю. М., Теплинский Ю. А., Максютин И. В. и др. ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 20.12.2003.

103. Пат. на изобретение 2240468 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 Муфта для ремонта трубопровода и способ её установки / Шарыгин В. М., Яковлев А. Я., Воронин В. Н. и др. ; заявл. 17.04.2003 ; опубл. 20.11.2004.

104. Пат. на изобретение 2249752 Российская Федерация, МПК7 F16L55/175 Бандаж для трубопровода / Ежов В. С. ; заявл. 16.04.2003 ; опубл. 10.04.2005, бюл. № 10.



105. Пат. на изобретение 2256841 Российская Федерация, МПК7 F16L21/06 Трубная муфта и способ ее изготовления /Аленников С. Г., Воронин В.Н., Зоманцов С. В. и др. ; заявл. 28.08.2003 ; опубл. 20.07.2005, бюл. № 20.
106. Пат. на изобретение 2267691 Российская Федерация, МПК (2006) F16L55/16 . Способ ремонта действующего трубопровода с локальными сквозными дефектами и устройство для его осуществления / Бут В. С., Пришляк Ф. М., Дрогомирецкий М.Н. и др ; заявл. 26.11.2003 ; опубл. 10.05.2005, бюл. № 1.
107. Пат. на изобретение 2285192 Российская Федерация, МПК7 F16L55/18 Способ ремонта трубопровода и сварная муфта для его осуществления / Воронин В. Н., Романцов С. В., Шарыгин А. М., Шарыгин В. М. ; заявл. 08.12.2004 ; опубл. 10.10.2006, бюл. № 28.
108. Пат. на изобретение 2306476 Российская Федерация, МПК (2006) F16L55/00 Способ ремонта действующего трубопровода / Гуслиц В. М., Велиюлин И. И., Голенко Ю. В. ; заявл. 15.03.2005 ; опубл. 20.09.2007, бюл. № 26.
109. Пат. на изобретение 2327152 Российская Федерация, МПК (2006) G01N 29/04. ЭМА преобразователь / Подолян А. А. ; заявл. 18.05.2006 ; опубл. 20.06.2008, бюл. № 17.
110. Пат. на изобретение 2339030 Российская Федерация, МПК (2006) G01N 29/04. Способ формирования акустической волны / Подолян А. А. ; заявл. 22.02.2007 ; опубл. 20.11.2008, бюл. № 32.
111. Пат. на изобретение 2373638 Российская Федерация, МПК (2006) H03K 4/92 . Способ формирования колоколообразных импульсов зондирования для ЭМА преобразователя и устройство для его осуществления / Подолян А. А., Протасов А. Г., Лигомина С. Н. ; заявл. 28.05.2008 ; опубл. 20.11.2009, бюл. № 32.
112. Пат. на изобретение 2430293 Российская Федерация, МПК (2006) F16L 55/175 . Способ неразрушающего контроля качества работ при муфтовом ремонте трубопроводов / Тымчик Г. С., Подолян А. А., Пудрий С. В., Томашук А. И. ; заявл. 18.11.2010 ; опубл. 27.09.2011, бюл. № 27.
113. Пат. на изобретение 2449204 Российская Федерация, МПК (2006) F16L 55/175 . Способ муфтового ремонта трубопровода (технология предприятия КиАТОН (варианты) / Бут В. С., Пудрий С. В., Подолян А. А. и др. ; заявл. 11.01.2010 ; опубл. 20.07.2011, бюл. № 20.
114. Пат. на изобретение 2451233 Российская Федерация, МПК (2006) F16L 55/175 . Способ ремонта действующего трубопровода (варианты) /Бут В. С., Лохман И. В., Подолян А. А. и др.; заявл. 07.07.2008 ; опубл. 20.05.2012, бюл. № 14.

115. Пат. на изобретение 2563945 Российская Федерация, МПК (2012) F16L 55/175 . Способ усиления трубопровода с помощью паяно-сварной муфты / Подолян А. А. – № 2014118805; заявл. 08.05.2014 ; опубл. 27.09.2015, бюл. № 27.

116. Пат. на корисну модель 50862 Україна, МПК (2006) F16L 55/00. Спосіб ремонту трубопроводу за допомогою металевої муфти / Подолян О. О. Пудрий С. В., Томашук О. І., Бут В. С. ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, бюл. № 12.

117. Пат. на корисну модель 50863 Україна, МПК (2006) F16L 55/00. Спосіб ремонту трубопроводу що знаходиться під тиском / Подолян О. О. Пудрий С. В., Томашук О. І., Бут В. С. ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, бюл. № 12.

118. Пат. на корисну модель 50937 Україна, МПК (2006) F16L 55/00. Пристрій для неруйнівного контролю якості робіт при муфтовому ремонті / Тимчик Г. С., Подолян О. О. Пудрий С. В., Томашук О. І. ; заявл. 31.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, бюл. № 12.

119. Пат. на корисну модель 51572 Україна, МПК (2006) F16L 55/16. Спосіб оперативного контролю запресування маси, що само твердіє, у під муфтовий простір при ремонті трубопроводів / Тимчик Г. С., Подолян О. О. Пудрий С. В., Томашук О. І. ; заявл. 31.12.2009 ; опубл. 26.07.2010, бюл. № 14.

120. Пат. на корисну модель 61358 Україна, МПК (2006) F16L 55/175. Спосіб ремонту діючого трубопроводу з контролем якості робіт / Подолян О. О. Пудрий С. В., Томашук О. І. ; заявл. 13.05.2011 ; опубл. 11.07.2011, бюл. № 13.

121. Пат. на винахід 110155 Україна, МПК (2012) F16L55/175. Спосіб посилення трубопроводу за допомогою паяно-зварної муфти / Подолян О. О. – № а201404470 ; заявл. 28.04.2014 ; опубл. 25.11.2015, бюл. № 22.

122. Пат.на винахід 98601 Україна, МПК (2006) F16L 55/175. Спосіб посилення трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням з контролем якості робіт (варіанти) / Подолян О. О., Пудрий С. В., Томашук О. І. та ін. ; заявл. 30.03.2012 ; опубл. 25.05.2012, бюл. № 10.

123. ПБ 03-576-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Введен. 11.06.2003 – Госгортехнадзора РФ , утвер. 11 июня 2003 г.

124. Петухов Г. Б. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем / Г. Б. Петухов, В. И. Якунин. – М. : АСТ, 2006. – 504 с.

125. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов/ Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев , В.В. Матвеев. – Киев,Наукова думка,1988 – 736 с.

126. Платонов А. Н. Прочность трубопровода в зоне установленной ремонтной муфты: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ». / А. Н. Платонов– Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2005. — 20 с.

127. Подолян А. А. Технология повышения прочности участков действующего магистрального трубопровода с помощью паяно-сварных муфт / Г. С.Тымчик, А. А. Подолян // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2015 – Вип. 2 – С. 97–103.

128. Подолян А. А. Технология ремонта дефектных участков действующего магистрального трубопровода с помощью паяно-сварных муфт / Г. С.Тымчик, А. А. Подолян // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2016 – Вип. 2 – С. 94–95.

129. Подолян А.А. Theoretical investigations of the generation of an ultrasonic wave by an electromagnetic acoustic transducer / Г. С.Тымчик, А. А. Подолян // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2018 – Вип. 2 – С. 84–92.

130. Подолян А. А. Формирование магнитного поля с заданными характеристиками в ЭМА преобразователях систем неразрушающего контроля промышленного оборудования / Подолян О.О. // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ : Вид-во Ів.-Франковського нац. техн. ун-ту нафти і газу, 2006, вип. 17. – С. 18–21.

131. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. / А. И. Половинкин – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

132. Попков А.С. Мировые и отечественные тенденции развития муфтовых технологий ремонта трубопроводов / А. С. Попков, В. М. Шарыгин // Аналитик, 2009. – Сб. научн.-техн. обзоров. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – С. 27–66.

133. Правила производства капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов. ВСН 2-112-79. – Москва: ВНИИСТ, 1973, стр. 34-35 – врезание катушек

134. Правила техники безопасности при строительстве магистральных стальных трубопроводов. – М. : Недра, 1972 – 160 с.

135. Проведення натурних випробувань ефективності клеєзварних муфт на трубопроводі : звіт про НДР / ІЕЗ ім. Е. О. Патона ; керівник роботи В. С. Бут ; автори В. С. Бут, С. В. Пудрий, О. О. Подолян та ін.; Держ. реєстр. № 0112 U003232. – Київ, 2012. – 48 с.

136. РД 153-39.4.-067-04. Методы ремонта дефектных участков действующих магистральных нефтепроводов. Введ. 10.03.2004. – ОАО «АК «Транснефть», Утв. 10.03.2004. – 28 с.

137. РД-93.010.00-КТН-114-07. Правила производства и приемки строительно-монтажных работ. Магистральные нефтепроводы. Введ. 14.05.2007. – ОАО ВНИИСТ, ООО «Институт ВНИИСТ», Утв. 14.05.2007.

138. Реклама British Gas p/c Ripley Road, Ambergate, Derbyshire, DE 562 FZ.

139. Реклама фирмы Т. Д. Вильямс . Врезка под давлением. TDW – 24 с.

140. Реутов Ю. Я. О возможностях использования программы. ELCUT в расчётах по дефектоскопии/ Реутов Ю. Я., Гобов Ю. Л., Лоскутов В. Е. // Дефектоскопия. – 2002, № 6, с. 59–71.

141. Розгонюк В.В. Трубопровідний транспорт природного газу./ В. В. Розгонюк –К.: «Кий», 2008. – с. 238.

142. Ромянецев С.В. Разработка конструкции стеклопластиковых муфт и методов расчёта их работоспособности при ремонте газопроводов: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ». /С. В. Ромянецев– М: Ухтинский государственный технический университет, 2006. – 20 с.

143. Руководство по проведению ресурсных испытаний труб, отремонтированных с применением муфтовых и сварочных технологий. М.: ОАО «Газпром», ООО «ВНИИГАЗ», Утв. 30.11.2005.

144. Сазонов Ю.И. Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний: Ультразвуковые методы контроля. / Ю. И. Сазонов , Ю. М. Шкарлет // Дефектоскопия. – 1969, вып. № 5 – С. 6.

145. Свод правил по производству сварочных работ и контролю качества сварных соединений : СП 105-34-96. – Введн. 1.10.1996. – Утвержд. РАО «Газпром» 11.09.1996.

146. Сборник нормативно-технических документов. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. – М.:ВНИИСТ 1988. – 272 с.

147. Семеген М. М. „Дослідження напружено-деформованого стану газопроводів акустичним методом / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Вісник хмельницького національного університету – 2010. – № 3(155). – С. 52–55.

148. Семеген М. М. ,Удосконалення акустичного методу контролю для визначення перерозподілення напружень на ділянці трубопроводу / М. М. Семеген, З. П. Лютак, Б. В. Костів // Вісник хмельницького національного університету – 2012. – № 4. – С. 22–26.

149. Семеген М. М. Визначення напружено-деформованого стану трубопроводів на ремонтних ділянках / М. М. Семеген, З. П. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 21. – С. 43–47.

150. СНиП 2.05.06-85. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы [Затверджені та введені в дію на території України з 1 січня 1999 року наказом Держбуду України від 03.12.98 р. N 279] – М.:ВНИИСТ, 1986 – 64 с.

151. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. / Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с

152. Старовойтов Э. И. Сопротивление материалов./ Э. И. Старовойтов — М. : Физматлит, 2008. — 384 с.

153. Технические свойства полимерных материалов: учебно-справочное пособие / Под ред. В. К. Крыжановского – СПб., 2005. – 248 с.

154. Технологічна інструкція з ремонту магістральних газопроводів під тиском з застосуванням дугового зварювання: – К.: ДК «Укртрансгаз», 2000. – 96 с.

155. Технологічний регламент підвищення несучої здатності труби та категорійності ділянок магістральних газопроводів методом встановлення металевих муфт: – К. : ДК «Укртрансгаз», 2008. – 37 с.

156. Технологическая инструкция. Муфты ремонтные. Герметизация подмуфтового пространства полиуретановым составом. Введ. 15.03.2006 – Утв. Первым заместителем председателя совета директоров ДК Укртрансгаз НАК Нафтогаз Украины В. Н. Нолемеевым 15.03.2006 – 14 с.

157. ТУ 4834-029-04046341-07. Муфты приварные для ремонта действующих трубопроводов: Введ. 07.02.2007. — Утв., ген. директор ОАО «Белебеев-ский механический завод» Р. Ю. Хасанов-02.02.2007. – 16 с.

158. ТУ В 22887593.006-2000. Ремонт магистральных и технологических трубопроводов композитными усиливающими бандажами. Каталог «Полипром-синтез ЛТД», 2000.

159. Тымчик Г.С. Анализ возможности использования магнитного метода неразрушающего контроля при муфтовом ремонте магистральных газопроводов : зб. тез доповідей за матеріалами Х-ої міжнародної науково-технічної конференції

«Приладобудування 2011: стан і перспектививи». м. Київ, 19–20 квітня 2011 р. / Тымчик Г. С., Подолян А. А. – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2011. – С.187–188.

160. Тымчик Г.С. Использование ультразвукового метода неразрушающего контроля при муфтовом ремонте магистральных трубопроводов : сб. тезисов докладов по материалам по материалам 4-ой международной студенческой научно-технической конференций «Новые направления развития приборостроения». г. Минск, 20–22 апреля 2011г. / Тымчик Г. С., Подолян А. А. – Минск : Ред. Белорусского нац. техн. ун-та, 2011, Т. 1 – С. 65.

161. Тымчик Г. С. Контроль качества работ по повышению категоричности магистральных газопроводов : зб. тез доповідей за матеріалами IX-ої міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування 2010: стан і перспектививи». м. Київ, 27–28 квітня 2010р. / Тимчик Г. С., Подолян А. А. – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2010. – С. 231–232.

162. Тымчик Г. С. Контроль качества работ при муфтовом ремонте магистральных газопроводов / Тымчик Г. С. Подолян А. А. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія приладобудування. – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2010, вип. 39 – С. 64–70.

163. Тымчик Г.С. Неразрушающий контроль при муфтовом ремонте магистральных трубопроводов : сб. тезисов докладов по материалами XXVI-ой международной конференции «Дефектоскопия '11». г. Созополь, 13–17 июня 2011 г. / Тымчик Г. С., Подолян А. А. – Созополь : Ред. Научные известия, НТСМ, 2011. – С. 342–345.

164. Тымчик Г. С. Система контроля качества монтажа клесварной муфты на магистральном газопроводе высокого давления газопроводов / Тымчик Г. С. Подолян А. А. // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2012, вип. 6 – С. 138–144.

165. Тымчик Г. С. Формирование импульсов специальной формы для электромагнитных акустических преобразователей / Тымчик Г. С. Подолян А. А. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія приладобудування. – Київ : Вид-во НТУУ «КПІ», 2013, вип. 45 – С.

166. Тымчик Г. С. Формирования импульсов зондирования для возбуждения акустической волны с помощью электродинамического или электромагнитного преобразователя : сб. тезисов докладов по материалам по материалам

3-ей международной студенческой научно-технической конференций «Новые направления развития приборостроения». г. Минск, 21–23 апреля 2010 г. / Тымчик Г. С., Подолян А. А. – Минск : Ред. Белорусского нац. техн. ун-та, 2010. – С. 121.

167. Тымчик Г. С. Экспериментальные исследования эффективности усиления участка трубопровода высокого давления муфтой с внутренним наполнением / Тымчик Г. С., Подолян А. А., Пудрий С. В. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – Москва: Издательство «Машиностроение», 2013, вып. 4 – С. 35–39.

168. Уёмов А. И. Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978. — 272 с.

169. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов./ Феодосьев В.И. — 10-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. — Т. 2. — 592 с.

170. Хубка В. Теория технических систем./ Хубка В. – М. Мир, 1987. – 202 с.

171. Худякова Л. П. Напряженное состояние ремонтных муфт/ Худякова Л. П., Мельникова Н. А. // НТЖ «Нефтегазовое дело», 2006, Т. 4., Вып. № 1. – С. 287.

172. Хусанов М. Х. Магнитографический контроль сварных швов./ Хусанов М. Х. – М. : Недра, 1973. – 216 с.

173. Чирков Ю. А. Напряженно-деформированное состояние трубопровода при ремонте методом бандажирования. / Ю. А. Чирков // Вестник Оренбургского государственного университета, 2004, вып. № 5. – С. 85–89.

174. Чучакин Л. А. Приборный контроль за состоянием газопроводов и газового оборудования (Библиотека мастера газового хозяйства) / Л. А. Чучакин, Н. Е. Тверитин. Л: Недра, 1986. – 167 с.

175. Шмаков В. А. Работоспособность трубопроводов с накладными усилительными элементами / Шмаков В. А., Гумеров А. К., Хайрутдинов Ф. Ш., Чахеев А. Л. // Нефтегазовое дело, 2007, вып. № 5. – С. 245.

176. Шпичинецкий Е. С., Свинцовые сплавы / Е.С. Шпичинецкий //в кн.: Справочник по машиностроительным материалам, т. 2 – М., 1959.

177. Шубаев С. Н. Электромагнитно-акустическое преобразование в плоской металлической пластине / С. Н. Шубаев // Дефектоскопия. – 1975, вып. № 6 – С. 32–43.

178. Шульгин В. А. Эффект связанности электромагнитных и упругих волн при электромагнитно-акустическом возбуждении радиальных колебаний в

металлических стержнях/ Шульгин В. А., Кулеев В. Г. // Дефектоскопия. – 1982, № 7 – С. 29–40.

179. Щербинский В. Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений./ Щербинский В. Г., Алешин Н. П. — 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 496 с.

180. Яворский Б. М. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов. / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф – М. : Наука, 1978 – 944 с.

181. Якубовский Ю. Е. Проблемы прочности трубопроводного транспорта/ Якубовский Ю. Е., Малюшин Н. А., Якубовская С. В., Платонов А. Н. – СПб.: Недра, 2003. – 200 с.

182. Якубовский Ю. Е., Донкова И. А. Осесимметричная деформация составных цилиндрических оболочек // Проблемы эксплуатации и ремонта промышленных и магистральных трубопроводов: Сб. науч. трудов. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 1999. – С. 102–108.

183. Якубовский Ю. Е., Кривчун Н. А. Определение интегральных характеристик жесткости тонкостенных конструкций из разнсопротивляющихся материалов // Проблемы эксплуатации и ремонта промышленных и магистральных трубопроводов: Сб. науч. трудов. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 1999. – С. 108–114.



Наукове видання

Подолян Олександр Олександрович  
Тимчик Григорій Семенович

# Контроль якості монтажу муфт на магістральний трубопровід

Монографія

*Комп'ютерне верстання Т. В. Дунайської-Олійник*

*В авторській редакції*

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.  
просп. Перемоги, 37,  
м. Київ, 03056

Темплан 2020 р., поз. 3-1-003

Підп. до друку 21.02.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – ризографічний. Ум. друк. арк. 10,46. Обл.-вид. арк. 17,40. Наклад 20 пр.  
Зам. № 20-025.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського  
вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
м. Київ, 03056  
тел. (044) 204-81-78