

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»  
Освітньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс  
автомобілів»

на тему: «Підвищення ефективності технології зварювання  
полімерних матеріалів»

Шифр ***MPTAM 2318094. 000 ПЗ***

Виконав: студент 2-го курсу, група МТВАм 22-1



Н.Г. Доценко  
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф. ТАМ.*



О.П. Бабак  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*



О.В. Диха  
Ініціали, прізвище

7 12 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

21 жовтня 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Доценку Назору Геннадійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема проекту (роботи)

Підвищення ефективності технології зварювання полімерних матеріалів

керівник проекту (роботи) Бабак Олег Петрович к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, ім'я звання

Затверджено наказом університету від 15 серпня 2023р. № 28 (Д30)

2. Строк подання студентом проекту на кафедру 10 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніка – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Огляд стану питання; 2 Підвищення ефективності устаткування для зварювання полімерних трубопроводів; 3 Підвищення ефективності технології зварювання полімерних труб

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання\_---


**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Прим.
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2023</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10.2023</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11.2023</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11.2023</i>	
5	<i>Оформлення презентації магістерської роботи</i>	<i>1.12.2023</i>	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	<i>5.12.2023</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.12.2023</i>	

Студент

Керівник проекту (роботи)

  
 Іванів  
 Іванів

  
 Доценко Н.І.  
 Інженер, керівник

  
 Бабак О.І.  
 Інженер, керівник

## Реферат

Робота на тему: «Підвищення ефективності технології зварювання полімерних матеріалів»

Обсяг пояснювальної записки – 82 сторінок, кількість рисунків - 52, таблиць - 5, додатків, кількість джерел згідно із переліком посилань - 23.

Для того, щоб з'єднати нагріті поверхні труб, що зварюються, необхідно їх стиснути, але для цього потрібно переривати подачу тепла, щоб відвести нагрівальний елемент. Тому процес нагрівання носить переривчастий характер.

Параметри режиму зварювання впливають на структуру матеріалу в зоні шва, що, згодом, значно впливає на надійність звареного з'єднання в процесі експлуатації трубопроводу. Вважається, що режими зварювання забезпечують якісні характеристики одержуваного з'єднання.

Таким чином, по причини сильного зношування промислових трубопроводів, а також через необхідність підвищення їх надійності в процесі експлуатації, актуальним є проведення досліджень, спрямованих на розвиток у нафтовій і газовій галузях транспортування середовищ по трубах з полімерних матеріалів. Також потрібна розробка рекомендацій зі способів застосування таких трубопроводів.

У нормативній документації по зварювання поліетиленових труб в стик зазначений температурний діапазон (від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ ), що забезпечує можливість проведення зварювання без додаткових заходів. Міцність звареного з'єднання забезпечується дотриманням теплового режиму.

При температурах навколишнього повітря нижче значення, зазначеного в нормативних документах зварювання дозволено проводити при використанні опалювальних конструкцій. Однак зведення таких конструкцій зв'язане трудомісткими роботами, а їх використання пов'язане з більшими енергетичними витратами. Крім того, тимчасові витрати при аварійних випадках не припустимі.

Враховуючи вищесказане, актуальністю напрямку варто визнати розробку математичної моделі теплових процесів, що виникають при зварюванні труб з поліетилену. При цьому математична модель повинна враховувати основні процеси, що впливають на температурні показники зварювання та забезпечувати обґрунтування розширення при зварюванні припустимих температур навколишнього повітря.

Ціль магістерської роботи – підвищення продуктивності і якості виконуваних робіт при ремонтних і монтажному зварюванні полімерних трубопроводів на основі вивчення теплових і фізичних процесів у з'єднанні, що зварюється.

Перелік ключових слів: ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ, ВИВЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ І ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ТРУБОПРОВІД, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ.....	9
1.1 Аналіз полімерних матеріалів для будівництва магістральних трубопроводів.....	9
1.2 Використання поліетиленових трубопроводів у газовій галузі.....	12
1.3 Розвиток технології з'єднання полімерних труб.....	14
1.4 Огляд способів зварювання полімерних труб.....	19
1.5 Завдання дослідження та методи їх рішення.....	29
2 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	31
2.1 Опис операцій технологічного процесу.....	31
2.2 Опис устаткування.....	35
2.3 Компонувальна схема установки для зварювання магістрального трубопроводу з полімерних труб.....	38
2.4 Проблема зварювання полімерних труб при знижених температурах.....	43
2.5 Опис технічного рішення проблеми.....	47
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ.....	52
3.1 Параметри процесу зварювання полімерних труб.....	52
3.2 Загальні відомості по методиках контролю.....	56
3.3 Методика візуально-вимірювального контролю.....	58
3.4 Методика випробування на осьове розтягування.....	63
3.5 Методика контролю якості з використанням ультразвуку.....	67

<b>MP TAM 23.18094.000 ПЗ</b>						
Змн	Арк.	№ докум.	Титул	Дат.		
Розроб.		Доценко	<i>Підвищення ефективності технології зварювання полімерних матеріалів</i>	Лист	Арк.	Акривіла
Перевір.		Бабак			4	87
Реценз.				ХНУ група МТВАм 22-1		
Н. Контр.		Маковкін				
Затверд.		Духа				

3.6 Методика випробування на статичний вигин.....	68
3.7 Поліпшена методика для випробувань на осьове розтягання.....	70
ВИСНОВОК.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	84
ДОДАТОК.....	87

					<i>MP TAM 23.18094. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

## ВСТУП

Система промислових трубопроводів в Україні є однією з самих розвинених у Європі. Про це свідчить той факт, що сумарна протяжність трубопроводів нафтової та газової промисловості – більш 50 тисяч км.

Однією з поточних проблем трубопроводів – є їхній високий ступінь зношування. Дана проблема пов'язана з високим віком трубопровідних систем – основні магістралі будувалися 30-50 років тому.

Інша проблема зношування трубопроводів – агресивний вплив на метал середовища, що транспортується. Так, по статистиці, на нафтових трубопроводах у результаті корозійної деградації щорічно походить від 10 до 40 тисяч відмов. Кожна відмова трубопроводу спричиняє не тільки необхідність виконання котлованів, але й завдає шкоди екології. У літературних джерелах зазначено [1], що зношування нафтових трубопроводів досягло значення 60 %.

У даний момент на нафтогазовий сектор України діють наступні негативні зовнішні фактори:

1) ріст курсу іноземної валюти, що робить досить дорогим здійснення ремонту та заміни труб із застосуванням іноземного устаткування й матеріалів;

2) зменшення біржової вартості енергоносіїв, що змушує знижувати собівартість робіт з підтримки життєздатності та введенню в експлуатацію нових об'єктів газонафтового комплексу;

3) дія обмежень на поставку в Україні інтелектуальних технологій, що вимагає застосування вітчизняних розробок;

Останнім часом у нафтогазовій галузі починають набирати популярність труби з полімерних конструкцій. При цьому вже існують наступні варіанти із застосування – напірні системи, викидні лінії, колектори, інфраструктурні

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

інженерні системи.

Використання полімерних матеріалів дозволяє досягти таких корисних ефектів, як зниження матеріалоемності, скорочення тимчасових витрат на будівництво, підвищення екологічності, економія інших матеріалів.

Дослідженням у даній темі займаються такі вчені, як Моїсеєв Ю.В., Удовенко В.Е., Поспелов А.М, Шухов В.Г., Агапчев В.І., Ромейко В.С., Каргін В.Ю., Бажанов В.Л., Кисельов. Б.А., М.Н. Боктицкий, Шевченко А.А., Капустін К.Я., А.Н. Громов, Рейтлингер С.А. і інші.

При будівництві трубопроводів з поліетилена основним техпроцесом, що забезпечують надійність транспортування середовищ є зварювання. При цьому для плавлення та зварювання труб найчастіше використовується інструмент, що нагріває. Нагрівання поверхонь, що зварюються, труб здійснюється шляхом їхнього фізичного контакту з поверхнею інструмента, що нагрівається.

Для того, щоб з'єднати нагріті поверхні труб, що зварюються, необхідно їх стиснути, але для цього потрібно переривати подачу тепла, щоб відвести нагрівальних елемент. Тому процес нагрівання носить переривчастий характер. Одержання зварного шва полімерних труб можна розділити на 3 етапу [2]: забезпечення нагрівання поверхонь труб, технологічна пауза для відводу нагрівального інструмента, формування шва шляхом здавлювання деталей і витримування з під тиском у перебігу часу, що забезпечує охолодження й релаксаційні процеси в з'єднанні.

Параметри режиму зварювання впливають на структуру матеріалу в зоні шва, що, згодом, значно впливає на надійність звареного з'єднання в процесі експлуатації трубопроводу [3-4]. Вважається, що режими зварювання забезпечують якісні характеристики одержуваного з'єднання [5-6].

Таким чином, по причини сильного зношування промислових трубопроводів, а також через необхідність підвищення їх надійності в

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

процесі експлуатації, актуальним є проведення досліджень, спрямованих на розвиток у нафтовій і газовій галузях транспортування середовищ по трубах з полімерних матеріалів. Також потрібна розробка рекомендацій зі способів застосування таких трубопроводів.

Однак використання даної технології зварювання в холодному кліматі утруднене. Це пов'язане з тим, що у випадку низької температури навколишнього повітря відсутня технологія одержання надійних зварювальних з'єднань.

У нормативній документації по зварювання поліетиленових труб встик зазначений температурний діапазон ( від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ ), що забезпечує можливість проведення зварювання без додаткових заходів. Міцність звареного з'єднання забезпечується дотриманням теплового режиму.

При температурах навколишнього повітря нижче значення, зазначеного в нормативних документах зварювання дозволено проводити при використанні опалювальних конструкцій. Однак зведення таких конструкцій зв'язане трудомісткими роботами, а їх використання пов'язане з більшими енергетичними витратами. Крім того, тимчасові витрати при аварійних випадках не припустимі.

Враховуючи вищесказане, актуальністю напрямку варто визнати розробку математичної моделі теплових процесів, що виникають при зварюванні труб з поліетилену. При цьому математична модель повинна враховувати основні процеси, що впливають на температурні показники зварювання та забезпечувати обґрунтування розширення при зварюванні припустимих температур навколишнього повітря.

Ціль магістерської роботи – підвищення продуктивності і якості виконуваних робіт при ремонтних і монтажному зварюванні полімерних трубопроводів на основі вивчення теплових і фізичних процесів у з'єднанні, що зварюється.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

# 1 ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ

## 1.1 Аналіз полімерних матеріалів для будівництва магістральних трубопроводів

З розвитком матеріалознавства при будівництві нафтогазових магістралей і ремонті старих трубопроводів усе частіше застосовуються полімерні матеріали.

Використання полімерних матеріалів дозволяє досягти таких корисних ефектів, як зниження матеріалоемності, скорочення тимчасових витрат на будівництво, підвищення екологічності, економія інших матеріалів (наприклад, пально-мастильних).

Порядок застосування полімерних труб у системах газопостачання, основні положення по безпеці їх використання описані в нормативно-правовій документації [7].

Практика використання поліетилену для газових трубопроводів з робочим тиском до 1,2 МПа показала гарні результати. Це пов'язане з тим, що поліетилен має низьку газопроникність, стійкість до корозії, високою еластичністю, удароміцністю при температурах 20...+30 С<sup>0</sup>, надійністю з'єднання, економічністю та екологічністю виготовлення елементів труб і сполучних муфт, простотою монтажу труб.

У порівнянні з іншими термопластами поліетилен має найкращу тривалу міцність при експлуатаційній температурі до +30 С<sup>0</sup> [8].

Агресивний вплив середовищ на полімерну основу композиційного матеріалу приводить до виникнення таких процесів, як окиснення, гідроліз, гідратації. Ці процеси мають свої особливості, пов'язані з гетерогенністю системи. Початок руйнування має місце на поверхні роздязнула « полімеронаповнювач» і викликане зниженням їх адгезійних якостей, зниження зв'язку між ними. При цьому вплив середовища може сприяти до вимивання

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

сполучного матеріалу. Два ці процеси порушують структуру композиційного матеріалу.

Нижче представлені дифузійні коефіцієнти, коефіцієнти проникності, розчинність газів термопластах (таблиця 1.1). Для органічних газів аналогічні показники представлено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти впливу газів на різні термопласти при температурі 20 ° С [8]

Вид термопласта	Показник	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Поліетилен високого тиску	D·10 <sup>10</sup>	0,46	0,37	-	0,33
	P·10 <sup>17</sup>	1,9...2,6	7,3...12,2	5,7	0,25
	S·10 <sup>7</sup>	4,8	25,8	-	-
Поліетилен низкого тиску	D·10 <sup>10</sup>	0,17...0,2	0,12	-	-
	P·10 <sup>17</sup>	0,3...0,5	2,8...4,2	1,3...1,4	0,075
	S·10 <sup>7</sup>	1,8	2,2	-	-
Поліпропілен	P·10 <sup>17</sup>	0,76...1,1	3,0...5,0	4,1...12,3	0,009
Полівінілхлорид	D·10 <sup>10</sup>	0,004...0,012	0,0012	2,3...2,74	0,0014
	P·10 <sup>17</sup>	0,034...0,09	0,1...0,76	-	-
	S·10 <sup>7</sup>	2,92	47,7	-0,06	-
Полівінілденхлорид	P·10 <sup>17</sup>	0,002...0,004	0,012...0,022	-	-
Полівінілфторид	D·10 <sup>10</sup>	0,03	0,0013	0,06	0,023
	P·10 <sup>17</sup>	0,002...0,015	0,09...0,068	-	-
	S·10 <sup>7</sup>	0,09	0,5	0,266	-
Полістирол	D·10 <sup>10</sup>	0,11	0,058	-	-
	P·10 <sup>17</sup>	1,1...1,52	5,7...6,8	4,36	-
				6,9 11,3	0,29

Якщо розглядати органічні гази (таблиця 1.2), то проникність поліпропілену в 2... 3 рази менше, чим у поліетилена.

При росту температури газу проникність і поліетилена та пропилену збільшується. Але для поліпропілену проникність однаково нижче.



використовуваного для газових трубопроводів. Дане виробництво було відкрито близько 20 років тому. Дана компанія покриває близько 40 % потреб у матеріалі в європейській частині ринку і порядку 10 % світових потреб. Продукція «Fina Chemicals» задіяна на виробництві газових поліетиленових труб у більшості країн, що будують нові газопровідні системи. При цьому програма випробувань виробленої продукції відповідає вимогам, з а пропонуваних такими газовими компаніями, як «British Gas», «Gas de France» і ін. [11].

Компанія «Solvay» є виробником поліетилену високої, а також середньої щільності марок ELTEX TUB. Виробництво здійснюється по власній запатентованій технології, заснованої на використанні каталізаторів Циглера-Натта (виробництво Франції, Бразилії, Італії, США) і процесу Філіпса на хромовому каталізаторі (виробництво США й Бельгія). Зараз дані виробництво входить до складу компанії компанією Wienerberger [12].

Усі марки ELTEX TUB відрізняються простотою переробністю на устаткуванні таких закордонних фірм, як («Battenfeld», «Rayfenhoyzer», «Krauss Maffei», «Cincinnati Milakron», «Weber» ) [13].

Крім труб тут виробляються муфти, різних розмірів і фітинги. Труби зроблені з поліетилену мають стійкість до утворення тріщин, високий ресурс роботи, стійкість до розкладання від світла. Примітно, те при коефіцієнті безпеки більше двох, труба витримує номінальне значення напруги при розтріскуванні 5 МПа протягом не менш 20 років.

## 1.2 Використання поліетиленових трубопроводів у газовій галузі

Завдяки розвитку матеріалознавства й зокрема виробництва пластмас учені почали розглядати можливість застосування поліетилену для

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

виробництва нафтових і газових трубопроводів [20, 21].

Пізніше в 1964 році був прокладений газовий трубопровід загальної довгої порядку 1460 м, який розташовувався близько міста Івано-Франківська. Даний трубопровід розрахований на використанні при середньому тиску газу. При його будівництві використовувалися труби довжиною 30 метрів, діаметр яких становив 100 мм. З'єднання труб здійснювалося з використанням муфт [22].

Трохи пізніше в 1965 році був уведений в експлуатацію газовий трубопровід загальної довжини 1150 метрів діаметр труб (200 мм). Даний трубопровід розташований поблизу міста Чоп. Однак при будівництві даного газопроводу температура навколишнього повітря була нижче припустимою. Тому були прийняті додаткові заходи щодо пристрою тепляка, завдяки чому температуру вдалося підвищити до прийнятних значень 12... 18 °С [23].

На момент 2000 р. в Україні в експлуатацію було введено порядку 11 тисяч км трубопроводів з поліетилену [24].

Одночасно із цим не зупинялися й дослідження із трубопроводів із пластмас у промислових транспортних системах [25].

Останнім часом при виробництві трубопроводів для нафти й газу стали застосовуватися стійкі до агресивного впливу середовищ матеріали – склопластик, поліетилен і т.д.

Так у Закарпатті введений в експлуатацію газовий трубопровід діаметром 160 мм і загальної довжини 12 кілометрів матеріалом якого служить поліетилен: марка труб ПЕ 80GA3 SDR11(UJCN 50838).

Пропускна здатність газового трубопроводу рівна 0,7 мільйонів м<sup>3</sup>/рік.

У цьому випадку зварювання труб з поліетилену виконувалася встик. При зварюванні деталі, що з'єднуються (труби й муфти) стискувалися під тиском 200 КПа [25].

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

### 1.3 Розвиток технології з'єднання полімерних труб

У нормативній документації [14] по зварювання поліетиленових труб встик зазначений температурний діапазон ( від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ ), що забезпечує можливість проведення зварювання без додаткових заходів. Міцність звареного з'єднання забезпечується дотриманням теплового режиму. При температурах навколишнього повітря нижче значення, зазначеного в нормативних документах зварювання дозволено проводити при використанні опалювальних конструкцій. Однак зведення таких конструкцій зв'язане трудомісткими роботами, а їх використання пов'язане з більшими енергетичними витратами.

У роботі [15] використовується метод попереднього прогріву для скорочення зазору між фітингом (муфтою) і трубою за рахунок розширення фітинга. Під час попереднього прогріву в зоні контакту труба-фітинг створюється температура нижче температури плавлення поліетилену.

Недоліком такого технічного рішення є те, що створити такий тепловий вплив, що діє локально безпосередньо на поверхню труби, можливо лише за допомогою фітинга з відкритою нагрівальною спіраллю. Тому метод не застосуємо з фітингами із закритою нагрівальною спіраллю, а також дане технічне рішення незастосовне для зварювання при температурах нижче регламентованих без будівництва спеціального спорудження.

Одним з головних показників, що забезпечують вибір режимів зварювання труб з поліетилену є забезпечення границь зони термічного впливу (ЗТВ). Цим же показником керуються й при оцінці якості з'єднання.

ЗТВ – ця та область у якій відбуваються структурні зміни матеріалу під дією температур. У цей час ЗТВ визначається досвідченим шляхом, з наступним дослідженням структурних показників. Звичайно ухвалюють, що структурні зміни відбуваються при температурах вище температури розм'якшення матеріалу [16, 17].

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

У пропонованім технічній рішенні [18] очищення й циклювання від забруднень, що зварюються поверхонь, установка й закріплення кінців, що зварюються труб у затискачах центрувального пристрою з одночасною посадкою деталі із заставним нагрівачем. Перед проведенням зварювання на відрізки полімерних труб і деталь із заставним нагрівачем намотують теплоізоляційний матеріал, товщину якого визначають розрахунковим шляхом з умови забезпечення такого ж темпу охолодження з'єднання в діапазоні температур навколишнього повітря від + 50°C до -15°C, як і при припустимих температурах навколишнього повітря без теплоізоляції. Деталь із заставним нагрівачем підключають до джерела живлення для попереднього прогріву. Тривалість і потужність прогріву знаходять розрахунками теплового процесу зварювання з умови досягнення однорідного розподілу заданої температури в деталі із заставним нагрівачем і трубі.

Після прогріву, під час технологічної паузи до клем муфти перемикаються струмопідводячі проведені від зварювального апарата. Зчитувальним олівцем зварювального апарата проводиться зчитування штрих-коду й запуск зварювання, при цьому датчик температури перебуває в середовищі, де температура підтримується рівної значенню заданої температури. Після запуску зварювання деталей, що з'єднуються, проходить в автоматичному режимі, а охолодження звареного з'єднання відбувається в надягнутій на зварене з'єднання теплоізоляційній сорочці.

Для муфтового зварювання труб з поліетилену ПЕ 80 ГАЗ SDR11 63×5,8 ДСТУ 50838-95 при нормованих температурах, наприклад при +20°C тривалість оплавлення становить близько 70 сек. Перед проведенням зварювання на відрізки поліетиленових труб і муфту встановлюють теплоізоляційний матеріал товщиною 3 м м . Товщину теплоізоляції одержують за допомогою розрахунків шляхом порівняння режимів остигання при припустимих і низьких температурах.

Тривалість прогріву визначають із умови, що середня температура

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



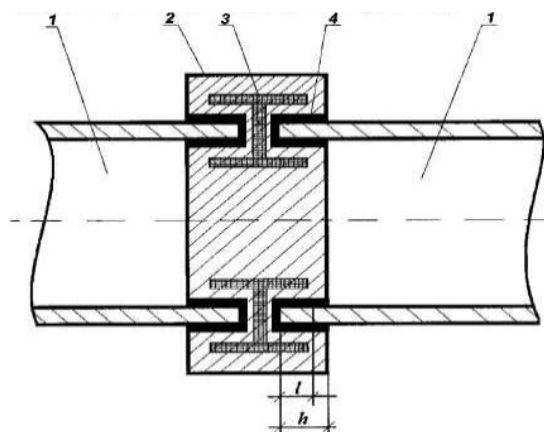
поверхню труб. Потім проводиться мехобробка торців деталей. Її виконання необхідне для того, щоб забезпечити зняття окисненого шару матеріалу й щільне прилягання деталей. Кінці деталей 1 підводять до нагрітого оснащення 2, яка містить джерело тепла - елемент 3. Деталі уводяться в кільцеву проточку оснащення 4. При цьому важливо, що глибина  $h$  введення деталей більше довжини  $l$  зони термічного впливу.

Для забезпечення кращого контакту з деталями, що зварюються, проточка оснащена еластичними елементами.

Поверхня інструмента, що нагріває, має регламентовану температуру. При цьому деталі необхідно витримувати в проточці оснащення до досягнення температури кінців труб необхідного значення.

Тривалість витримування деталей в оснащенні визначається також однорідністю розподілу температури в ЗТВ.

Як тільки в кінцях деталей, що зварюються, буде сформований необхідний температурний розподіл – нагрівальна острашка віддаляється. Після цього за допомогою іншого інструмента проводиться оплавлення торців, що зварюються деталей. Після видалення інструмента торці деталей, що зварюються, з'єднують і витримують під тиском у перебігу часу, необхідному для остигання звареного шва.



1- труби, що зварюються; 2- нагрітий інструмент; 3- нагрівальний елемент; 4- проточка з еластичними елементами

Рисунок 1.1 – Складання під зварювання

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP TAM 23.18094. 000 ПЗ				

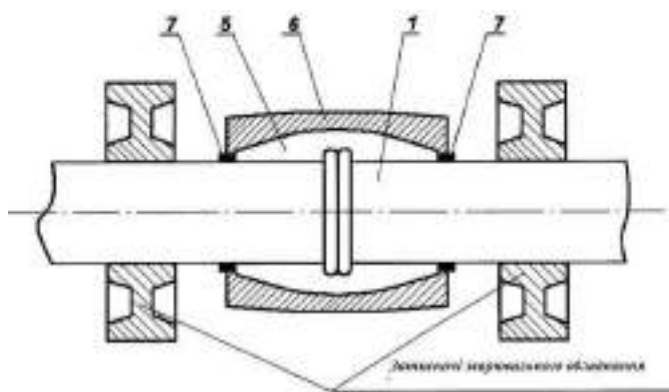
Для того, щоб забезпечити режимну швидкість охолодження звареного шва застосовуються додаткові заходи (рис. 1.2). Ці заходи полягають у теплоізоляції шва. Для цього з'єднання поміщають у замкнений простір 5, що полягає з теплоізоляційного матеріалу 6. Температура в даному просторі підтримується за допомогою нагрівальних елементів і власного тепла звареного шва.

Зазор між теплоізоляцією й трубою герметизують еластичним матеріалом 7.

Таке технічне рішення дозволяє проводити зварювання поліетиленових труб при будь-якій температурі навколишнього повітря, тому що в кожному разі забезпечується необхідна швидкість остигання й релаксаційні процеси в зоні з'єднання.

При цьому одержувані якісні характеристики звареного з'єднання відповідають характеристикам одержуваним при регламентованому температурному інтервалі, передбаченою відповідною документацією.

Однак даний спосіб зварювання має й недоліки. Так, наприклад, необхідність проведення додаткових заходів приводить до вкриття зварювання теплоізоляційним матеріалом вимагає додаткових тимчасових витрат і приводить до подовження технологічного процесу одержання з'єднання.



1 – труби, що зварюються; 5 – камера обмеженого обсягу; 6 – теплоізолюючий матеріал; 7 – еластичний матеріал

Рисунок 1.2 – Зварювання полімерних труб

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

#### 1.4 Огляд способів зварювання полімерних труб

Полімерні труби й деталі з'єднують між собою за допомогою зварювання, кінцевим результатом якої є нероз'ємне з'єднання, рівно міцні (або близьке по міцності) основному матеріалу. Зварене з'єднання формується завдяки введенню в зону зварювання певних видів енергії (тепловий, деформаційної) і в деяких випадках її перетворення, а також руху або перетворення речовини. Характер енергії й інтенсивність її перетворення визначають клас і вид зварювання.

Поділ зварювання по її типах залежить від механізму впливу на вихідний матеріал. Для полімерних технологій виділяють два типи зварювання: теплове зварювання й хімічне зварювання.

Зварювання, яке в основі має зближення макромолекул полімеру й виникнення фізичної взаємодії між ними, називається тепловим зварюванням, зварюванням плавленням, або дифузійно-реологічні. Для її здійснення необхідно перевести матеріал у вязкотекучий стан (одержати грузлий розплав) і забезпечити його плин. У побуті під терміном «зварювання» найчастіше мають на увазі саме процес одержання звареного з'єднання в результаті плавлення полімеру.

Зварювання, заснована на утворі між макромолекулами полімеру хімічних зв'язків, зветься хімічного зварювання. Для утворення хімічних зв'язків часто потрібне нанесення на ділянки, що з'єднуються, присадочних реагентів або обробка поверхонь речовинами, що змінюють хімічну структуру полімеру. Найбільше часто хімічним зварюванням з'єднують матеріали, що не піддаються зварюванню плавленням. При зварюванні трубопроводів хімічне зварювання, як правило не застосовується.

Процес теплового зварювання полімерів багато в чому схожий зі зварюванням металів плавленням. В обох випадках утвір звареного з'єднання

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

засноване на адгезійному взаємодії поверхонь, що з'єднуються, -поверхневому явищі, що полягає у виникненні фізичного й (або) хімічної взаємодії при їхньому молекулярному контакті. В результаті цих процесів відбувається взаємне злиття (коалесценція) поверхонь, що з'єднуються, зі зникненням фізичної границі роздязнула й утвір проміжного шару з однорідної або різнорідною хімічною структурою. Виникаючі міжмолекулярні або міжатомні зв'язки й забезпечують механічну міцність з'єднання.

Однак, якщо при зварюванні металевих виробів за допомогою різних джерел нагрівання домагаються переходу твердого металу в рідкий стан, отриманий обсяг якого називають зварювальною ванною, то у випадку полімерів матеріал переходить у вязкотекучий ( по іншим - у розплавлене) стан. При зварюванні полімерів під вязкотекучим станом розуміють подібний з рідким стан високомолекулярних речовин, але, що відрізняється великою вязкістю, при яким відбувається переміщення центру ваги макромолекул, а також рух їх відносно один одного при підвищеній температурі. При зниженні температури полімер переходить у склободібний стан.

Утворення звареного з'єднання є багатоступінчастим механізмом, який містить у собі три стадії. Перша стадія передбачає активізацію поверхонь, що зварюються, і підвищення енергії теплового руху їх макромолекул. Ця стадія реалізується при фазовому переході матеріалу із твердого стану в розплавлене. Далі відбувається зближення активованих поверхонь, відстань зближення становить при цьому менш одного нанометра і приводить до утворення фізичного контакту між, що зварюються поверхнями. Третій етап припускає твердіння розплаву в зоні зварювання, у ході третього етапу формуються нові надмолекулярні структурні утвори.

У виробів з термопластів, активацію роблять нагріванням поверхонь, що зварюються, і переходом матеріалу із твердого стану у вязкотекучий стан. Слід зазначити, що одного нагрівання буває недостатньо, щоб утворювалося

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20



реалізації зрушуючи деформацій обов'язково.

Для нагрівання поверхонь, що зварюються, використовують різні джерела теплоти: газовий теплоносій, ультразвукові коливання, високочастотне електричне поле, енергія тертя, потік променистої енергії, нагрітий інструмент і т.п. На підставі прийнятої для металів класифікації процесів зварювання (ДСТУ 19521-74 «Зварювання металів. Класифікація») запропоновано проводити й класифікацію зварювання. Тип зварювання визначають по механізму проведеного процесу, зварювання плавленням і хімічне зварювання. На підставі виду енергії, що вводиться для переводу термопласта у вязкотекучий стан, і способу її передачі визначають клас зварювання.

#### Зварювання нагрітим газом (рис. 1.3, рис. 1.4)

Першої сталі використовувати зварювання нагрітим газом із застосуванням присадочного матеріалу або без нього. Цей спосіб заснований на використанні нагрітого газу (як правило, повітря), за допомогою якого, що з'єднуються поверхні спочатку розігрівають. Потім дані поверхні або притискають один одному або в зону нагрітого газу подається присадочний матеріал у вигляді прутка.

Головною відмінністю реалізації даного способу виявляє безпосереднє підведення тепла до поверхонь, що з'єднуються, а наступний перехід від однієї ділянки шва до іншого.

Однак, як альтернатива послідовного переходу від однієї ділянки шва існує варіант зварювання, при якому нагрівається вся поверхня шва за один цикл.

У деяких випадках зварювання здійснюють із застосуванням припадочного матеріалу, який являє собою прутки. Примітно, що з використанням такого способу зварювання можливо з'єднання деталей

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

фактично будь-яких параметрів і конфігурацій які можуть знадобитися при реалізації зварювального виробництва.

Оснащенню здійснюючій подачу тепла в зону поверхонь, що зварюються, газу-теплоносія нагрівання останнього проводиться або із застосування електроенергії, або з використанням газового полум'я.

У ролі газу-теплоносія звичайно виступає повітря, у деяких випадках, коли використовується термопласт підданий окисному руйнуванню необхідне застосування азоту або інертних газів.

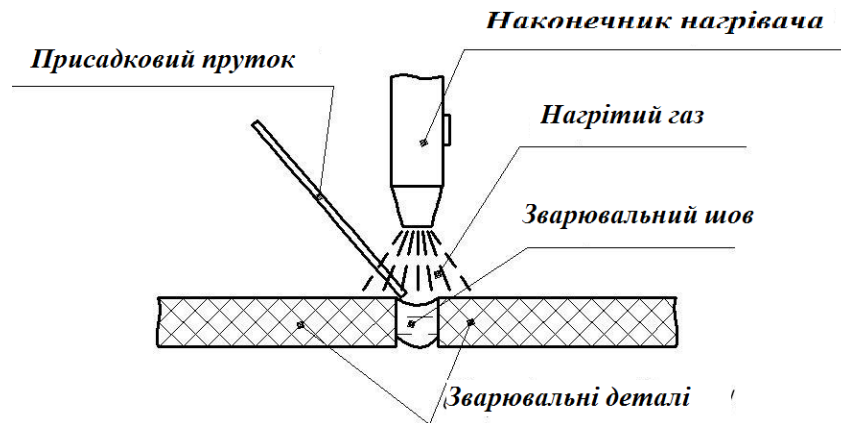


Рисунок 1.3 – Зварювання нагрітим газом із присадочним матеріалом

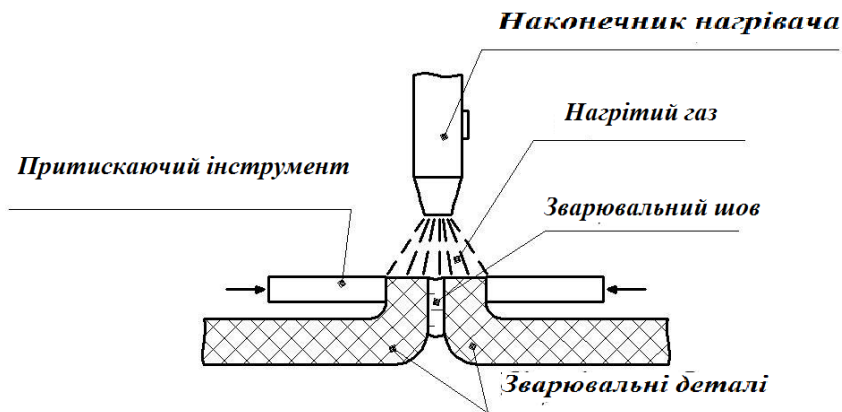


Рисунок 1.4 – Зварювання нагрітим газом без присадочного матеріалу

Екструзійне зварювання (рис. 1.5)



перевищує 60...75 % міцності основного матеріалу й багато в чому визначається кутом розкриття крайок при них підготовці до зварювання.

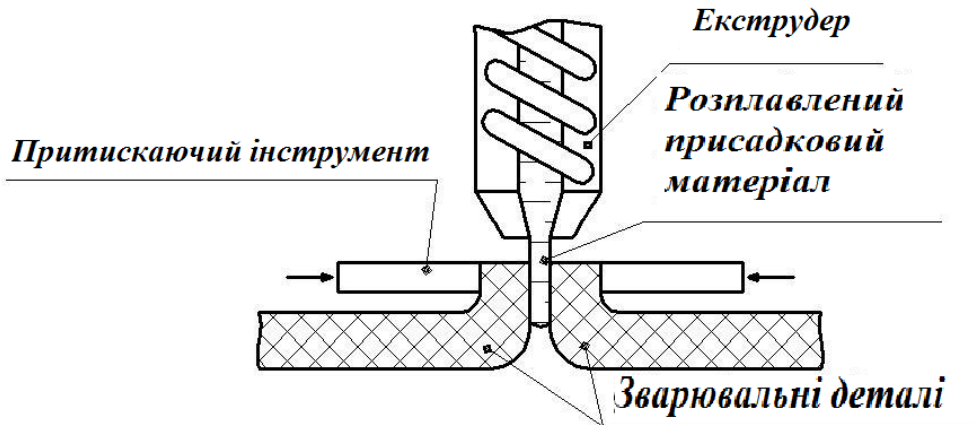


Рисунок 1.5 – Зварювання розплавом, одержуваним екструзією



Рисунок 1.6 – Портативний екструдер серії STARGUN

### Зварювання нагрітим інструментом в раструб (рис. 1.7)

При реалізації даного способу для активації поверхонь, що зварюються, застосовується нагріте оснащення з металу. При цьому передача тепла деталям, що зварюються, при контактному способі нагрівання носить більш інтенсивний характер, чим з використанням нагрітого повітря.

Контактний спосіб нагрівання сприятливо позначається на розподілі

									Арк.
									25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP TAM 23.18094. 000 ПЗ				

тепла в деталях, що зварюються, тому що ніякі додаткові зони заготовок, крім, що зварюються, не зазнають тепловому перегріву.

Завдяки цьому відсутній ефект термічного ушкодження матеріалу навколо з'єднання. Однак міцнісні характеристики зварювання при використанні такого способу менше, чим у труби.

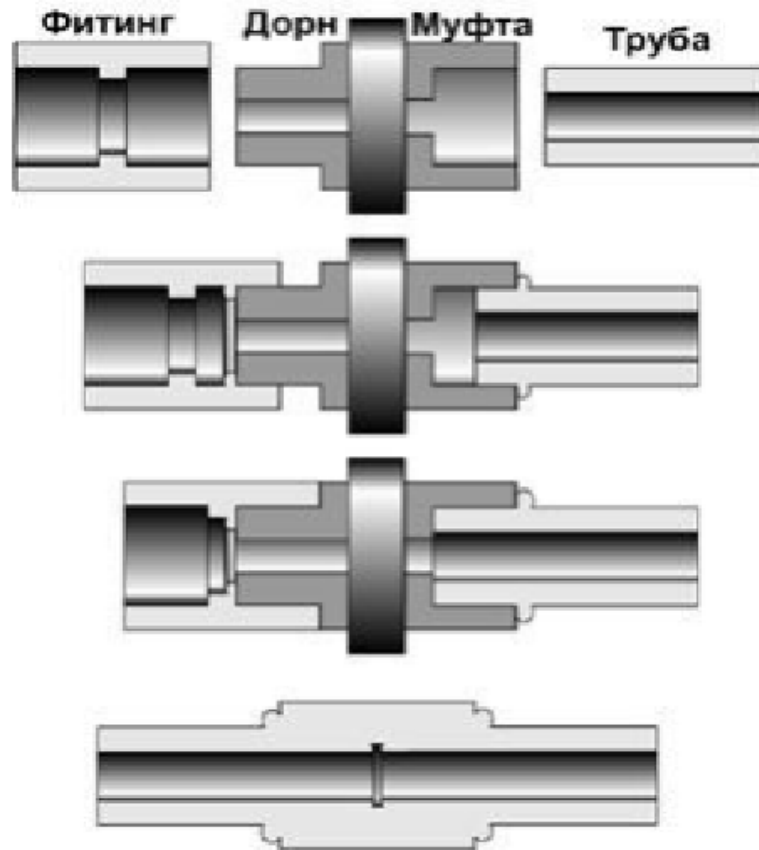


Рисунок 1.7 – Схема зварювання нагрітим інструментом в раструб

При реалізації даного способу необхідне застосування фітингів у ролі сполучних елементів труб. Труби з фітингом зварюються в раструб. Металеве оснащення для нагрівання фітингів і труб складається з наступних елементів – муфта й дорн.

Перед початком формування звареного з'єднання за допомогою муфти оснащення нагрівається зовнішня частина труби, а за допомогою дорна нагрівається внутрішня частина фітинга.

Після здійснення нагрівання поверхонь, що зварюються, до потрібної температури оснащення проводиться видалення оснащення. Потім відразу ж проводиться сполучення труби й фітинга. Після цього вони витримуються до повного остигання. У такий спосіб одержують зварене з'єднання.

У процесі контактування труби з оснащенням інструмента, що нагріває, зовнішня поверхня труби розм'якшується й зміщається зсередини оснащення назовні. При цьому на трубі формується кільце у формі валика. Внутрішній шар труби прогрівається настільки, щоб з'явилася можливість пружного стиску даної частини труби. Це дозволить даної частини труби ввійти в муфту оснащення нагрівача.

Теж саме відбувається й при сполученні фітинга і дорна нагрітого інструмента: труба при цьому пружно стискується, а фітинг, у теж час, пружно розтягується.

Як результат – нагріті поверхні натискають один на одного. Позитивним ефектом є витиснення повітря із з'єднання й перемішування матеріалу в зоні зварювання.

Переваги розтрубного зварювання: - відносна простота способу;

- висока якість з'єднання;

- висока продуктивність зварювання. Недоліки розтрубного зварювання:

- потрібні спеціальні центратори при зварюванні труб великого діаметра (більш 100 мм);

- додаткові витрати на фітинги.

#### Зварювання в стик з використанням нагрітого інструмента (рис. 1.8)

Активізація поверхні деталей, що зварюються, проводиться з застосуванням спеціального оснащення. При цьому передача тепла деталям, що зварюються, при контактному способі нагрівання носить більш інтенсивний характер, чим з використанням нагрітого повітря.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

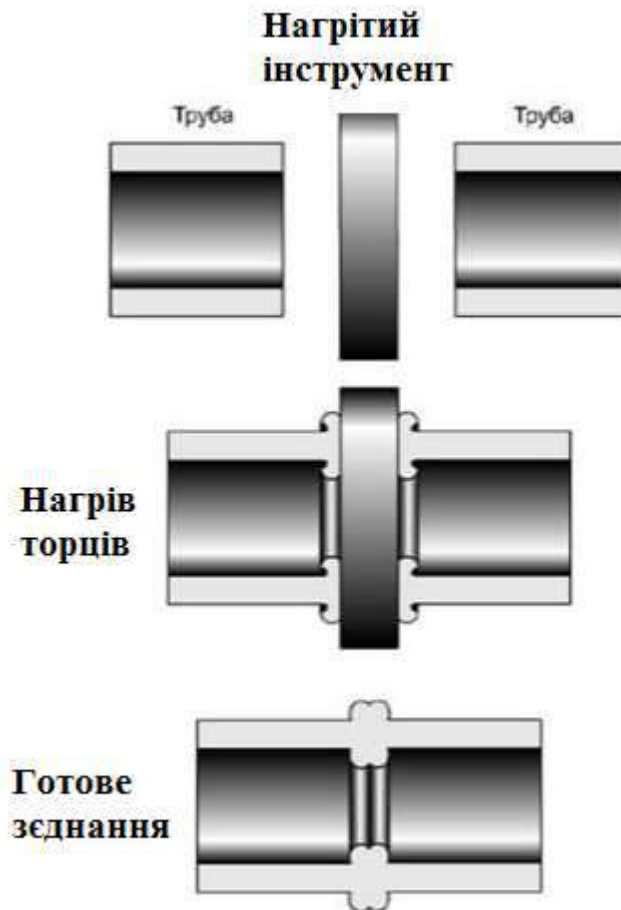


Рисунок 1.8 – Схема зварювання нагрітим інструментом в стик

Контактний спосіб нагрівання сприятливо позначається на розподілі тепла в деталях, що зварюються, тому що ніякі додаткові зони заготовок, крім, що зварюються, не зазнають тепловому перегріву.

Завдяки цьому відсутній ефект термічного ушкодження матеріалу навколо з'єднання. Однак міцнісні характеристики зварювання при використанні такого способу менше, чим у труби.

Даний спосіб зварювання полягає в нагріванні кінців, що зварюються труб до заданої температури, відомість їх разом і наступне втримання під тиском до остигання звареного шва. Особливістю даного способу є необхідність дотримання великої кількості умови для одержання якісного шва. Однак сучасний рівень автоматизації виробництва дозволяє знизити впливу людського фактора до мінімуму, тим самим забезпечуючи стабільну

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

якість зварювання.

Переваги зварювання нагрітим інструментом: - зменшується зона термічного впливу;

- досягається рівномірність з'єднання з матеріалом труби;
- спрощена конструкція з'єднання (немає необхідності використання сполучних муфт).

Недоліками зварювання нагрітим інструментом є:

- вимоги високої точності параметрів режиму зварювання й акуратності виконання операцій технологічного процесу;
- вплив температури низьких температур навколишнього повітря на якість одержуваного з'єднання;
- міцність з'єднання трохи нижче, чим при зварюванні в раструб; - потрібне складне устаткування.

#### 1.5 Завдання дослідження та методи їх рішення

На підставі наведеного огляду наукової інформації з теми зварювання магістральних трубопроводів з полімерних труб можна вказати, що основною проблемою зварювання є забезпечення належної якості при низьких температурах навколишнього повітря (нижче – 15 °С). Пропоновані технічні рішення або не забезпечують належної якості, або вимагають істотного ускладнення технологічного процесу й знижують продуктивність виконуваних робіт.

Таким чином, можна сформулювати завдання подальшого дослідження:

- 1) на підставі літературних і патентних досліджень запропонувати компонування устаткування для зварювання магістральних трубопроводів з полімерних труб;
- 2) досліджувати ефективність різних режимів і способів зварювання поліетиленових труб (рішення цього завдання передбачає експериментальне

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

зварювання зразків із труб на промисловому устаткуванні, визначення фізико-хімічних властивостей звареного стикового з'єднання, вимірювання міцності звареного з'єднання);

3) досліджувати якість зварених з'єднань, отриманих при різних температурах навколишнього середовища й запропонувати спосіб і режими зварювання в умовах знижених температур.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

## 2 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

### 2.1 Опис операцій технологічного процесу

Зварювальний цикл можна розділити на наступні етапи (рис. 2.1):

- Оплавлення торців труби;
- Нагрівання;
- Видалення інструмента для нагрівання;
- Зварювання торців;
- Охолодження.

Перед початком зварювання зони з'єднання труб вирівнюються за допомогою електроторцевателя – інструмента для механічної обробки торців, що зварюються труб. Інструмент вирівнює торці труб під прямим кутом щодо осі й видаляє всі відколи й нерівності перетину. Торцювання повинне проводитися доти, поки стружка, утворена в результаті торцювання, почне виходити безперервною, рівною стрічкою.

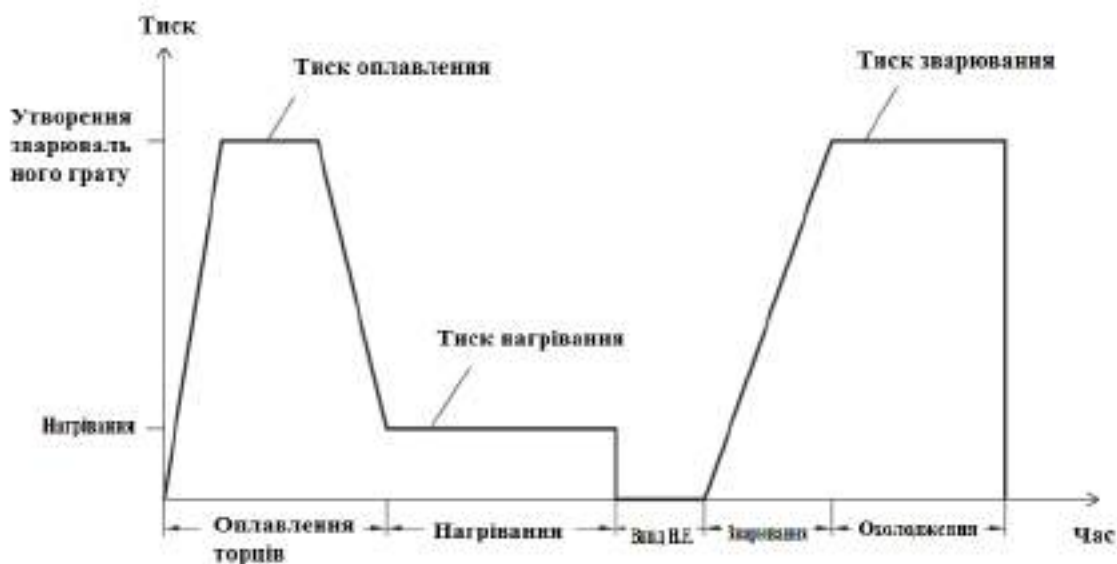


Рисунок 2.1 – Циклограма процесу зварювання в стик нагрітим інструментом

Поверхні, що далі зварюються, нагріваються до температури плавлення за допомогою спеціального нагрівального елемента, як показано на рис. 2.2 і 2.3. На стадії оплавлення (рис. 2.2) відбувається утворення первинного грата.

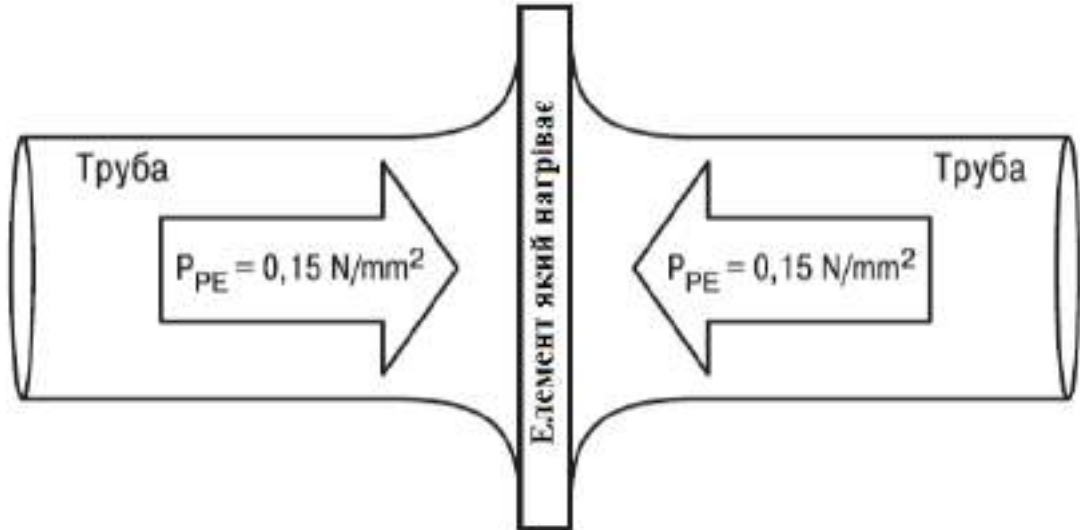


Рисунок 2.2 – Стадія оплавлення торців труб

На стадії нагрівання (рис. 2.3) тепло поширюється в глиб матеріалу. Тому що на даному етапі потрібно забезпечити тільки контакт між, що зварюються деталями й нагрівальними елементом, то, що прикладається в цьому випадку тиск близький до нульового значення.

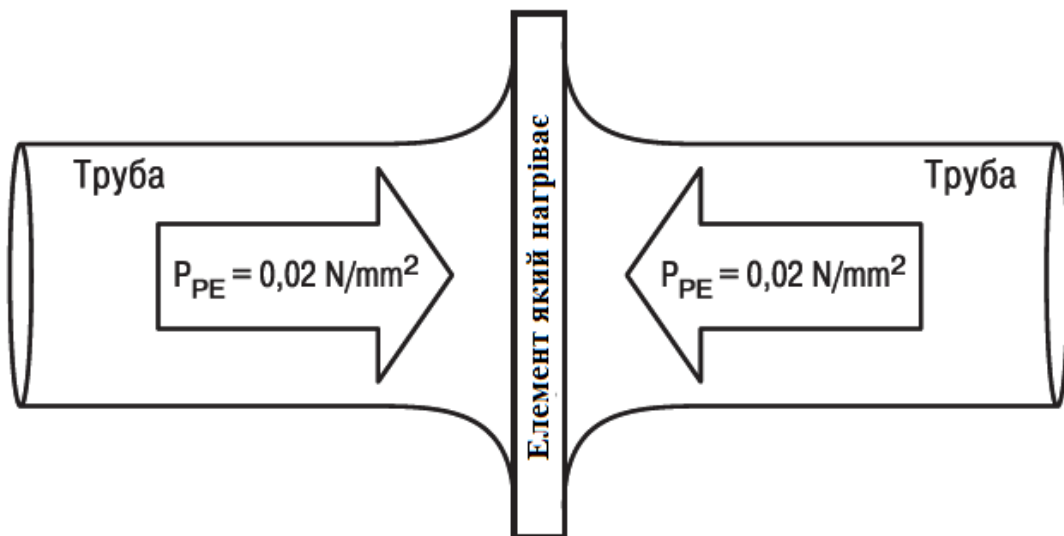


Рисунок 2.3 – Стадія нагрівання торців труб

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP TAM 23.18094. 000 ПЗ

Арк.

32

Потім нагрівальний елемент віддаляється з області зварювання як показано на рис. 2.4 (стадія видалення нагрівача). Нагрівальний елемент необхідно видаляти так, щоб не забруднити й не ушкодити нагріті для зварювання поверхні труби. Контактні поверхні потрібно швидко з'єднати, не допускаючи інших зіткнень. Час переходу повинний бути настільки коротким, наскільки це можливо, інакше нагріті поверхні застигнуть, що негативно вплине на якість зварювання.

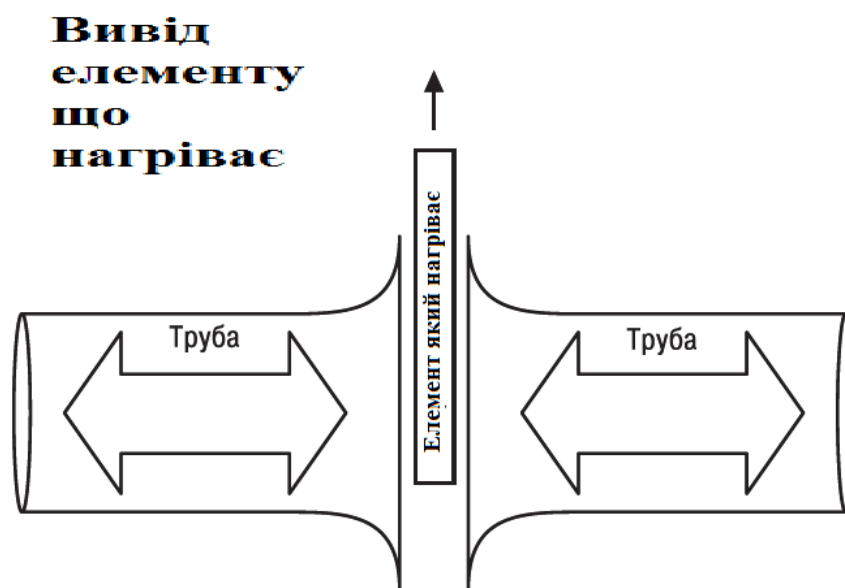


Рисунок 2.4 – Стадія видалення нагрівального інструмента

На стадії зварювання (рис. 2.5) утворюється кінцевий грат і, необхідні для надійності зварювання, зв'язки (на молекулярному рівні). частини, що зварюються, труби з'єднуються під тиском рівним тиску на стації оплавлення торців.

На заключній стадії охолодження (рис. 2.6) проводиться осідання стику, при цьому міцнісна характеристика шва ухвалюють максимальні значення.

Після з'єднання повинен з'явитися симетричний буртик (рис. 2.7).

Однаковий розмір правого й лівого буртика показує правильність зварювання. Різний розмір буртиків показує різні характеристики в'язкості матеріалів, що з'єднуються, тобто процедура зварювання зроблена невірно.

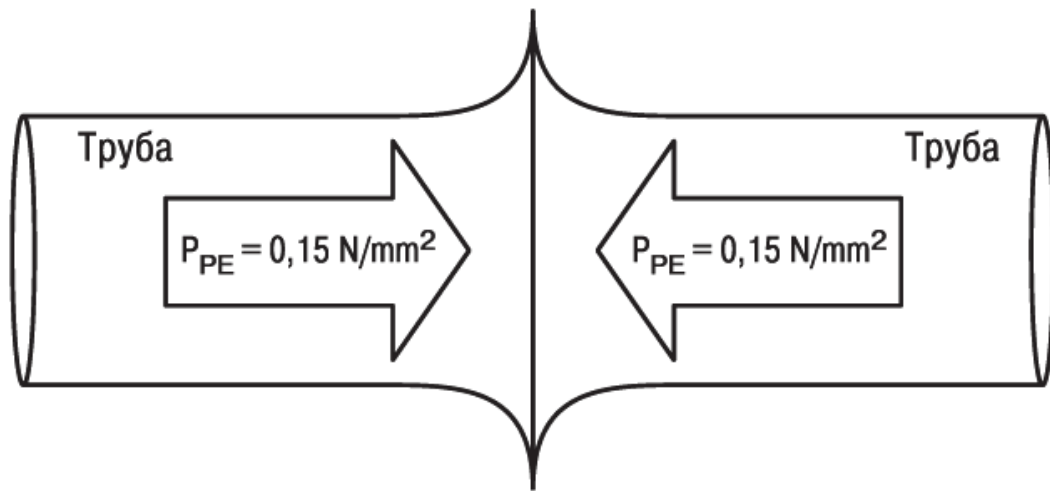


Рисунок 2.5 – Стадія зварювання

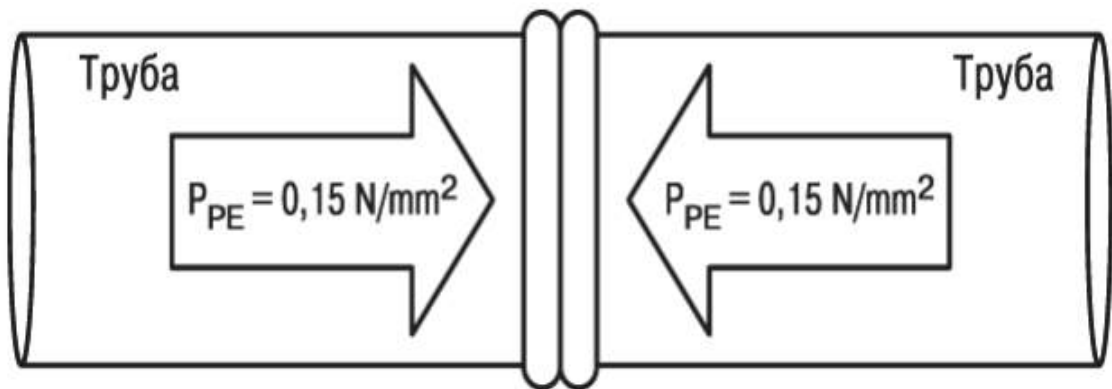


Рисунок 2.6 – Стадія охолодження



Рисунок 2.7 – Буртик при зварюванні поліетиленових труб

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP TAM 23.18094. 000 ПЗ

Арк.

34

## 2.2 Опис устаткування

Установки для стикового зварювання трубопроводів з поліетилен складаються з наступних компонентів.

Центратор (рис. 2.8) – базовий елемент машини, що полягає з міцної основи (станина) і чотирьох затискачів, виконаних з металу й призначених для надійної фіксації труб у потрібному положенні. Звичайно половина із цих затискачів рухливі, а інша їхня частина надійно закріплені на спеціальних напрямних.



Рисунок 2.8 – Центратор для зварювання полімерних труб

Торцеватель (рис. 2.9) – інструмент, призначений для торцювання поверхонь деталей перед зварюванням шляхом їхньої механічної обробки. Торцеватель має спеціальні кріплення для його надійного кріплення на зварювальному устаткуванні. Даний пристрій має рухливі затискачі, завдяки яким забезпечується тиск необхідний для притиснення деталей до торцевателю.

Для забезпечення безпеки даний пристрій комплектується вимикачами, що забезпечують відсутність включення двигуна зварювальної машини.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Робочі леза даного пристрою мають двостороннє заточення. Практикується зміна сторони установки робочого леза, якщо одна крайок внаслідок зношування затупилася. Перевернувши, можна використовувати їхню другу ріжучу крайку. Щоб не міняти геометрію ножів, їх не рекомендується заточувати.



Рисунок 2.9 – Торцеватель для зварювання полімерних труб

Нагрівальний елемент (зварювальне дзеркало) (рис. 2.10) – є одним з головних пристроїв, необхідним для активації (нагріву) поверхонь деталей, що зазнають зварюванню.

Робочі поверхні дзеркала покриті спеціальним матеріалом (тефлон), який запобігає їхньому забрудненню налиплим фрагментами з поліетилену. Для контролю температурного режиму зварювальне дзеркало обладнане термометром.



Рисунок 2.10 – Нагрівальний елемент для зварювання полімерних труб

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Гідравлічний привід (рис. 2.11) – пристрій необхідний для підтримки тиску стиску деталей на необхідному рівні. При необхідності значення тиску можна регулювати й встановлювати потрібні значення для будь-якого етапу зварювання.



Рисунок 2.11 – Гідравлічний привід для зварювання полімерних труб

Редукційні вкладиші (рис. 2.12) – безліч півкілець, необхідних для забезпечення зварювання всіх розмірів поліетиленових труб.

Найчастіше редукційні вкладиші йдуть у комплекті зі зварювальним устаткуванням, однак, при необхідності, їх можна придбати окремо.



Рисунок 2.12 – Редукційні вкладиші для зварювання полімерних труб

### 2.3 Компонувальна схема установки для зварювання магістрального трубопроводу з полімерних труб

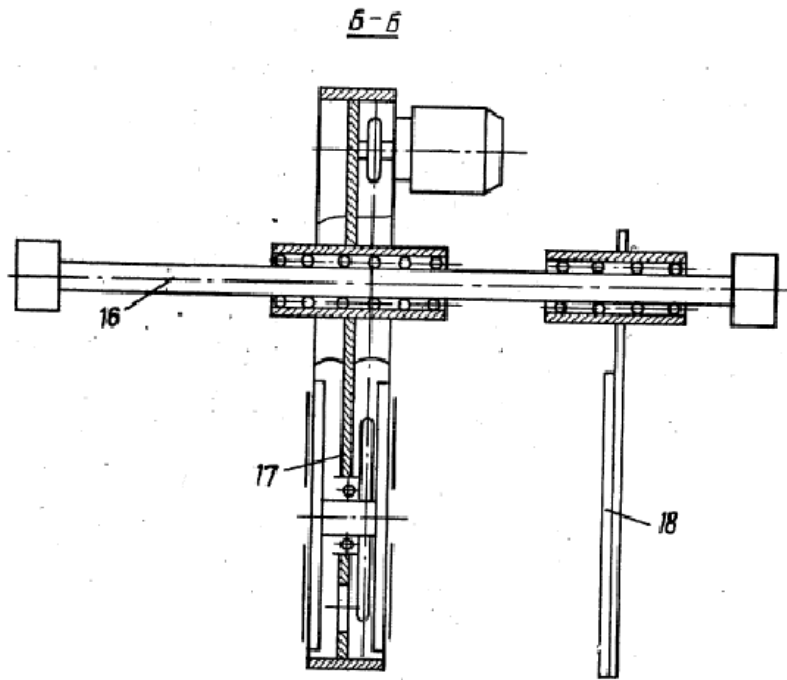
Запропонована установка для зварювання магістрального трубопроводу з полімерних труб (рис. 2.13, 3.14) містить криту платформу, що містить підставу 1, у якій розміщаються силові механізми й працюють оператори, і верхню частину 2, де розміщаються труби, приводний рольганг 3, відсекатель 4, станцію гідроприводу 5, дві автономні пари нерухливого 6 і рухливого 7 затискних хомутів, кожна з яких пов'язана із силовим приводом 8, підтримувальний ролик 9, що забезпечує, схід із платформи траншею батоги, підпружинений ролик 10 для підтримки вільного кінця труби, стіл 11 підйому, що забезпечує підйом і втримання затискних хомутів при стикуванні труб ролик, що відхиляє, 12, тримач для підтримки труби й укладання її на похилий рольганг 13, лебідку 14, що служить для переміщення платформи уздовж траншеї за допомогою троса 15, вал 16, на якому встановлені торцювателі 17 і нагрівач 18, електроагрегат 19, що забезпечує електрикою усі споживачі.

Нерухливий 6 і рухливий 7 затискні хомути складаються із трьох частин: нижнього сектору 20, лівого сектору 21 і правого сектору 22, з'єднаних відкидним болтом 23, Хомути 6 і 7 встановлено на рамі 24, що має ролики 25. На рамі 24 закріплений нерухливий хомут 6 до силовий привод 8, що представляє собою гідроциліндр,, шток якого з'єднано з рухливим хомутом 7.

Рама 24 з хомутами 6 і 7 встановлена на напрямної 26, один кінець якої шарнірно з'єднано зі столом 11, а інший кінець опирається на регульований по висоті упор 27, Напрямна 26 має підпружинений палець 28, тримач для втримання автономної пари хомутів у вихіднім положенні. Для зменшення напруг у зварених швах нахил напрямної 26 відповідає нахилу труб, що зварюються.

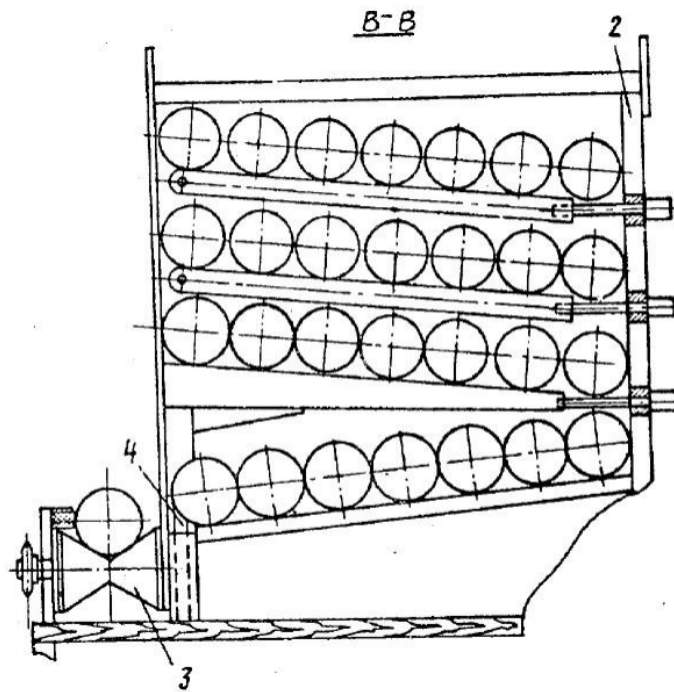
					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38





16 – вал, 17 – торцьователь, 18 – нагрівач

Рисунок 2.15 – Перетин « Б-Б» на схемі установки



3 - приводний рольганг, 4 - відсікач

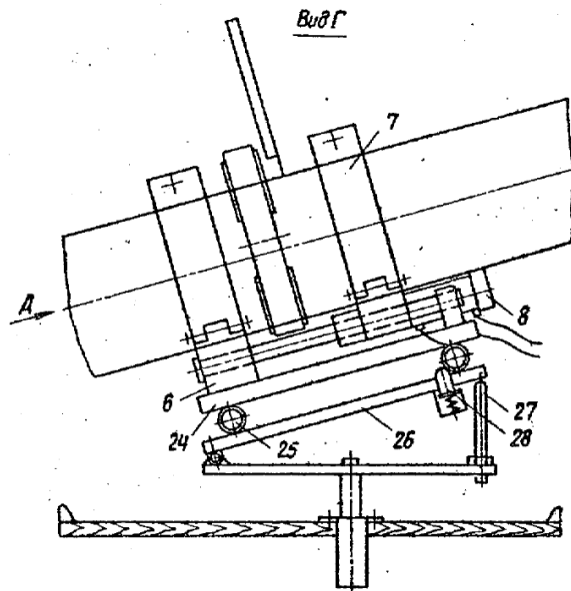
Рисунок 2.16 – Перетин « В-В» на схемі установки

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP TAM 23.18094. 000 ПЗ

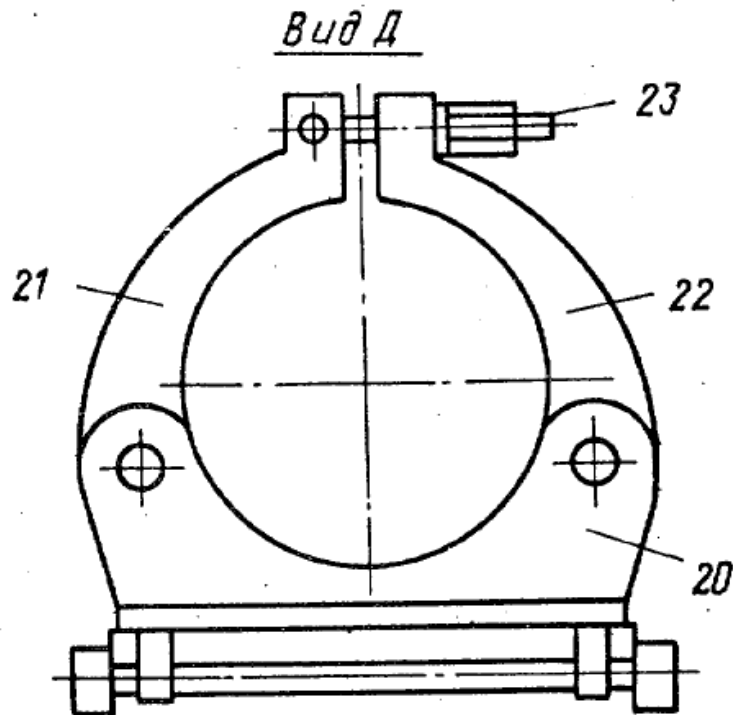
Арк.

40



6 – пари нерухливих хомутів, 7 – пари рухливих хомутів, 8 - силовий привод, 24 – рама, 25 – ролики, 26 – напрямна, 27 – упор, 28 – підпружинений палець

Рисунок 2.17 – Вид «Г» на схемі установки для зварювання пластмасових труб



20 – нижній сектор, 21 - лівий сектор, 22 – правий сектор, 23 – відкидний болт

Рисунок 2.18 – Вид «Д» на схемі установки для зварювання пластмасових труб

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Установка працює в такий спосіб. Перша із труб, що зварюються по команді оператора скачується на приводний рольганг 3, переміщається вперед до упору й відхиляючим роликком 12 укладається на похилий рольганг 13, який подає її на пост для закріплення в хомуті 6 з необхідним вильотом, потім подібним чином подається друга труба до упору в першу. Зафіксувавши другу трубу в хомуті 7 силовим механізмом 8, друга труба приділяється на відстань, що забезпечує введення торцювателя 17, потім труби стискаються силовим приводом 8, торці Обробляються й на місце торцювателя вводиться нагрівач 18.

Після нагрівання й виводу нагрівача торці стискаються із зусиллям опади. Зафіксувавши в хомутах зварені труби, включають лебідку 14 і установка переміщається на необхідну відстань. При цьому перша труба укладається в траншею, а перша пара затискних хомутів, що втримують зварений стик під зусиллям осадки, автоматично переміщаючись, відхиляє ролик 10, який потім автоматично вертається у вихідне положення і підтримує трубу, яка сходить із похилого рольганга 13. Друга пара затискних хомутів подається на стіл 11 підйому, піднімається у вихідне для роботи положення, установлюється на напрямної 26 і наступна труба подається на похилий рольганг 13 і переміщається до зіткнення торців.

Після затиснення кінців батоги та труби цикл обробки й зварювання труб повторюється. Закінчивши обробку й зварювання труб у другій парі затискних хомутів, оператор звільняє першу пару хомутів і переміщає їх у вихідне положення. Для завантаження стола 11 підйому включають лебідку 14, переміщаючи установку на нове місце. Залежно від розмірів труб у даній установці може бути дні й більш автономних пар затискних хомутів.

Переміщення установки може проводитися як транспортним засобом, так і за допомогою лебідки 14, трос якої може закріплюватися за якір або за раму канавокопача.

За рахунок наявності двох автономних пар рухливого й нерухливого

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

хомутів, пов'язаних із силовим приводом, здійснюється одночасне укладання зварених труб у траншею й зварювання наступних заготовок труб, а також за рахунок наявності критої платформи, що служить для зберігання й механізованої подачі труб на зварювання, підвищується продуктивність праці, поліпшуються умови праці операторів.

Розміщення труб на критій платформі захищає труби від атмосферних опадів, що негативно впливають, і сонячних променів, що в результаті підвищує якість звареного шва, тобто якість зварювання.

Кожна автономна пара затискних хомутів у вихіднім положенні встановлюється на напрямну під кутом нахилу куті, що відповідає, нахилу труб, що зварюються, що зменшує напруги у зварених швах від вигину батоги.

#### 2.4 Проблема зварювання полімерних труб при знижених температурах

Основною проблемою зварювання поліетиленових труб є сильна залежність якості з'єднання від температури навколишнього повітря. Випробування зварених з'єднань виготовлених при температурі повітря нижче регламентованих значень показують, що такі шви мають низької довговічності. Такий шов передчасно руйнується в зоні сплавки.

Даний негативний ефект пов'язаний з температурними напругами, що виникають у матеріалі труб через нерівномірність нагрівання. Для одержання якісного шва необхідний утворення у зоні зварювання сплавки сферлітної структури (небажаним є сплавки стрічкової структури).

Так при сприятливих теплових режимах стрічкові сплавки виштовхуються в процесі зварювання в грат і внаслідок релаксації розплаву трансформується в сфери.

Формування стрічкової структури в зоні сплавки пояснюється підвищенням температури кристалізації деформуємих полімерних розплавів [34].

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Також, враховуючи розрахунки, описані в дослідженні [35], термічні напруги, що виходять при зварюванні, ростуть зі зменшенням значення температури навколишнього повітря. Найбільшому впливу даних напруг зазнає зона сплавки. В умовах повітря, що коли оточує, охолоджений до температур нижче регламентованих значень, для одержання потрібного обсягу розплаву збільшують тривалість впливу контактного нагрівача на поверхні, що зварюються. Але в цьому випадку нагрівається тільки мала довжина труба, що перебуває поблизу шва.

Чим менш однорідна температурне поле в матеріалі труб поруч зі стиком, тим більше виникає шкідливих термічних напруг. Ріст напруг не здатних рефлексувати може привести до появи й росту термічних тріщин у зоні зварювання.

На основі вище сказаного можна зробити припущення, що проблему низької температури навколишнього повітря можна розв'язати шляхом прогріву матеріалу труби на невеликій відстані від торця. Це дозволить знизити неоднорідність теплового поля в процесі зварювання (з використанням звичайних режимів), що приведе до зниження термічних напруг. Разом із цим, при охолодженні шва доцільно проводити усередині камери з теплоізолюючого матеріалу.

Якщо зрівняти теплотехнічні характеристики металу й пластмаси, то можна помітити, що теплопровідність полімерів 100...200 раз нижче.

Коефіцієнт теплопровідності поліетилену за табличним даними становить 0,16...0,42 Вт/(м·°С), при цьому в сталі даний показник – 25...88 Вт/(м·°С) [29]. Саме через цей теплову деструкцію зазнає не незначна частина матеріалу, обмежена ізотермою +80·°С [16].

Одночасно із цим, нагріті ділянки поліетилену проохолоджуються значно повільніше, чим метали.

Технологічні можливості контактного зварювання поліетиленових деталей розкриті не до кінця.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Так збережена під дією нагрівального елемента зварювальної установки тепла могла б використовуватися з користю в умовах зварювання при низьких температурах повітря.

Відомий спосіб здійснення зварювання при низькій температурі повітря навколишнього середовища [19]. Він заснований на використанні ізотерми, яка звернена опуклою частиною до звареного шва, при цьому зона термічного впливу локалізована на околицях звареного шва [30].

Рисунок 2.19 показує, як розподілена температура по товщині матеріалу труби при низькій температурі навколишнього повітря ( $-40^{\circ}\text{C}$ ).

Примітно, що температурне поле при розгляді розподілу по товщині має однорідний вигляд. Так відмінність температур у середній частині й на вільних поверхнях рівно  $10^{\circ}\text{C}$ . Із цієї причини у процесі оплавлення достатнім є забезпечення збігу залежностей температур на відрізьку стінки, що проходить по середній частині труби, що зварюється.

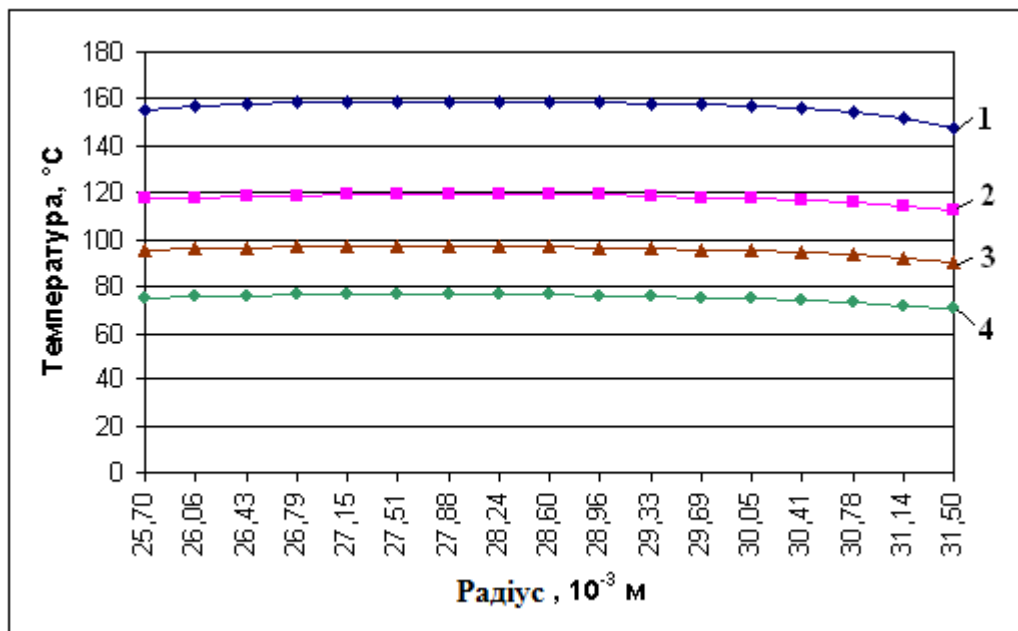


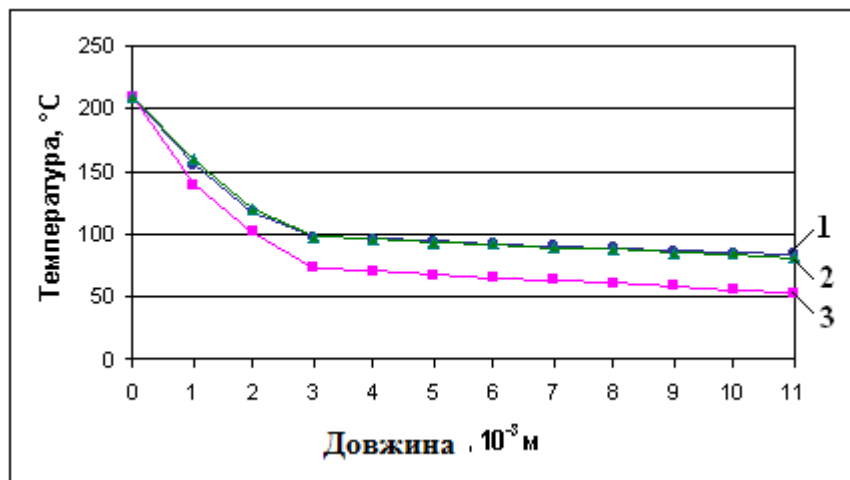
Рисунок 2.19 – Значення температури залежно від відстані  $z$  (відстань від нагрівального елемента товщину) у момент часу  $t=110\text{ c}$  при температурі повітря  $T_0=-40^{\circ}\text{C}$ : 1 –  $z=1\text{ мм}$ ; 2 –  $z=2\text{ мм}$ ; 3 –  $z=3\text{ мм}$ ; 4 –  $z=4\text{ мм}$ .

Як видно з рис. 2.20 – досягнення необхідних температур при зварюванні на холодному повітрі може бути забезпечене підвищенням тривалості нагрівання.

Збіг температурних полів у зоні зварювання при різних значеннях температури навколишнього середовища ( у тому числі й нижче регламентованих) може бути забезпечене, якщо буде досягнута однакова глибина проплавлення. Це показано на рис. 2.21.

Якщо зварюванню зазнає такі вироби як труби марки ПЕ 80 SDR11, то при регламентованих температурах навколишнього повітря тривалість оплавлення – 55 секунд. У цьому випадку розрахована глибина проплавлення рівна 1,63 мм.

Щоб досягти такої ж глибини проплавлення при температурі навколишнього повітря  $-40^{\circ}\text{C}$  тривалість оплавлення повинна становити 96 секунд.



1 –  $t=55$  із при температурі повітря  $20^{\circ}\text{C}$ ;

2 –  $t=110$  із при температурі повітря  $-40^{\circ}\text{C}$ ;

3 –  $t=55$  із при температурі повітря  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Рисунок 2.20 - Значення температури залежно від відстані уздовж труби



регламентованій температурі зовнішнього середовища.

Запропоноване рішення по доробці технології зварювання таким чином, що відсутня необхідність додаткового нагрівання кінців труб перед зварюванням і відсутня необхідність використання ізольованої камери з утеплювального матеріалу для затримки процесу охолодження шва.

Необхідне температурне поле в ЗТВ досягається передпрогрівом зони зварювання, а збільшенням тривалості часу оплавлення, яка вибирається залежно від температури повітря з урахуванням фізичних характеристик труби.

Дане рішення працює в такий спосіб.

В описі способу [19] для кінців, що зварюються деталей 1 виконують центрування (рис. 1.1). Для цього використовують зовнішню поверхню труб. Потім проводиться мехобработка торців деталей. Її виконання необхідне для того, щоб забезпечити зняття окисненого шару матеріалу й щільне прилягання деталей.

Оброблені кінці деталей, що зварюються, уводять у контакт із тефлоновою поверхнею нагрівального апарата для здійснення їх оплавлення.

Тривалість оплавлення розраховується, враховуючи температуру навколишнього повітря, фізичні властивості труби, глибина проплавлення торця труби, що досягається при регламентованих температурах навколишнього повітря.

Після оплавлення кінців труб нагрівальний елемент віддаляється (прибирається із зони зварювання) і потім відбувається стиск оплавлених кінців. Деталі втримуються в стисломому стані протягом заданого проміжку часу.

Для того щоб забезпечити охолодження шва з необхідною швидкістю, даний процес здійснюється в обмеженому просторі 1 заданих розмірів. При цьому за рахунок теплоти зварювального з'єднання 2 у повітря даного простору перебуває регламентованому температурному діапазоні. Запобігання передчасного остигання повітря в просторі забезпечується теплоізоляцією 3

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

(рис. 2.22).

Обсяг повітря в замкненому просторі впливає на швидкість охолодження з'єднання.

Щоб забезпечити швидкість остигання шва на регламентованому рівні необхідно регулювати обсяг простору шляхом зміни довжини  $L$  камери і її висоти  $h$ .

При зварюванні трубопроводів з поліетиленом ПЕ 80 SDR11 (ДСТУ 50838) при температурі зовнішнього середовища, що лежить у нормованому діапазоні, тривалість оплавлення становить 55 секунд. У цьому випадку розрахована глибина проплавлення становить 1,63 мм (графік №1 на рис. 2.21). При температурі навколишнього повітря  $-40^{\circ}\text{C}$  для досягнення даної глибини проплавлення тривалості оплавлення повинна становити 96 секунд (графік №2 на рис. 2.21). У цьому випадку розподіл температури в ЗТВ практично однакове [32].

Роблять осідання оплавлених торців після видалення інструмента під тиском і витримку під цим тиском протягом певного часу в замкненому обмеженому обсязі. Цей замкнений обсяг забезпечує значення температури навколишнього повітря навколо з'єднання, що зварюється, виходячи з регламентованого інтервалу температури навколишнього повітря. При цьому слід урахувати, що зі збільшенням довжини  $L$  камери при фіксованій висоті  $h$  камери проходить більш швидко зниження температури. Це відбувається через збільшення присутності в камері поверхні труби з низькою температурою. Збільшення висоти  $h$  камери при фіксованій довжині  $L$  приводить до суттєво меншого зниження температури. Розрахунковим шляхом були знайдені геометричні розміри теплового контуру ( $L=40$  мм,  $h=20$  мм), при яких температура середовища в усередині ізолюваного простору забезпечується власним теплом звареного шва на необхідному рівні. Розрахунки проводилися для зварювання труб марки ПЕ 80 SDR11 (ДСТУ

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



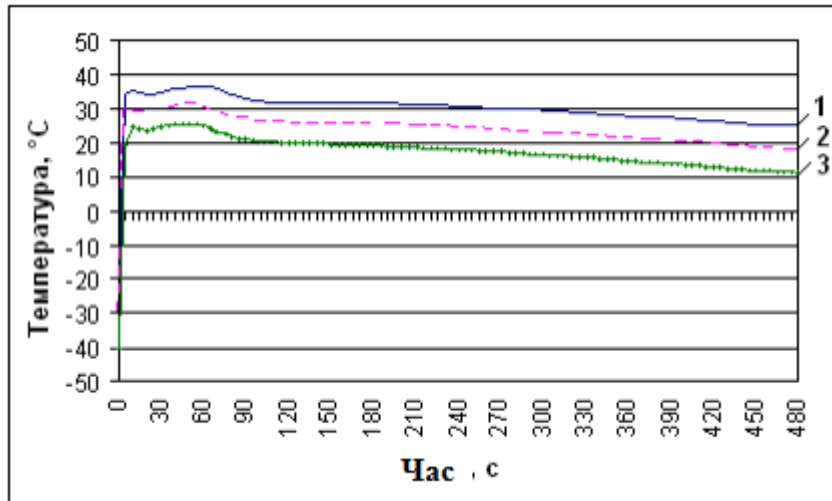


Рисунок 2.23 – Коливання температури повітря усередині камери з теплоізоляційного матеріалу при остиганні звареного шва при різних значеннях зовнішньої температури повітря:  $-20^{\circ}\text{C}$  (1);  $-30^{\circ}\text{C}$  (2);  $-40^{\circ}\text{C}$  (3)

## 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

### 3.1 Параметри процесу зварювання полімерних труб

Основними параметрами технологічного процесу при зварюванні поліетиленових труб є:

температура нагрівача  $\theta_{\text{н}}$ ;

час оплавлення  $t_{\text{опл}}$ ;

час прогріву  $t_{\text{пр}}$ ;

час технологічної паузи  $t_{\text{пауз}}$ ;

час осадки  $t_{\text{ос}}$ ;

тиск при оплавленні  $P_{\text{опл}}$ ;

тиск при нагріванні  $P_{\text{нагр}}$ ;

тиск при осадці  $P_{\text{ос}}$ .

До додаткових параметрів ставляться – температура навколишнього середовища, геометричні характеристики поверхонь, що зварюються, фізичні характеристики матеріалу й ін.

Від даних параметрів залежать експлуатаційні характеристики зварювання, структура матеріалу в різних зонах з'єднання, продуктивність процесу одержання зварювання й інші якісні характеристики з'єднання [3-5].

Дослідження ефективності різних режимів зварювання поліетиленових труб проводять такими способами [36, 39]

- дослідження кристалічності за допомогою диференціально-скануючої калориметрії

- визначення властивостей матеріалу в зоні зварювання поліетиленових

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

труб допомогою механічних випробувань;

- тривалими випробуваннями в активному середовищі.

Схема зон звареного з'єднання труб з поліетилену показана на рис. 3.1. Щоб досліджувати характеристики зварювання, з кожної зазначеної області здійснюють вирізку зразків-плівок. Після, відповідно до ДСТУ 14235, проводять випробування на розтягання.

Дана методика випробувань дозволяє визначити механічні властивості матеріалу для кожної із зазначених на рис. 3.1 областей звареного стикового з'єднання.

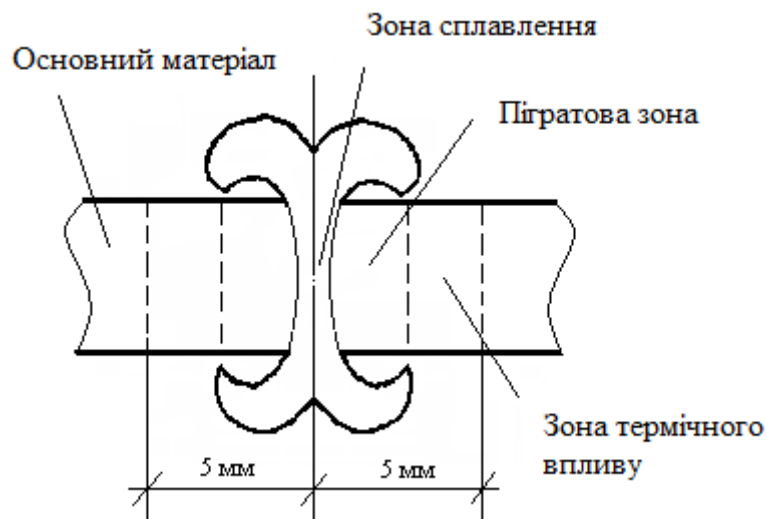


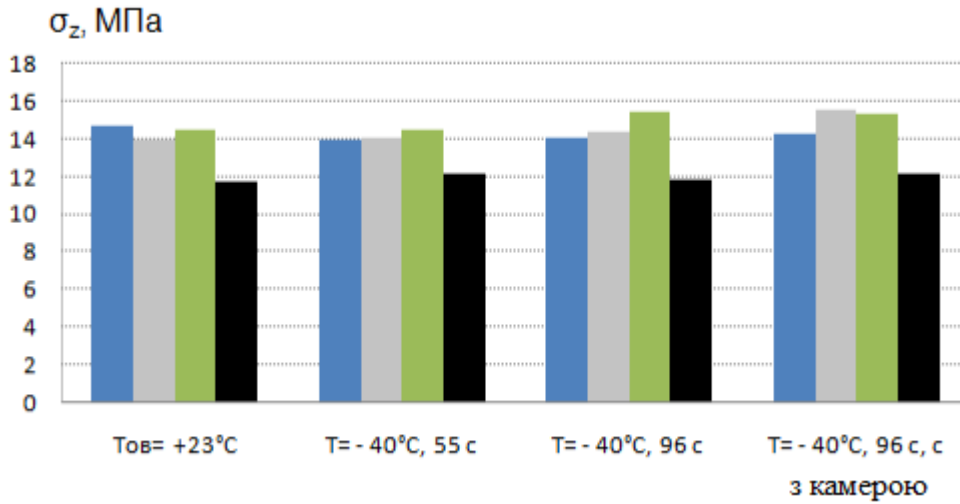
Рисунок 3.1 – Схема зон звареного з'єднання труб з поліетилену

Нижче показані результати випробувань на розривній машині зразків отриманих з різних областей зварених з'єднань. Діаграми на рис. 3.2 показані для зварених з'єднань отриманих при кімнатній температурі навколишнього повітря  $+23^{\circ}\text{C}$  за стандартною технологією (табл.3.1), при температурі навколишнього повітря, рівної  $-40^{\circ}\text{C}$  без використання попереднього нагрівання.

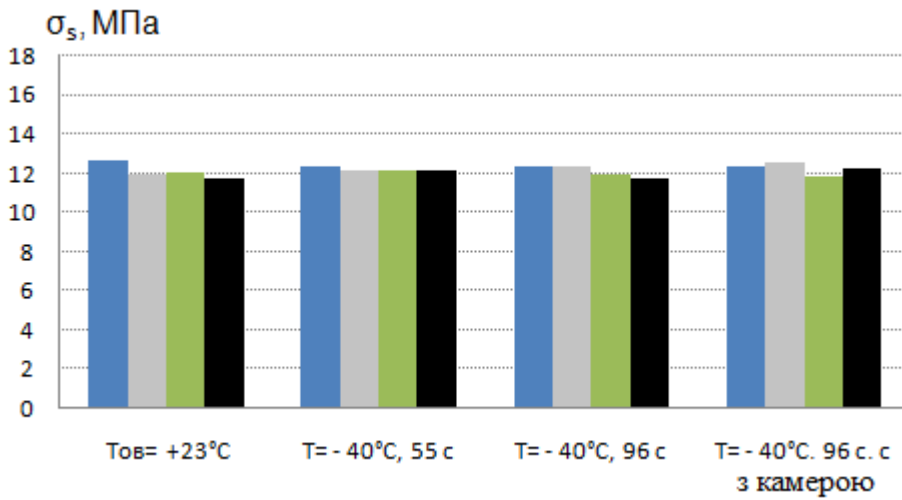
Результати вказують на те, що у звареному з'єднанні слабкою міцністю незалежно від температури зовнішнього середовища має область

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

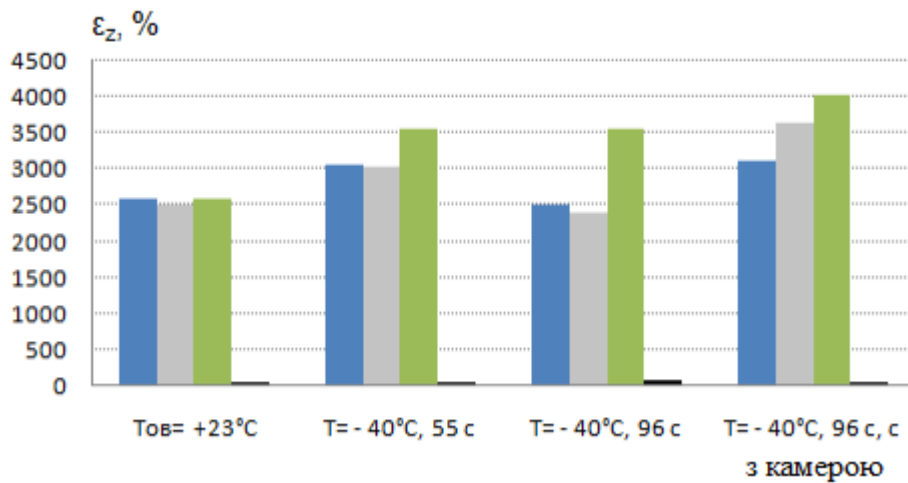
сплавки. Значення границі текучості матеріалу в області зварювань зроблених при різних умовах, сильно не різняться й перебувають на одному рівні в межах 11,7...12,6 МПа. Область сплавки має низькі значення відносного подовження при максимальнім навантаженні.



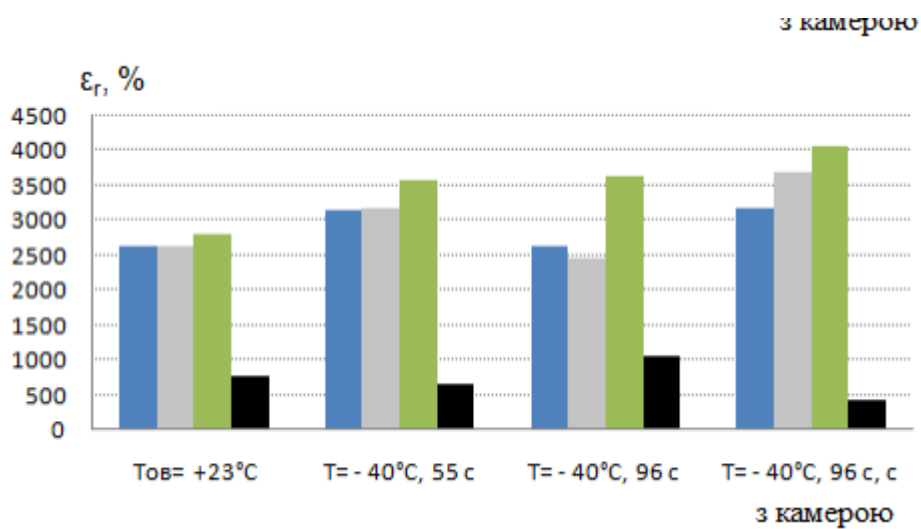
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2 – Результати випробувань матеріалу з різних зон термічного впливу зварювання: а) міцність при розтягуванні б) границя текучості; в) відносне подовження при максимальному навантаженні; г) відносне подовження при розриві



- контроль дефектів з використанням ультразвуку;
- випробування на вигин при статичному навантаженні;
- тестування з'єднання труб тиском;
- випробування динамічні випробування звареного з'єднання на розтягання.

Огляд зварених з'єднань полягає їхнього візуального контролю й вимірювального. Він полягає в пошуку таких дефектів з'єднання, як зрушення поверхонь, оцінка геометрії ґрата. При використанні даного методу контролю необхідно пам'ятати, що висота ґрата залежить від тривалості, температури нагрівання й сили стиску деталей, що зварюються. Також необхідно розуміти, що коливання висоти ґрата пов'язане з неоднорідністю проплавлення стику по його прикладу. При цьому якщо виявлене зрушення труб, то це означає в допущенні помилки на етапі центрування.

Проблема зовнішнього огляду полягає в малій інформативності й неточності даного методу. Це пов'язане з тим, на форму ґрата впливають також і температура зовнішнього повітря, фізичні властивості матеріалу. Тому навіть при однакових умовах зварювання форма ґрата виходить різної. Неточність методу полягає в його можливості виявлення тільки критичних великих дефектів з'єднання.

Механічним випробуванням на розривній машині зазнають зварені з'єднання виконання нагрітим інструментом в стик. Якісним критерієм у цьому методі є характер руйнування зварювання. Дефекти, які може виявити такий метод – наскрізний непровар, пов'язаний з порушенням режимів зварювання або якістю попередньої підготовки заготовок. Механічним випробуванням на розривній машині є поки основним і єдиним оперативним методом оцінки якості. Показником якості зварювання є характеристичне особливості руйнування. Такий метод дозволяє виявляти дефекти недоступні при візуальному огляді з'єднань.

**Ультразвуковий контроль (УЗК) у своїй основі містить властивість**

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ультразвуку відбиватися й переломлюватися від границь розділу середовищ, що мають різні акустичні властивості. У тому числі ультразвук відбивається практично повністю від тріщин і інших дефектів, які заповнені газами. За допомогою ультразвукового контролю виявляються внутрішні дефекти: несплавки, тріщини, окремі або ланцюжка (скупчення) пор, включення. Методика УЗК дозволяє виявляти дефекти площею більш  $1,5 \text{ мм}^2$  [38].

**Випробування на статичний вигин** проводяться з використанням зразків-смужок, у яких по центру розташований зварений шов. При випробуванні на статичний вигин визначають кут вигину зразка, на якому проявляються перші ознаки руйнування.

Потрібно, щоб зразок зміг витримати кут деформування  $\geq 160^\circ$  без появи видимих дефектів (тріщини) і без руйнування. У цьому випадку результати тестування будуть вважатися позитивними.

### 3.3 Методика візуально-вимірювального контролю

Візуально-вимірювальному контролю можна піддавати зварені з'єднання поліетиленових труб, виконані в стик.

При оцінці зовнішнього вигляду шва, з використанням даного методу контролю необхідно керуватися наступними пунктами:

- колір валиків повинен бути одного кольору із трубою й не мати тріщин, пор, сторонніх включень;
- необхідно перевірити симетричність валиків поруч зі стиком по всій окружності труби;
- необхідно перевірити, щоб відношення ширини валиків грата до загальної ширини грата лежало в діапазоні  $0,3 \dots 0,7$  у незалежності від місця шва. Зварювання здійснювалося з використання сполучних деталей де дане співвідношення повинне лежати в діапазоні  $0,2 \dots 0,8$ ;

					<i>MP TAM 23.18094. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58



граничних значень, показаних у таблиці 3.2. Дане з'єднання виникає при занадто високій силі стиску деталей або при над великим нагріванні крайок. З'єднання у вигляді несиметричності грата по окружності стику (рис. 3.3 д).

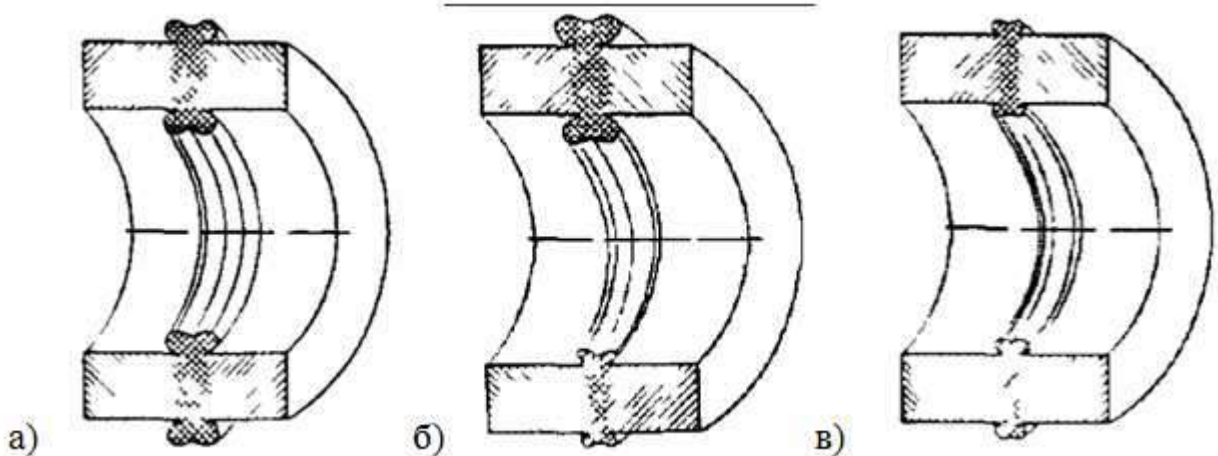
Дане з'єднання виникає, коли відмінність по висоті й ширині валиків грата по всій окружності шва перевищує 40%, виникає через неоднорідність матеріалу або товщин труб, що зварюються.

З'єднання у вигляді вузького, високого грата. Даний шлюб виникає через надмірний тиск при осаді стику при зниженій температурі нагрівача.

З'єднання у вигляді малого грата із западиною між валиками (рис. 3.3 ж). Дане з'єднання виникає через низьку температуру нагрівача при відсутності достатнього нагрівання.

З'єднання у вигляді нерівномірність (асиметричність) валиків грата (рис. 3.3 з) при відмінності по висоті валиків грата в одній площині більш 40 % з одночасним зсувом утворюючих труб більш 10 % від товщини стєки виникає внаслідок зсуву труб відносно один одного.

З'єднання у вигляді нерівномірного розподілу грата по периметру шва (рис. 3.3 і). Дане з'єднання виникає через зсув нагрівача в процесі прогріву. Висота грата в місці нерівномірного виходу більше його ширини, западина між валиками грата нечітко виражена абовідсутня. У протилежній крапці шва грат має розміри, менші на 50 % і більш.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP TAM 23.18094. 000 ПЗ

Арк.

60



оцінку розмірів зовнішнього зварювального грата.

Вимірюють шви як мінімум на двох протилежних ділянках периметра шва. Контролюють ширину й висоту зовнішнього грата із застосуванням штангенциркуля за ДСТУ 166 -88. Припустимо використовувати шаблони прохідних і непрохідних розмірів.

Симетричність контролюють шляхом виконання вимірів валика грата. При цьому ширина валика вимірюється із застосуванням вимірювальної лупи відповідно до нормативної документації ТУ 3-3.125-81.

Зсув крайок може вимірятися з використанням спеціального шаблону. Схема виміру зсуву крайок зображений на рис. 3.4. Роблять установку шаблону по утворюючої одній із труб, притискають шаблон до труби в області близько шва. Зсув крайок при цьому викликає підйом шаблону над поверхнею труби, яке можна спостерігати на іншому кінці опорного майданчика шаблону. Із застосуванням щупа по ТУ 2-034-0221197-011-91 заміряти зазор між поверхнею заготовки й п'ятою шаблону. Далі здійснюють розрахунок відносини (у відсотках) обмірюваного абсолютного значення зсуву крайок до номінальної товщини стінки труби. Точність розрахунків повинна становити 1%.

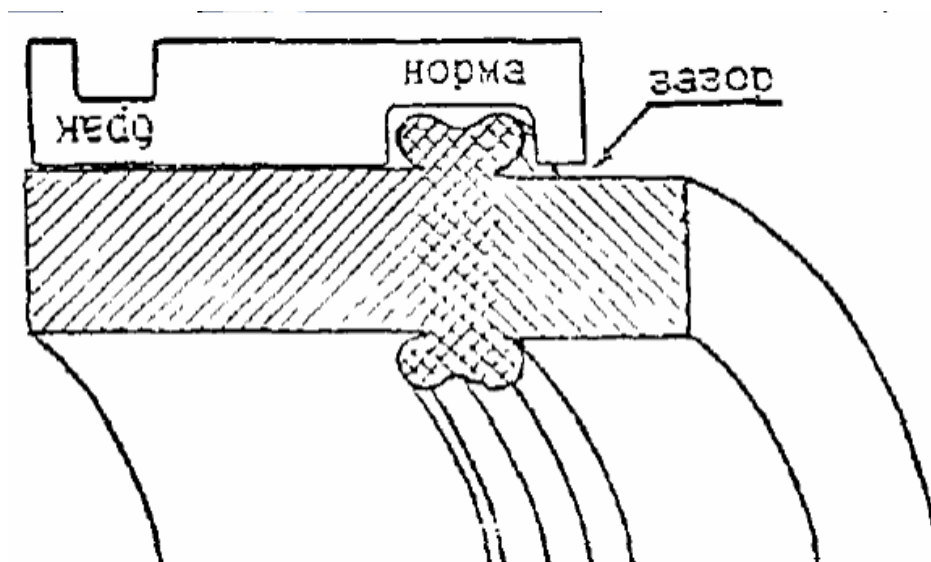


Рисунок 3.4 – Застосування шаблону для контролю шва

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

### 3.4 Методика випробування на осьове розтягування

Механічні випробування на розривній машині можна застосовувати для дослідження стикового зварювання поліетиленових труб.

Критерієм визначення якості звареного з'єднання, виконаного зварюванням в стик є характер руйнування зразків.

Існують наступні варіанти руйнувань:

Руйнування першого типу. У цьому випадку руйнування спостерігається після формування "шийки" - типового звуження площі поперечного перерізу зразка під час розтягання на одній з половин випробовуваного зразка. Руйнування настає, як правило, не раніше чим при досягненні відносного подовження більш 50 % і характеризує високу пластичність. Лінія розриву проходить по основному матеріалу й не перетинає площина зварювання.

Руйнування другого типу. У цьому випадку руйнування починається при досягненні границі текучості в момент початку формування "шийки". Руйнування настає при невеликих величинах відносного подовження, як правило, не менш 20 і не більш 50 %, і характеризує низьку пластичність. Лінія розриву перетинає площина зварювання, але носить грузлий характер.

Руйнування третього типу. У цьому випадку руйнування відбувається до досягнення границі текучості й до початку формування "шийки". Руйнування настає при подовженні зразка, як правило, не більш 20 % і характеризує тендітне руйнування. Лінія розриву проходить точно по площині зварювання.

Результати випробування вважаються позитивними, якщо при випробуванні на осьове розтягання не менш 80 % зразків мають пластичний характер руйнування I типу. Інші 20 % зразків можуть мати характер руйнування II типу. Руйнування III типу не допускається.

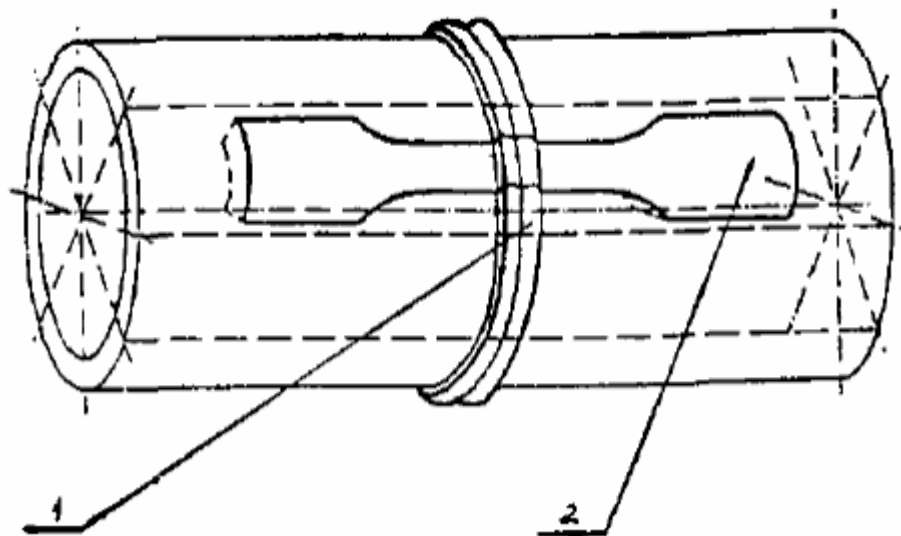
При випробуванні на осьове розтягання визначаються також границя

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

текучості й відносна подовження при розриві. За результатами випробувань формують протокол за формою, установлені вимогами СНП 3.05.02.

Випробування розривній машині шляхом тестування зразків у формі лопаток (другий тип відповідно до ДСТУ 11262). Зразки-Лопатки одержують із використанням механічної обробки з відрізків зварених з'єднань труб, що мають довжину не менш 160 мм. З кожного контрольованого стику роблять вирізку (вирубку) не менш п'яти зразків, які рівномірно розподілені по периметру шва труби.

При цьому необхідно дотримувати паралельності осі зразка й осі труби. Товщина зразка повинна відповідати товщині стінки труби. Зварене з'єднання повинне розташовуватися посередині зразка з точністю  $\pm 1$  мм. Зразки не повинні мати таких дефектів, як раковини, тріщини й повинні бути вільні від інших дефектів. Схема, по якій проводиться виготовлення зразків-лопаток для випробувань на осьове розтягання, наведена на рис. 4.3.



1 – контрольований стик; 2 – розташування зразка для механічних випробувань

Рисунок 3.5 – Схема вирізки зразків зі стику для механічних випробувань

Перед випробуванням роблять кондиціонування зразків за ДСТ

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

12423 при температурі  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  не менш 2 годин.

Випробування проводять зі швидкістю розсування затискачів іспитової машини –  $(100 \pm 10)$  мм/хв для зразків труб з номінальною товщиною стінки менш 6 мм і  $(25 \pm 2,0)$  мм/хв для зразків труб з номінальною товщиною стінки 6 мм і більш.

Існують вимога, що вказують на те, що випробування зразків на розривній машині слід проводити тільки через добу після закінчення зварювання.

У розглянутій роботі використовувалася розривна машина Р-50 (рис. 3.6). Для підвищення ефективності вимірів у базову комплектацію машини були внесені наступні зміни:

- демонтована приладова стійка розривної машини;
- на місці приладової стійки, праворуч від іспитової установки, установлений силовий блок (основні функції: живлення електронних систем розривної машини, керування електроприводом, електропривод, захист від аварійних ситуацій, сигналізація);
- кнопкова станція замінена на мікропроцесорний пульт оператора (основні функції: керування розривною машиною; вимір навантаження, переміщення, деформації, швидкості, часу; вивід даних на принтер і персональний комп'ютер; розрахунок результатів випробування відповідно до ДСТУ 1497-84);
- на іспитовій установці (зверху) установлені силовимірювальний датчик, підвісна система й аретир нового типу.

Технічна характеристика модернізованої машини Р-50:

1. Нормовані діапазони виміру навантаження – 0...50 кН:

- датчик сили 50 кН: від 2 до 50 кН;
- датчик сили 5 кН: від 0,2 до 5 кН;
- датчик сили 0,5 кН: від 0,02 до 0,5 кН;

2. Погрішності знімання вимірів сили навантаження в рамках діапазону:

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

не більш 1%.

3. Індикація навантаження від 0 до 50 кН із дискретністю:

- датчик сили 50 кН: 1 Н;
- датчик сили 5 кН: 0,1 Н;
- датчик сили 5 кН: 0,01 Н

Число сегментів індикатору навантаження – 5.

4. Діапазон виміру переміщення ( без обліку захватів) від 0 до 900 мм.

5. Погрішність виміру переміщення не більш:

- + 0,1 мм у діапазоні від 0 до 50 мм;
- + 0,5 мм у діапазоні від 50 до 900 мм.

6. Дискретність виміру переміщення: 0,01 мм.

7. Діапазони швидкості переміщення рухливої траверси: 0,1...500 мм/хв.



Рисунок 3.6 – Вимірювальний комплекс на базі розривної машини Р-50

					МР ТАМ 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Керування розривною машиною здійснюється із клавіатури мікропроцесорного пульта оператора. Можливе відображення й печатка діаграм і протоколів випробувань.

### 3.5 Методика контролю якості з використанням ультразвуку

Для контролю якості зварювання поліетиленових труб в стик може застосовуватися ультразвуковий дефектоскоп.

Число стикових з'єднань підметів ультразвуковому контролю регламентується в СНП.

При такому виді контролю застосовуються сучасні дефектоскопи, функцію, що має, запису й запам'ятовування криво татов УЗК контролю. Такі дефектоскопи дозволяють виводити необхідну інформацію як на настільний комп'ютер, ноутбук або планшет, так на принтер.



Рисунок 3.7 – Склад комплекту для ультразвукового контролю

Комплекс «СКАРУЧ» складається з наступних вузлів:

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

1. МП - механічне пристосування з датчиком виміру пройденого шляху.
2. Малогабаритний восьмиканальний дефектоскоп УІУ «СКАНЕР».
3. ІК – інформаційний кабель.
4. АБ – багатоелементний акустичний блок.

Звичайно методика роботи ультразвуковим дефектоскопом і порядок коректування його основних параметрів зазначені у відповідній інструкції.

Ультразвуковий дефектоскоп забезпечує виявлення наступних дефектів: тріщина, пори різних розмірів, небажані включення сторонніх фрагментів у шов, величина зсуву крайок деталей.

Критерії для визнання з'єднання шлюбом засновані на застосуванні ультразвукового дефектоскопа:

- наявність скупчень дефектів, чисельне значення еквівалентної площі яких  $< 10\%$  середньої товщини стінки;
- зсув крайок деталей на величину  $> 10\%$  від середньої товщини стінки;
- наявність скупчень дефектів, чисельна значення еквівалентної площі яких  $< 10\%$  середньої товщини стінки, але при цьому їх довжина  $> 15\%$  від довжини окружності труби;

Оцінка якості стикових зварених з'єднань поліетиленових газопроводів проводиться за альтернативною ознакою - "придатний" або "не придатний".

У даній роботі застосували вимірювальний комплекс «СКАРУЧ» на базі дефектоскопа «Сканер+» (рис. 3.7).

### 3.6 Методика випробування на статичний вигин

Випробуванням на статичний вигин піддають з'єднання, які виконані зварюванням нагрітим інструментом.

Для випробувань використовують зразки-смужки, у яких по центру

					МР ТАМ 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

розташований зварений шов. При випробуванні на статичний вигин визначаються кут вигину зразка, при яким проявляються перші ознаки руйнування. Результати випробування можна вважати позитивними, якщо зразки без руйнування й появи тріщин витримують вигин на кут не менш  $160^\circ$ .

Випробування на статичний вигин виконують на зразках-смужках, розміри яких наведені в табл. 3.3.

Зразки-смужки вирізують (вирубують) з контрольних стиків симетрично по периметру з однаковим кроком у кількості не менш п'яти шт.

Випробування виконують за схемою, представленої на рис. 3.8.

Таблиця 3.3 – Розміри зразків для випробування на вигин при статичних навантаженнях, мм

Розмір зразка			Довжина прольота між роликowymi опорами	Товщина траверси
Товщина	Ширина	Довжина		
$3 < h < 5$	20	150	80	4
$5 < h < 10$	20	200	90	8
$10 < h < 15$	30	200	100	12,5
$15 < h < 20$	40	250	120	16
$20 < h < 30$	50	300	160	25

Навантаження передається на зразок через траверсу, установлену на середині зразка напроти звареного шва. Місцеве стовщення грата зразка з боку опорної траверси знімається.

Іспитові зразки встановлюються таким чином, щоб внутрішня сторона труби перебувала в області розтягання.

Швидкість додатка навантаження повинна становити 50 мм/хв. Випробування тривають до досягнення кута вигину  $160^\circ$ .

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69



зовнішнього й внутрішнього грата [14, 39].



1 –вихідний зразок; 2, 3 – стадії руйнування

Рисунок 3.9 – Випробування зразків на осьове розтягання

Для кількісної оцінки міцності звареного стикового з'єднання запропонований спосіб випробувань зварених з'єднань із заданою площею зварювання, заснований на тій обставині, що зварений шов по міцності, як правило, уступає міцності основного матеріалу [40].

Для одержання зразків звареного з'єднання із заданою площею зварювання, для відповідного типорозміру пластмасової труби виготовляється шаблон з тонкого теплоізоляційного матеріалу, розташовуваного між торцями труб і перешкоджаючого їхньому зварюванню по всьому периметру матеріалу. Шаблон (рис. 3.10) забезпечує одержання зразків-лопаток із площею зварених ділянок, що відповідає або менше, чим перетин робочої частини основного матеріалу зразка-лопатки.

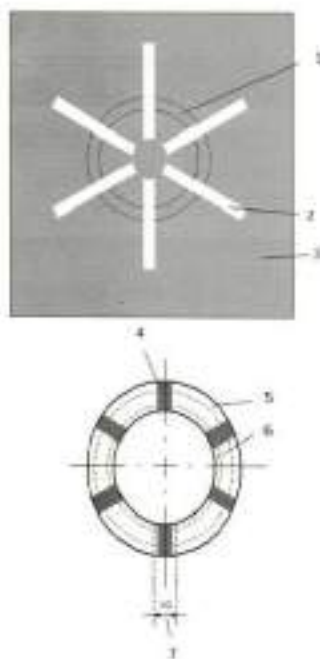
У процесі зварювання шаблон установлюється між торцями труб, що зварюються, після видалення нагрітого інструмента, тобто подальше охолодження звареного з'єднання під тиском осадки проводиться вже в контактні із шаблоном. Таким чином, досягається задана площа зварювання. Отримані за ДСТУ 11262-80 зразки-лопатки випробовували на осьове

розтягання. Тому що найменшою міцністю має область звареного з'єднання, то за умови рівності поперечного переріза зразка-лопатки й стику зварювання, руйнування відбувається по стикові звареного з'єднання.

**Площа звареного торця труби**



Рисунок 3.10 – Шаблон для одержання зразків

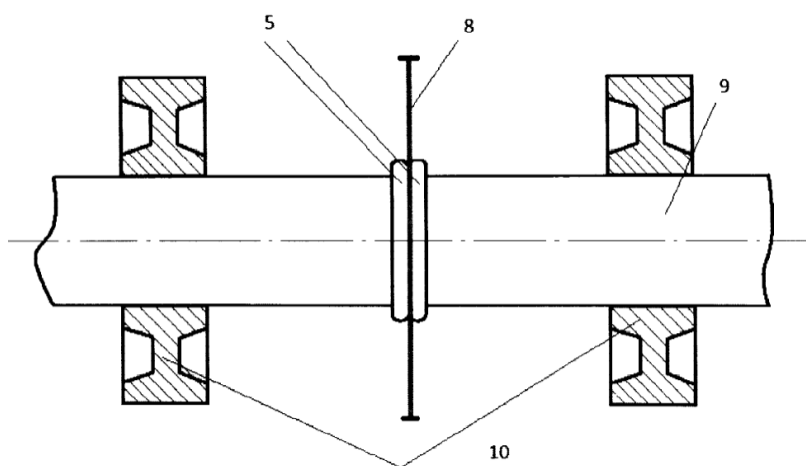


1 – розташування труби при зварюванні; 2 – виріз для зварювання торців труби; 3 – матеріал, що перешкоджає зварюванню торців труби; 4 – площа звареного торця труби; 5 – грат зовнішній; 6 – грат внутрішній; 7 – ширина, що вирізьблюється образцалопатки

Рисунок 3.11 – Шаблон для контрольного зварювання і його розташування на трубі

На рис. 3.11 наведений шаблон зі штучно нанесеними дефектами для дослідження міцності звареного стикового з'єднання так, щоб реально зварена площа була рівної або меншої чому перетин робочої частини зразка-лопатки. Унизу наведений перетин звареної труби по площині розташування шаблону: 1 - розташування труби при зварюванні, 2 - виріз для зварювання торців труби, 3 - матеріал, що перешкоджає зварюванню торців труби, 4 - площа звареного торця труби, 5 - грат зовнішній, 6 - грат внутрішній, 7 - ширина, що вирізьблюється зразка-лопатки.

На рис. 3.12 наведена схема осаджування під тиском звареного стикового з'єднання зі штучно нанесеним дефектом (шаблоном): 8 - шаблон, 9 - полімерна труба, 10 - затискачі зварювального устаткування.



5 – грат зовнішній; 8 – шаблон; 9 – полімерна труба; 10 – затискачі зварювального устаткування

Рисунок 3.12 – Схема осаджування під тиском звареного стикового з'єднання зі штучно нанесеним дефектом (шаблоном)

Методика здійснюється в такий спосіб. Для досліджуваного звареного стикового з'єднання полімерної труби заданого типорозміру заздалегідь готуються шаблони з тонкого матеріалу 3, що перешкоджає зварюванню торців труби 1, наприклад, з паперу для офісної техніки «Снігурка», згідно рис. 4.8. Виріз 2 для зварювання торців труби розташовується так, щоб у зразках-лопатках для випробувань на розтягання площі зварених ділянок 4 були рівними друг до друга, а по величині рівними або не більшими, ніж перетин робочої частини основного матеріалу зразка-лопатки 7. Потім кінці, що зварюються полімерних труб 9 установлюють у затискачі зварювального встаткування 10, центрують по зовнішній поверхні, роблять зрізання нерівностей торця труби, торці труб приводять у безпосередній контакт із нагрітим до або вище температури плавлення матеріалу труби інструментом, що мають плоску поверхню оплавлення, потім інструмент видаляють, а замість нього вводять один із приготовлених шаблонів, і оплавлені торці, між якими перебуває шаблон 8, осаджують під тиском і витримують під цим тиском певний час, диктуєме швидкістю охолодження й релаксаційними процесами у зваренні з'єднанні (рис. 4.9). Матеріал, витиснутий зі стику під тиском опади, утворює зовнішній 5 і внутрішній 6 зварювальний грат, як при звичайнім зварюванні без використання шаблону.

Через 24 годин після виробництва зварювання виготовляють зразки-лопатки типу 2 за ДСТУ 11262 [41] рівномірно по периметру шва не менш п'яти зразків так, щоб область зварювання перебувало на середині зразка-лопатки. Випробування на розтягання зразків-лопаток роблять відповідно до ДСТУ 11262. Обробку результатів випробувань проводять прийнятими методами.

Якщо перетину тестуємих заготовок однаково й у поперечному напрямку й у стику зварювання, то при випробуваннях руйнування відбувається по стикові зварювання. Це пов'язане з тим, що міцність у зоні зварювання

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

найменша.

Це дозволяє при використанні даної методики визначати міцність зварювання по стикові з виключенням впливу внеску гранту в одержувані міцнісні характеристики.

Механічні випробування зразків проводилися на розривній машині Р-50 з урахуванням вимог ДСТУ 11262. При цьому швидкість навантаження заготовок – 25 мм/хв.

При випробуваннях руйнування тестуємих зразків відбувалося в місці сплавки деталей.

При випробуваннях проводилося знімання діаграми « навантаження-деформація» з якої визначалося максимальне навантаження  $P_{раз}$ , що викликала руйнування зразка.

При цьому напруга  $\sigma$  при руйнуванні зразка визначалося в

$$\sigma = \frac{P_{раз}}{S}, \quad (3.1)$$

де  $S$  – площа звареного ділянки.

При проведенні досліджень використовувалася машина для стикового зварювання полімерних труб нагрівальним елементом Roweld P160 SANILINE (рис. 3.13). Експериментальне зварювання труб проводилося на трубах ПЕ 80 SDR 11 63×5,8. Це труба діаметром усього 63 мм. Однак, для організації магістрального трубопроводу може бути використана машина Roweld P1200, яка дозволяє здійснювати зварювання полімерних труб діаметром до 1200 мм (рис. 3.14).

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75



Рисунок 3.13 – Машина для стикового зварювання полімерних труб нагрівальним елементом Roweld P160 SANILINE, яка використовувалася при експериментальній зварюванні



Рисунок 3.14 – Зварювання магістрального трубопроводу з полімерних труб за допомогою машини Roweld P1200

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76



кімнатній температурі для даного типорозміру поліетиленової труби не приводить до зниження міцності звареного шва (рис. 3.20).

Зменшення часу охолодження стику під тиском опади не впливає на міцність звареного шва (рис. 3.21).

Таким чином, був запропонований метод кількісної оцінки міцності стикового звареного з'єднання полімерної труби по стикові, за допомогою якого можна підібрати технологічні режими зварювання з найбільшою міцністю.

Збільшення технологічної паузи в 2... 3 рази не приводить до зменшення міцності звареного з'єднання полімерних труб.

Зменшення часу остигання звареного з'єднання під тиском опади не виявляє впливу на міцність по стикові звареного з'єднання поліетиленових труб.

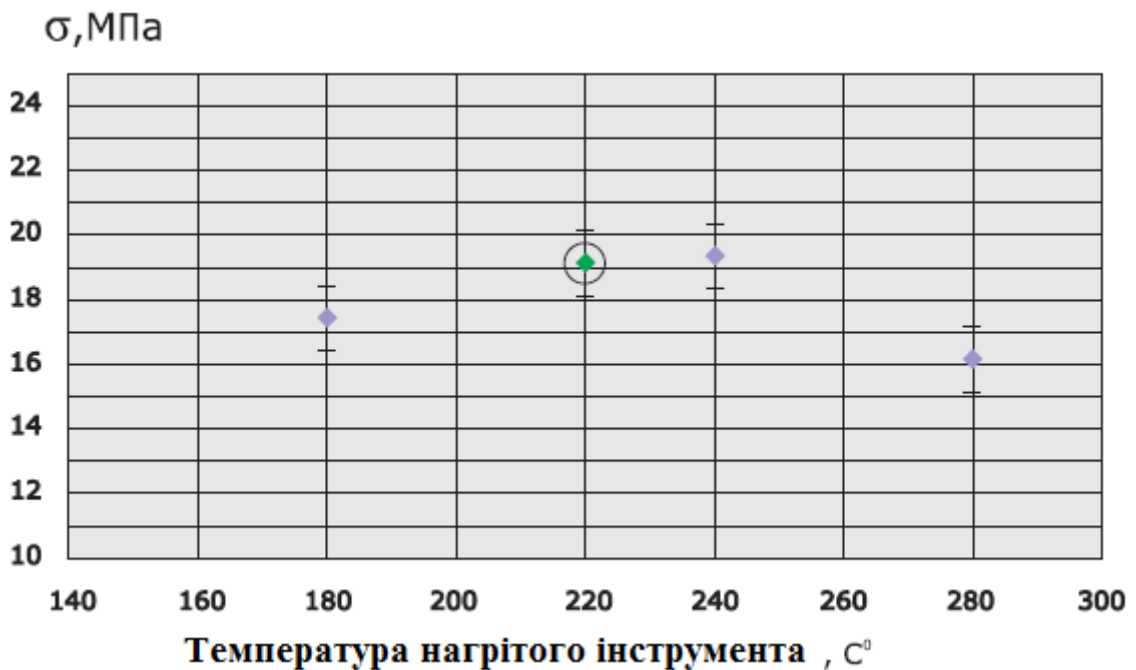


Рисунок 3.16 – Гранична напружка з'єднань, залежно від температури нагрівального інструмента

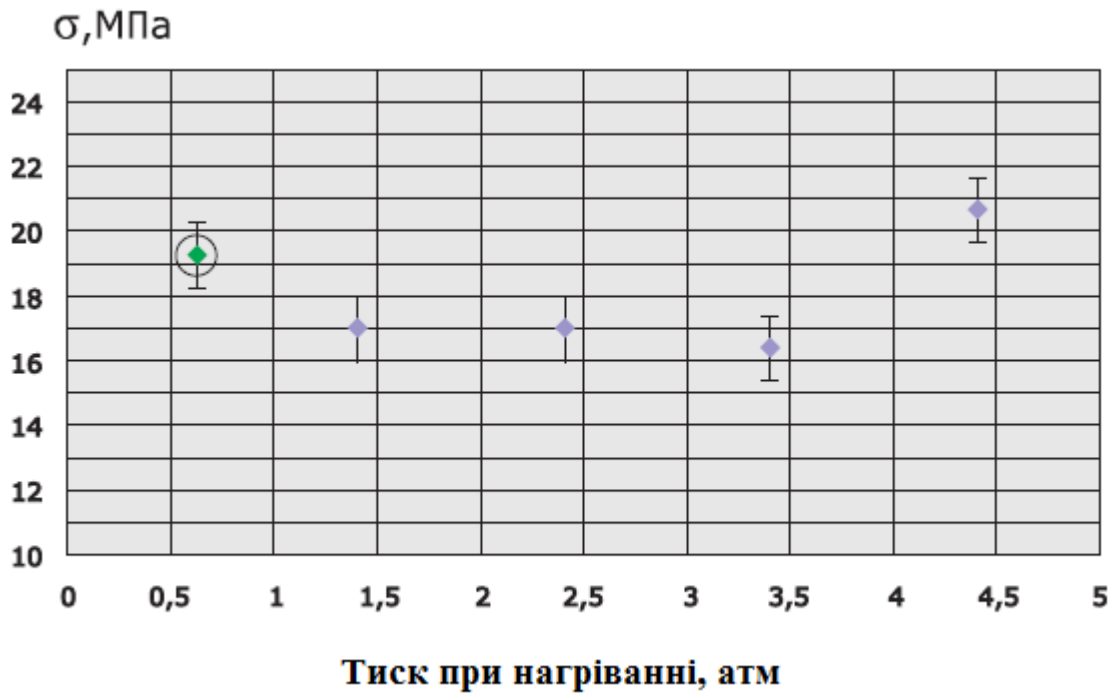


Рисунок 3.17 – Руйнівне напруження зварених з'єднань при різних тисках при нагріванні торців, що зварюються труб



Рисунок 3.18 – Руйнівне напруження зварених з'єднань, отриманих при різних тисках при осаді

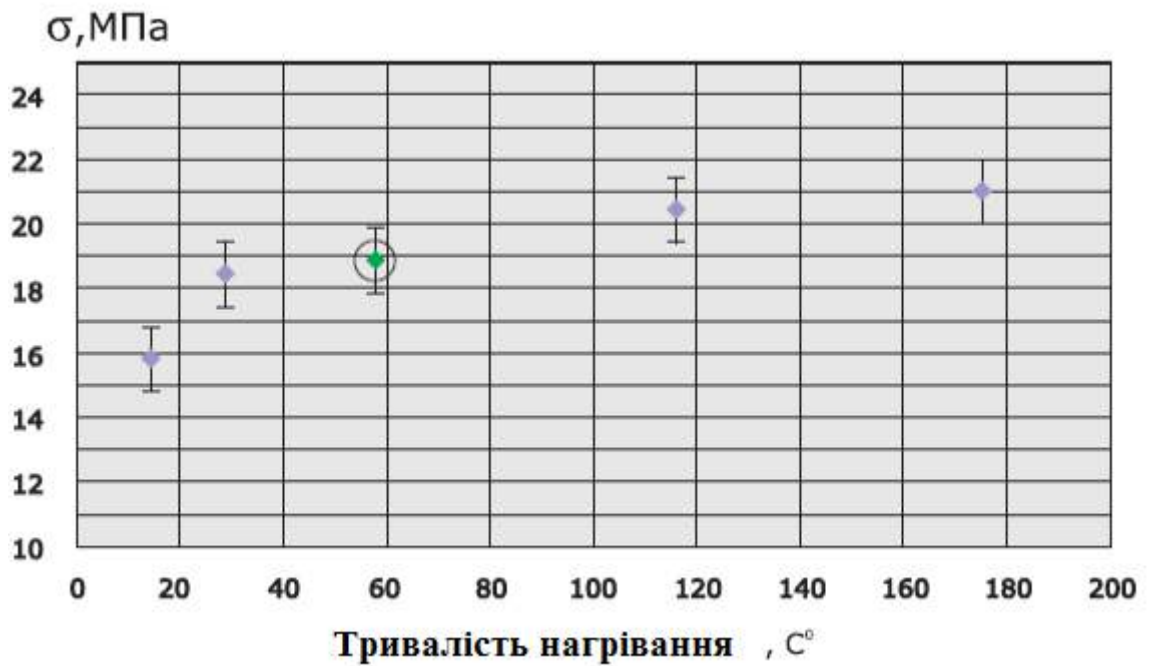


Рисунок 3.19 – Руйнівне напруження залежно від тривалості нагрівання торців, що зварюються труб



Рисунок 3.20 – Руйнівне напруження зварених з'єднань залежно від тривалості технологічної паузи



Рисунок 3.21 – Гранична напруга з'єднань отримані при різних значеннях часу охолодження

## ВИСНОВОК

У магістерській роботі досягалася мета – підвищення продуктивності і якості виконуваних робіт при ремонтнім і монтажнім зварюванні полімерних трубопроводів на основі вивчення теплових і фізичних процесів у з'єднанні, що зварюється.

При аналізі стану питання був виконаний огляд науково-технічної літератури в області зварювання полімерних трубопроводів. Проведене комплексне дослідження історії розвитку технології зварювання полімерних трубопроводів для транспортування вуглеводнів. Були розглянуті основні методи, властивості й технічні засоби. У міру відкриття нових матеріалів проходить удосконалювання технології виробництва й зварювання труб, розробляються різні добавки, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості полімерних матеріалів. Як найбільш перспективний і має саме широке застосування при зварюванні полімерних трубопроводів, відзначений спосіб стикового зварювання нагрітим інструментом. Як одна з головних складностей зварювання полімерних магістральних трубопроводів відзначене погіршення властивостей зварених з'єднань при зварюванні в умовах знижених температур.

Для підвищення ефективності устаткування на підставі короткого огляду технологічних операцій при зварюванні трубопроводів з полімерних труб запропонована компоновальна схема устаткування для зварювання магістральних трубопроводів. Запропонована схема дозволяє автоматизувати основні й допоміжні операції, підвищити продуктивність і поліпшити умови праці зварників. Також при використанні запропонованого устаткування суттєво підвищується якість виконуваного трубопроводу за рахунок зменшення напруги вигину в батозі, що зварюється, трубопроводу.

Дослідження теплових процесів при зварюванні полімерних труб

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

дозволили встановити, що в умовах негативних температур навколишнього повітря необхідна температура нагрівання торців труб може бути забезпечена шляхом продовження стадії оплавлення. Для підвищення якості зварених з'єднань, виконаних при негативних температурах навколишнього повітря, запропонована технологія зварювання, що передбачає додатковий прогрів труб за рахунок збільшення часу контакту труб з нагрітим інструментом на стадії оплавлення й остигання труб на стадії охолодження в замкненому обсязі.

Для підвищення ефективності технології був проведений огляд і аналіз науково-технічної інформації з питання контролю якості зварених з'єднань полімерних труб, виконаних стикове зварюванням нагрітим інструментом. Дослідження ефективності різних методів руйнуючого й неруйнуючого контролю якості показують, що існуючі випробування найчастіше не дозволяють виявити порушення технології зварювання й забезпечити одержання кількісної оцінки міцності звареного з'єднання.

Запропонована методика дозволяє дати оцінку міцністним властивостям різних зон звареного стикового з'єднання полімерних труб. Експериментальне зварювання й випробування образів за запропонованою методикою дозволила встановити, що міцність шва звареного з'єднання поліетиленових труб марки ПЕ 80 ГАЗ SDR11 на 11...20 %, нижче чим міцність основного матеріалу.

Проведені дослідження були проведені на трубах з поліетилена ПЕ80 діаметром 63 мм, вони дозволили запропонувати заходу щодо підвищення ефективності устаткування й технології зварювання полімерних трубопроводів. Отримані результати з урахуванням наявної інформації про рівень техніки дозволяють зробити висновок про ефективність застосування результатів справжнього дослідження при зварюванні магістральних газопроводів.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нестеренко, Н. П. Моделювання температурних полів і напруг у поліетиленових трубах при зварюванні нагрітим інструментом / Н. П. Нестеренко, І. К. Сенченков, О. П. Червинко, М. Г. Менжерес // Автоматичне зварювання. – 2009. – № 2. – С. 11–15.

2. Akkurt, A. An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas pipes / A. Akkurt, [і ін.] // International journal of electronics; mechanical and mechatronics engineering . – 2012. --№ 2. – pp. 493–504.

3. Faraz, A. Effect of Welding Parameters on the Structural Performance of Fusion Welded Extruded and Injection Molded HDPE Joints / A. Faraz, [і ін.] // Journal of Space technology. – 2014. – № 1. – pp. 114–119.

4. Старостин, Н. П. Контактне зварювання поліетиленових труб оплавленням при низьких температурах навколишнього середовища / Н. П. Старостин, О. А. Амосова // Зварювальне виробництво. – 2007. – № 4. – С. 17–20.

5. Kumar, S. Fine Element Simulation of Resistance Welding of High Density Polyethylene Pipe / S. Kumar, Y. Kumar, A. Singh // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2014. – Vol. 2. – pp. 89–97.

6. Нестеренко, Н. П. Моделювання температурних полів і напруг у поліетиленових трубах при зварюванні нагрітим інструментом / Н. П. Нестеренко, І. К. Сенчиков, О. П. Червинко, М. Г. Менжерес // Автоматичне зварювання. – № 2. – 2009. – С. 11–15.

7. Зубаиров, Т. А. Аналіз основних нормативних документів на полімерні матеріали для газопроводів / Т. А. Зубаиров, Б. Н. Мастобаев, М. М. Фаттахов // Науково-інформаційний збірник Нефтегазохимия. Випуск 3. Москва 2014. – С. 25–27.

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

8. ДСТУ 16338-85 поліетилен низького тиску. Технічні умови. Міждержавний стандарт книжковий номер. Використання й видавниче оформлення. – М: Стандартиформ, 2005. – 35 с.

9. ТУ 6–5–1983–87 Композиції поліетилену низького тиску для труб сполучних деталей газорозподільних мереж. Технічні умови.

10. Виробництво композиційних полімерних матеріалів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.steelexpo.ru>

11. PIPELIFE розстався з SOLVAY / Полімерні труби: Інформаційно-аналітичний журнал. – № 1. – 2012. – С. 5–6.

12. Труби полімерні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.pe-pipe365>.

13. СП 42-103-2003. Звід правил по проектуванню й будівництву. Проектування й будівництво газопроводів з поліетиленових труб і реконструкція зношених газопроводів.

14. Еккерт, Р. Сполучні деталі для поліетиленових труб. Конструкція фітингів із заставної нагрівальною спіраллю і її вплив на якість звареного з'єднання / Роберт Еккерт // Полімергаз. – 2003. – № 3. – С. 44–49.

15. Герасимов, А. І. Способи випробування звареного з'єднання полімерних труб / А. І. Герасимов, Г. В. Ботвин, Е. В. Данзанова // Арктика XXI століття. Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 64–76.

16. Родіонов, А.К. Тріщиностійкість зварених стикових з'єднань поліетиленових труб / А. К. Родіонов, Ф. І. Бабенко, Н. А. Коваленко // Матеріали. Технології. Інструменти. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 19–20.

17. Barber, P. The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt fusion welding certain grades of polyethylene, polybutene-i and polypropylene pipes / P. Barber, J. R. Atkinson // Journal of materials science. – 1974. – vol. 9. – pp. 1456–1466.

18. Красников, М. А. Механіка руйнування стикових зварених з'єднань поліетиленових труб при випробуваннях на розтягання статичним

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

навантаженням / М. А. Красников, Ю. В. Пожалов, В. А. Соколов // Полимергаз. – 2011. – № 1. – С. 36–38.

19. Шурайц, А. Л. Газопроводи з полімерних матеріалів: допомога із проектування, будівництва й експлуатації / А. Л. Шурайц, В. Ю. Каргин, Ю. Н. Вольнов. – Саратов: ИзддВ «Волга-XXI століття», 2007. – 612 с.

20. Максименко, В. Н. Підвищення усталостної міцності з'єднань труб з ПЕВП, виконаних зварюванням оплавленням в стик / В. Н. Максименко // Зварювальне виробництво. – 1982. – № 1.

21. Адаменко, А. А. Підвищення якості з'єднань пластмасових труб, виконаних тепловий-тепловім-теплого-тепловим-теплове-тепловому-теплове-теплове-контактно-теплове зварюванням / А. А. Адаменко, Г. Н. Кораб, В. П. Тарногородский // Автоматичне зварювання – 1983. – № 3. – С. 51–53.

22. Аксьонова, Г. В. Контроль якості зварених з'єднань труб з поліетилену по характеру руйнування при осьовім розтяганні / Г. В. Аксьонова, Е. А. Кашковская // Автоматичне зварювання. – 1980. – № 2. С. 61–63.

23. Lai, H. S. Effect of defects on the burst failure of butt fusion welded polyethylene pipes / H. S. Lai, [і ін.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – pp. 1973–1981

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Додатки

					MP TAM 23.18094. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87