

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»  
Кафедра будівництва

Николяк Василь Ярославович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.22:669.018.25  
(індекс)

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**Дослідження впливу мікроструктури**

**на механічні характеристики зварних швів трійника магістрального  
трубопроводу**

(назва роботи)

Зварювання та споріднені технології

---

(назва освітньої програми)

G9 Прикладна механіка

---

(шифр і назва спеціальності)

*Николяк Василь Ярославович*

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник *Шлапак Любомир Степанович, д.т.н. проф.*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

*Андрусак А.В.*

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

---

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Івано-Франківськ – 2025**

Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»

Кафедра будівництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Освітня програма зварювання та споріднені технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

## **З А В Д А Н Н Я**

### **НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Николяку Василю Ярославовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема наукової роботи **Дослідження впливу мікроструктури на механічні характеристики зварних швів трійника магістрального трубопроводу**

керівник магістерської роботи д.т.н., Шлапак Л.С.,

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи дослідні взірці зі сталі марки 09Г2С вирізані з трійника магістрального газопроводу

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які 1**

1.Сучасний стан виготовлення трійників для магістральних трубопроводів. 1.1

Опис виробу та умов його експлуатації. 1.2 Характеристика матеріалу

виробу. 1.3 Особливості базової технології зварювання трійників. 1.4

Обґрунтування вибору способу зварювання магістральних трубопроводів. 2

Методика виготовлення зразків та виконання досліджень мікроструктури. 2.1

Методика проведення мікроструктурних досліджень. 2.2 Методика

одержання зразків для випробувань на статичний розтяг. 3 Результати

мікроструктурних досліджень. 3.1 Дослідження мікроструктури макрошліфа

зварного шва. 3.2 Випробування розтягом зразків трійника. 4. Дослідження

впливу мікроструктури на втомну міцність сталі 09Г2С.

5. Перелік графічного матеріалу

15 слайдів презентації за матеріалами кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1-4</i>	<i>Шлапак Любомир Степанович</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i><u>Сучасний стан виготовлення трійників для магістральних трубопроводів.</u></i>		
<i>1.1</i>	<i><u>Опис виробу та умов його експлуатації.</u></i>		
<i>1.2</i>	<i><u>Характеристика матеріалу виробу.</u></i>		
<i>1.3</i>	<i><u>Особливості базової технології зварювання трійників.</u></i>		
<i>2</i>	<i><u>Методика виготовлення зразків та виконання досліджень мікроструктури.</u></i>		
<i>2.1</i>	<i><u>Методика проведення мікроструктурних досліджень.</u></i>		
<i>2.2</i>	<i><u>Методика одержання зразків для випробувань на статичний розтяг.</u></i>		
<i>3.</i>	<i><u>Результати мікроструктурних досліджень.</u></i>		
<i>3.1</i>	<i><u>Дослідження мікроструктури макрошліфа зварного шва.</u></i>		
<i>3.2</i>	<i><u>Випробування розтягом зразків трійника.</u></i>		
<i>4</i>	<i><u>Дослідження впливу мікроструктури на втомну міцність сталі 09Г2С.</u></i>		
	<i>Висновки.</i>		

Студент

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Николяк В.Я.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
( підпис )

Шлапак Л.С.

(прізвище та ініціали)

## ***АНОТАЦІЯ***

Магістерська робота на тему «Дослідження впливу мікроструктури на механічні характеристики зварних швів трійника магістрального трубопроводу» складається із 15 слайдів презентації, пояснювальної записки із 52 аркушів, 34 рисунків, 5 таблиць та 29 посилань на використану літературу та додатків.

На основі проведених досліджень зроблено висновок про позитивний вплив відпалючого валика, на механічні властивості зварних з'єднань при виготовленні трійників зі сталі 09Г2С.

При зварюванні конструкцій для магістральних трубопроводів зі сталі 09Г2С слід звернути особливу увагу на формування облицювального шару, який може стати осередком зародження втомних тріщин при експлуатації трубопроводу.

*КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗВАРЮВАННЯ, ТРУБОПРОВІД, ТЕХНОЛОГІЯ, СТАЛЬ.*

## **ABSTRACT**

Master's thesis " Study of the influence of microstructure on the mechanical characteristics of welds of a main pipeline tee" consists of the 15 sheets of graphics, 52 pages of notes, 34 figures, 5 tables and 29 references to the literature.

Based on the conducted research, a conclusion was made about the positive effect of the annealing roller on the mechanical properties of welded joints in the manufacture of tees from 09G2S steel.

When welding structures for main pipelines from 09G2S steel, special attention should be paid to the formation of a facing layer, which can become a source of fatigue cracks during pipeline operation.

**KEYWORDS: WELDING, PIPELINE, TECHNOLOGY, STEEL.**

## Зміст

Вступ.....	5
1 Сучасний стан виготовлення трійників для магістральних трубопроводів.....	8
1.1 Опис виробу та умов його експлуатації.....	8
1.2 Характеристика матеріалу виробу.....	11
1.3 Особливості базової технології зварювання трійників.....	17
1.4 Обґрунтування вибору способу зварювання магістральних трубопроводів.....	23
2 Методика виготовлення зразків та виконання досліджень мікроструктури.....	30
2.1 Методика проведення мікроструктурних досліджень.....	30
2.2 Методика одержання зразків для випробувань на статичний розтяг.....	35
3 Результати мікроструктурних досліджень.....	37
3.1 Дослідження мікроструктури макрошліфа зварного шва.....	37
3.2 Випробування розтягом зразків трійника.....	40
4 Дослідження впливу мікроструктури на втомну міцність сталі 09Г2С....	43
Висновки.....	49
Список використаних джерел.....	50
Додатки.....	53

					<b>КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ</b>			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Дослідження впливу мікроструктури на механічні характеристики зварних швів трійника магістрального трубопроводу	<i>Літ.</i>	<i>Арк</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Николяк В.Я.</i>					4	52	
<i>Перевір.</i>	<i>Шлапак Л.С.</i>					<b>ІФНТУНГ</b> <b>ПМЗм-24-1</b>		
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. контр.</i>	<i>Матвієнків О.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Андрусяк А.В.</i>							

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність проблеми підвищення якості зварювання відводів та трійників для магістральних трубопроводів зумовлена значним збільшенням числа замовлень на ці вироби, що надходять на відповідні підприємства [1]. Трійники та відводи виготовляються із трубної сталі марок 10Г2ФБЮ та 09Г2С. Ця сталь має високу теплопровідність і характеризується підвищеною в'язкістю.

Будівництво та ремонт магістральних газопроводів та нафтопроводів потребує збільшення кількості трубних вузлів, у тому числі й трійників [2]. При цьому виготовлення трійників у заводських умовах дозволяє суттєво підвищити продуктивність та якість виконання цього відповідального трубного вузла.

Нині на об'єктах НАК «Нафтогаз України» спостерігається зменшення частки застосування штампованих трійників на користь збільшення частки зварних трійників [3]. Це пояснюється перевагами застосування зварних трійників.

Першою перевагою є відсутність шкідливого термічного впливу на основний метал при виробництві вихідних заготовок. Тому, можна констатувати низьку стабільність властивостей штампованих трійників.

Другою перевагою зварних трійників перед штампованими трійниками є їхня технологічність. Для виготовлення зварних трійників немає необхідності використання складного оснащення та обладнання, застосування яких вносить додаткове зменшення стабільності якості через людський фактор.

Третьою перевагою є висока продуктивність виготовлення зварних трійників у порівнянні зі штампованими трійниками.

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		5

Однак застосування зварних трійників обмежується суттєвим їх недоліком, а саме наявністю геометричного концентратора напружень, який може призвести до зниження експлуатаційних властивостей зварного трійника в порівнянні зі штампозварним трійником.

За рахунок запровадження додаткових технологічних заходів негативний вплив зварного шва можна мінімізувати. Використання перспективних способів зварювання та підвищення точності виконання заготовок покликані підвищити частку зварних трійників під час виготовлення магістральних трубопроводів.

Оскільки в процесі експлуатації магістрального трубопроводу його елементи піддаються статичним та повторно-статичним навантаженням, під дією зовнішніх факторів швидкість руйнування трубопроводу зростає.

Найбільше руйнувань зазнають ділянки та елементи трубопроводу, які мають конструктивні концентратори напружень. Насамперед, як такий концентратор виступає трійникове з'єднання [4].

Мета роботи – дослідження впливу мікроструктури на механічні характеристики зварних швів трійника магістрального трубопроводу.

Об'єктом дослідження є мікроструктура зварних швів, механічні властивості металу трійника трубопроводу.

Предметом дослідження є граничне напруження, деформівність зварних швів, мікроструктурні зміни в області зварних швів.

Завданнями дослідження магістерської роботи є:

- проведення мікроструктурних досліджень зварних швів трійника трубопроводу;
- підвищення ударної в'язкості зварних швів при виготовленні зварних трійників магістральних трубопроводів;
- дослідження впливу мікроструктури на втомну міцність зварних швів трійника трубопроводу.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		6

**Методи досліджень.** Експериментальні методи макро- та мікроструктурного аналізу, дослідження на ударну в'язкість, зварювання зразків виконувалося MIG методом зварювання.

**Наукова новизна.** Вивлено, що інкубаційний період зародження втомної тріщини для зразків сталі 09Г2С з надрізом з боку облицювального шару становить  $(1,5...2) \cdot 10^5$  циклів, а для зразків з надрізом з боку кореня шва –  $(3,2...3,5) \cdot 10^5$  циклів.

**Практичне значення.** Отримані результати будуть корисними при розробленні технологій виготовлення та ремонту трійників газопроводів зі застосуванням зварювальних технологій.

**Апробація результатів роботи.** Р.І. Городиський Відновлення засувки трубопроводу наплавленням / Р.І. Городиський, В.Я. Николяк // Матеріали VIII міжнародної науково - технічної конференції “Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання”. – 2025. – Т.1. – С. 255.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 29 найменувань. Загальний обсяг магістерської роботи становить 52 сторінки, містить 34 рисунки, 5 таблиць, додатки.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		7

# 1 Сучасний стан виготовлення трійників для магістральних трубопроводів

## 1.1 Опис виробу та умов його експлуатації

У зварному трійнику можна виділити три найнебезпечніші перерізи, які представлені на рисунку 1.1 [5]. На рисунках 1.2 представлені розподіли полів еквівалентних напружень при експлуатації зварного трійника ТС 1020×720.

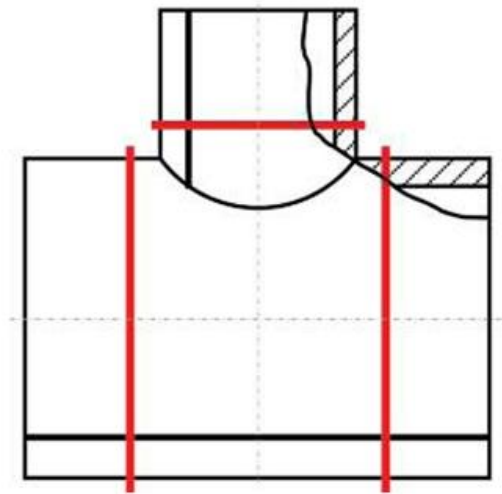


Рисунок 1.1 – Небезпечні перерізи на зварному трійнику, що розглядається

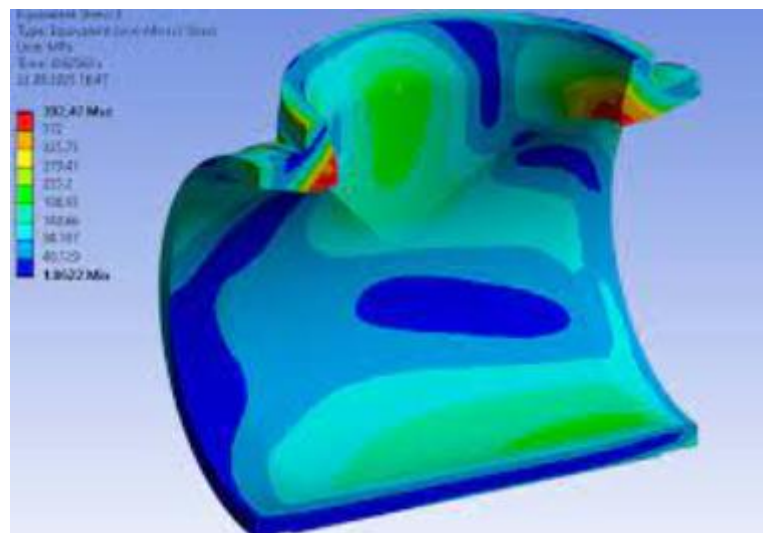


Рисунок 1.2 – Еквівалентні напруження в трійнику ТС 1020×720 [6]

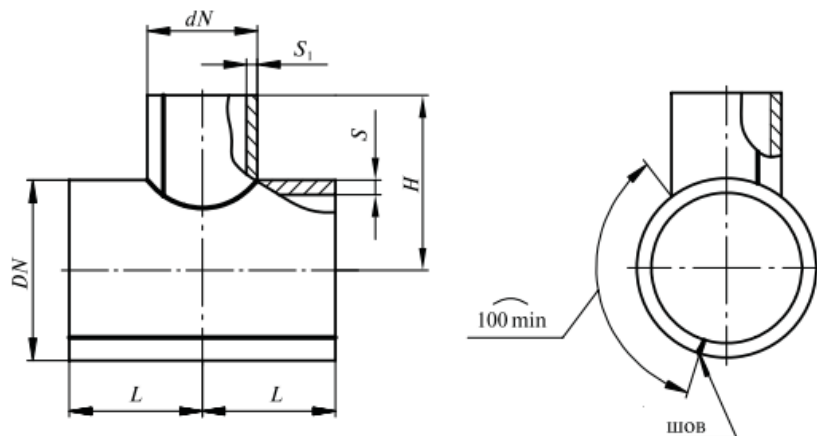
					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		8

Встановлено, що величина локальних еквівалентних напружень при експлуатації трійників ТС 1020×720 не перевищує 426 МПа, а величина середніх еквівалентних напружень у небезпечних перерізах – 237 МПа. Таким чином, рівень допустимих напружень не перевищений і становить всього 53% від максимально допустимої величини. Допустима кількість циклів навантаження в цьому випадку становить 2896 циклів, що відповідає терміну експлуатації трійника 90 років.

Величина локальних еквівалентних напружень у трійниках ТС 1420×1020 не перевищує 465 МПа, а величина еквівалентних напружень у небезпечних перерізах – 245 МПа. Таким чином, рівень напружень складає всього 56 % від допустимого, що відповідає кількості циклів навантаження 2850 і терміну експлуатації трійника – 89 років [6].

Зазначені терміни експлуатації зварних трійників перевищують нормативний термін служби, встановлений у кількості 40 років.

Одним з технічних параметрів зварного трійника, що істотно впливає на його експлуатаційні властивості, є конструкційна довжина  $2L$  трійника, показана на рисунку 1.3.



$H$  та  $L$  – висота та напівдовжина трійника,  $DN$  та  $dN$  – умовні діаметри магістралі та відгалуження трійника,  $S$  та  $S_1$  – товщина стінки магістралі та відгалуження

Рисунок 1.3 – Розмір зварного трійника

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		9

Для випробування були використані трійники з рівними проходами  $dN=DN=1020$  мм та конструктивною довжиною  $L=750$  мм та  $L=1025$  мм. Трійники виготовлялися із сталі 09Г2С. Розрахунок напружено-деформованого стану трійників виконувався для внутрішнього тиску 9,8 МПа. Встановлено, що рівень напружень для зразків становив відповідно 727 МПа та 703 МПа, що суттєво перевищує межу плинності матеріалу, що дорівнює 441 МПа. При цьому рівень деформації в трійниках незначний і становить відповідно 9,3% і 5,4% (рис. 1.4), що суттєво менше, ніж нормативне відносне видовження 19 %.

Для різних дефектів зварних швів, які можуть спостерігатися в зварних трійниках, розраховано ресурс працездатності трійників при циклічному навантаженні від 0,98 до 9,8 МПа, представленого в таблиці 1.1 [7]

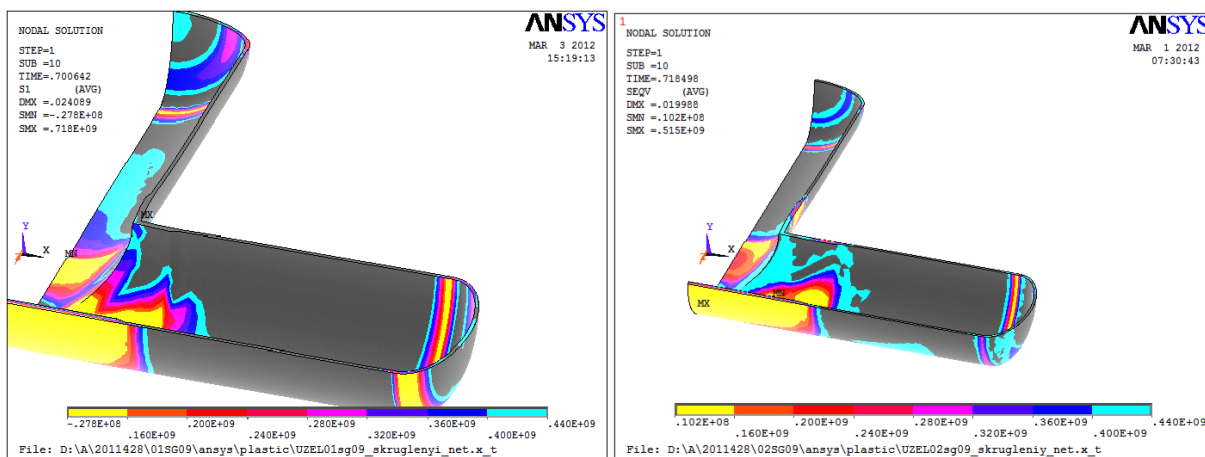


Рисунок 1.4 – Пластичні деформації при навантаженні трійника № 1 (а) і трійника № 2 (б)

Таблиця 1.1 – Робочий ресурс зварних трійників при циклічному навантаженні

Виконання	Кількість циклів навантаження до руйнування		
	Тріщина 2 мм	Тріщина 3 мм	Тріщина 4 мм
Трійник № 1	14000	12000	10500
Трійник № 2	17000	14000	12500

Таким чином, встановлено, що скорочення будівельної довжини зварного трійника призводить до збільшення концентрації напружень в ньому на 3...4 %. При цьому рівномірність трійників і металу труб зберігається, оскільки до пластичної деформації долучається основний метал самої труби.

Наявність у зварному шві дефектів призводить до зменшення ресурсу зварного трійника на 20%.



Рисунок 1.5 - Зварний трійник

Зварний трійник III типу з підсилюючими накладками, представлений на рисунку 1.5, що встановлюється на магістральному трубопроводі служить для поділу потоків середовища, що транспортується. У місці зварного з'єднання патрубків та обичайки (основної труби) забезпечується підвищена міцність за рахунок застосування підсилювальної накладки. Такий трійник здатний витримувати більший тиск у порівнянні з трійником без накладки. Вартість виготовлення такого трійника суттєво нижча, ніж вартість виготовлення безшовного аналога.

## 1.2 Характеристика матеріалу виробу

Трійники та відводи виготовляються із трубною сталлю марки 09Г2С. Ця сталь має високу теплопровідність і характеризується підвищеною в'язкістю.

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		11

Основні фізико-механічні та теплофізичні властивості сталі 09Г2С представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні фізико-механічні та теплофізичні властивості сталі 09Г2С

Твердість	Межа міцності	Питома теплопровідність	Питома теплопровідність	Густина	Температура плавлення	Температуропровідність 10 <sup>-6</sup>
НВ	МПа	Вт/м·°С	Дж/кг·°С	кг/м <sup>3</sup>	°С	м <sup>2</sup> /с
<240	490	43...80	494	7850	1350	11,08...20,6

Однією з складностей, що виникають при зварюванні сталі 09Г2С, є знижена ударна в'язкість навколошовних зон у зварних з'єднаннях [8], [9]. Слід зазначити значний вплив хімічного складу основного металу на ударну в'язкість навколошовної зони [4]. Зниження ударної в'язкості в більшості випадків спостерігається через перегрівання металу, що призводить до підростання зерна. Такий перегрів, що викликає небажані зміни структури основного металу, найчастіше спостерігається при електродугових способах зварювання металів [10]. Для підвищення ударної в'язкості застосовують термічну обробку зварних з'єднань «гартування + нормалізація». В подальшому, пластичні властивості металу підвищують шляхом застосування відпуску конструкції після зварювання, який одночасно призводить до зменшення залишкових напружень в ній. Тому, якщо вихідний основний метал досить високої якості, а зварне з'єднання виконане без дефектів і концентраторів напружень, то за умови правильно виконаної термічної обробки зварна конструкція добре чинитиме опір ударним навантаженням [2], [11].

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		12

Ударна в'язкість зварних з'єднань може знижуватися через хімічну та структурну неоднорідність металу, утворення мікротріщин у процесі виготовлення заготовок та кристалізації зварних швів. Кристалізація сплаву відбувається в інтервалі температур, а не за однієї температури, як при кристалізації чистого металу [8]. Внаслідок цього виникає хімічна неоднорідність, яка збільшується при зростанні температурного інтервалу кристалізації. У процесі ліквідації відбувається зниження якості металу, яке проявляється неоднорідністю властивостей по об'ємі металу [8], [12].

При випробуваннях на ударну в'язкість згідно з ГОСТ 6996-66 можуть бути отримані незадовільні значення ударної в'язкості зварних з'єднань із сталі 09Г2С. Наприклад, при зварюванні трійників зі сталі 10Г2ФБЮ і 09Г2С замовником були потрібні значення ударної в'язкості КСУ60=70 Дж/см<sup>2</sup> і КСV40=50 Дж/см<sup>2</sup>. При зварюванні ж зразків були отримані значення ударної в'язкості КСУ60=22,5 Дж/см<sup>2</sup> і КСV40=26,6 Дж/см<sup>2</sup>, що істотно нижчі вимог замовника [13].

Вміст хімічних елементів у сталі 09Г2С представлено в таблиці 1.3. Оскільки сталь 09Г2С має малий вміст вуглецю, то вона володіє гарною зварюваністю. Конструкції, зварені з цієї сталі, можуть успішно експлуатуватися за температури від -70 °С до +450 °С. Зі сталі 09Г2С виготовляють заготовки для нафтохімічної, будівельної та добувної промисловості. Правильне поєднання зварювання та термічної обробки дозволяє виготовляти трубопровідну арматуру високої якості.

Таблиця 1.3 - Вміст хімічних елементів у сталі 09Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,008

Зварювання сталі 09Г2С проводять як без попереднього підігріву, так і з підігрівом до 100...120 °С. У процесі зварювання сталі немає її загартування чи

значного збільшення зернистості. Також ця сталь не схильна до відпускної крихкості, проведення відпуску не призводить до зниження в'язкості.

Зварювання сталі 09Г2С можна виконувати електродами, які призначені для зварювання низьколегованих та вуглецевих сталей. Прикладом таких електродів є електроди типу Е42А та Е50А.

Слід зазначити, що при зварюванні сталі 09Г2С спостерігається незначне зміцнення металу у зоні перегріву. Також необхідно враховувати, що на ділянці рекристалізації навколошовної зони може відбуватися зниження ударної в'язкості.

При зварюванні конструкцій зі сталі 09Г2С забезпечення рівномірності зварного шва та основного металу виконується за рахунок легування металу зварного шва марганцем та кремнієм.

У разі збільшення швидкості охолодження зварного шва також підвищується міцність з'єднання, але пластичні властивості металу шва знижуються. Також збільшення швидкості охолодження призводить до зниження ударної в'язкості зварного металу шва. Швидкість охолодження істотно впливає на властивості металу зварного шва при виконанні однопрохідних швів і при виконанні останнього проходу в багатопрохідних швах.

Низький вміст вуглецю в зварному шві зумовлює хорошу стійкість до утворення кристалізаційних тріщин, поява яких здебільшого можлива через несприятливу підготовку (глибоке і вузьке розроблення). Для того, щоб запобігти утворенню в зварному шві пор і непроварів необхідно виконувати ретельне зачищення кромки, що зварюються, видаляючи іржу, мастило та інші забруднення.

При виконанні зварних з'єднань зі сталі 09Г2С спостерігається неоднорідність металу шва за складом та структурою. У зв'язку з цим слід зазначити також нерівномірний розподіл залишкових напружень в металі зварного шва. У науковій роботі [14] досліджувався метал зварного шва,

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		14

виконаного за трьома технологіями. Перша технологія передбачає ручне дугове зварювання кореня шва електродами LB-53U, а заповнення розроблення та облицювання – електродами ОК 74.70. Друга технологія передбачає ручне дугове зварювання кореня шва електродами Conarc 52, а заповнення розроблення та облицювання – електродами Conarc 74. Третя технологія передбачає механізоване зварювання самозахисним порошковим дротом кореня шва – дротом SuperArc L-56, NR-208 Special.

На мікроструктурі зварних з'єднань, представленої на рисунках 1.6, 1.7 і 1.8, видно, що облицювальні шари мають грубу відманштеттову крупнозернисту структуру з вкрапленнями фериту по межах зерен. У той же час заповнюючі шари, мають дрібнодисперсну структуру, що пояснюється перекристалізацією від повторного теплового впливу [15].

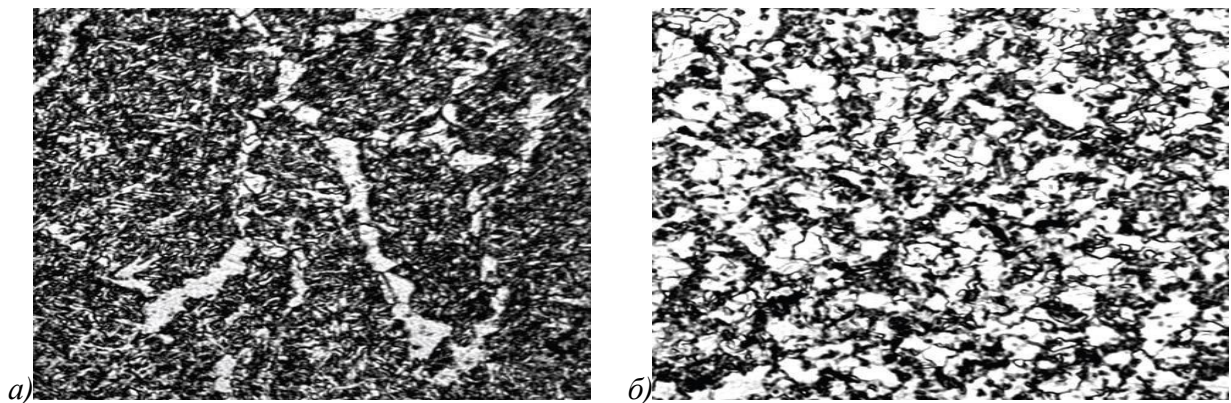


Рисунок 1.6 – Мікроструктура облицювального (а) та заповнюючого (б) шарів при ручному дуговому зварюванні електродами ОК 74.70 [15]

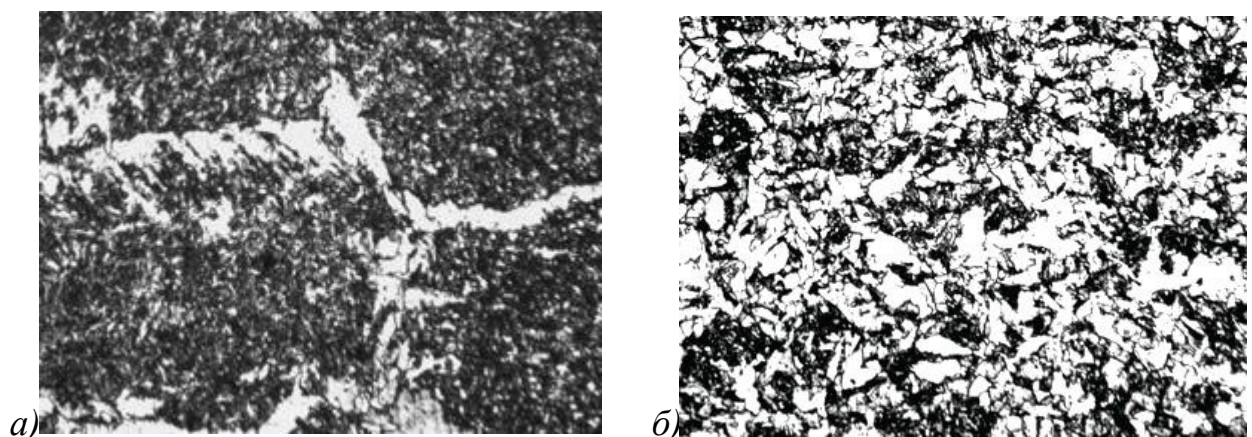


Рисунок 1.7 – Мікроструктура облицювального (а) та заповнюючого (б) шарів при ручному дуговому зварюванні електродами Conarc 74 [15]

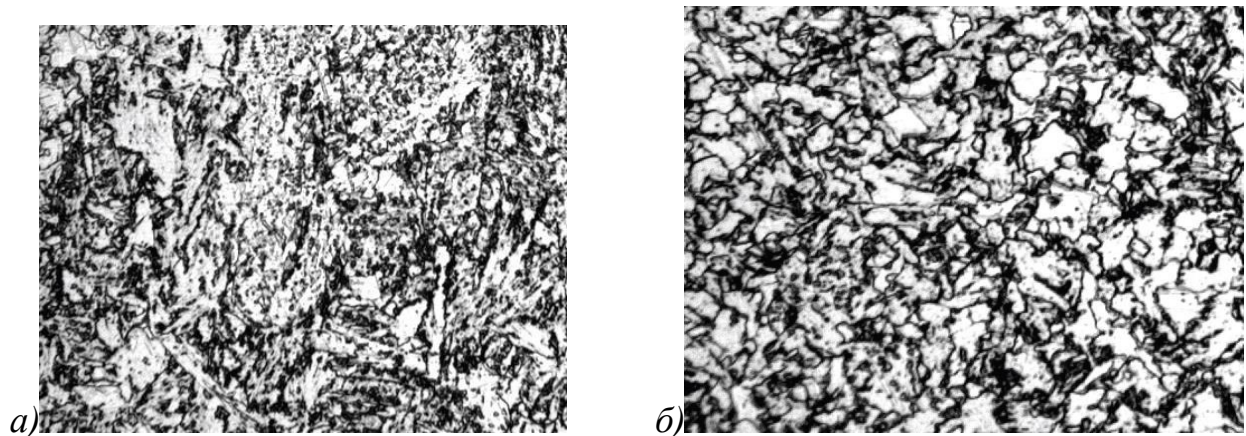
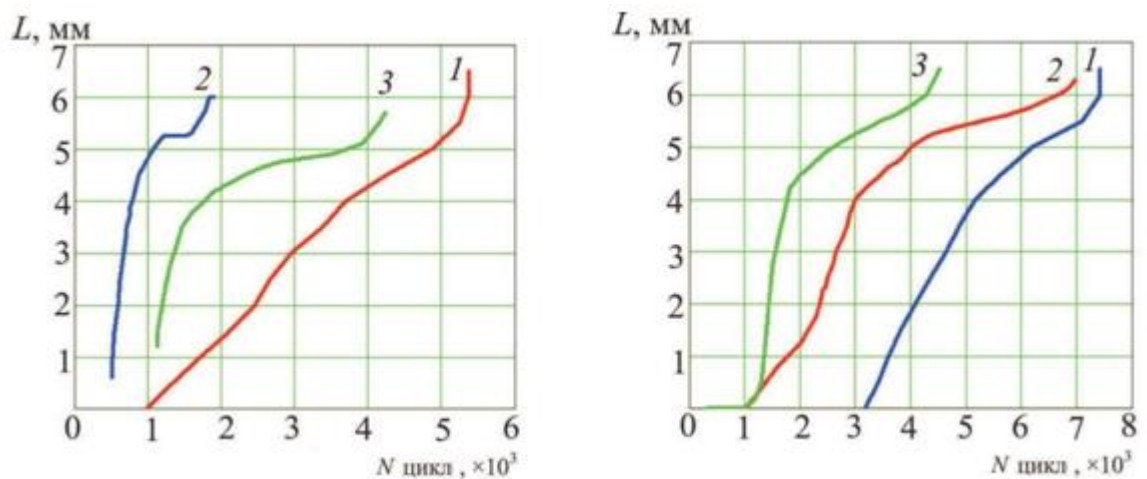


Рисунок 1.8 – Мікроструктура облицювального (а) та заповнюючого (б) шарів при механізованому зварюванні самозахисним порошковим дротом Innershield NR-208 Special [15]

Оскільки облицювальний шар має найбільш грубу будову, то зародження тріщин втоми в ньому найбільш ймовірне. В залежності від числа циклів у ньому розвиваються тріщини втоми різної довжини, що демонструється діаграмами, представленими на рисунку 1.9.



1 – ручне дугове зварювання кореня шва електродами LB-53U, заповнення розроблення та облицювання – електродами ОК 74.70; 2 – ручне дугове

зварювання кореня шва електродами Conarc 52, заповнення розроблення та облицювання – електродами Conarc 74;3 – механізоване зварювання самозахисним порошковим дротом кореня шва – дротом SuperArc L-56, заповнення та облицювання – дротом Innershield NR-208 Special

Рисунок 1.9 – Довжина втомної тріщини в облицювальному шарі в залежності від кількості циклів навантаження для амплітуди коливань 1 мм (а) та 1,2 мм [15]

### **1.3 Особливості базової технології зварювання трійників магістральних трубопроводів**

Виготовлення зварних трійників виконується на спеціалізованих підприємствах. До виконання зварювальних робіт допускаються зварювальники не нижче 5-го розряду, які пройшли атестацію.

Для виготовлення трійників приймаються труби відповідного діаметру та товщини стінки зі сталі 09Г2С. У роботі розглянуто приклад виконання трійника з умовним проходом 720 мм та підсилюючими накладками, представлений на рисунку 1.10. Підсилювальна накладка виготовляється із сталі в залежності від матеріалу обичайки та відгалуження. Товщина обичайки 12 мм, відгалуження – 10 мм.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		17

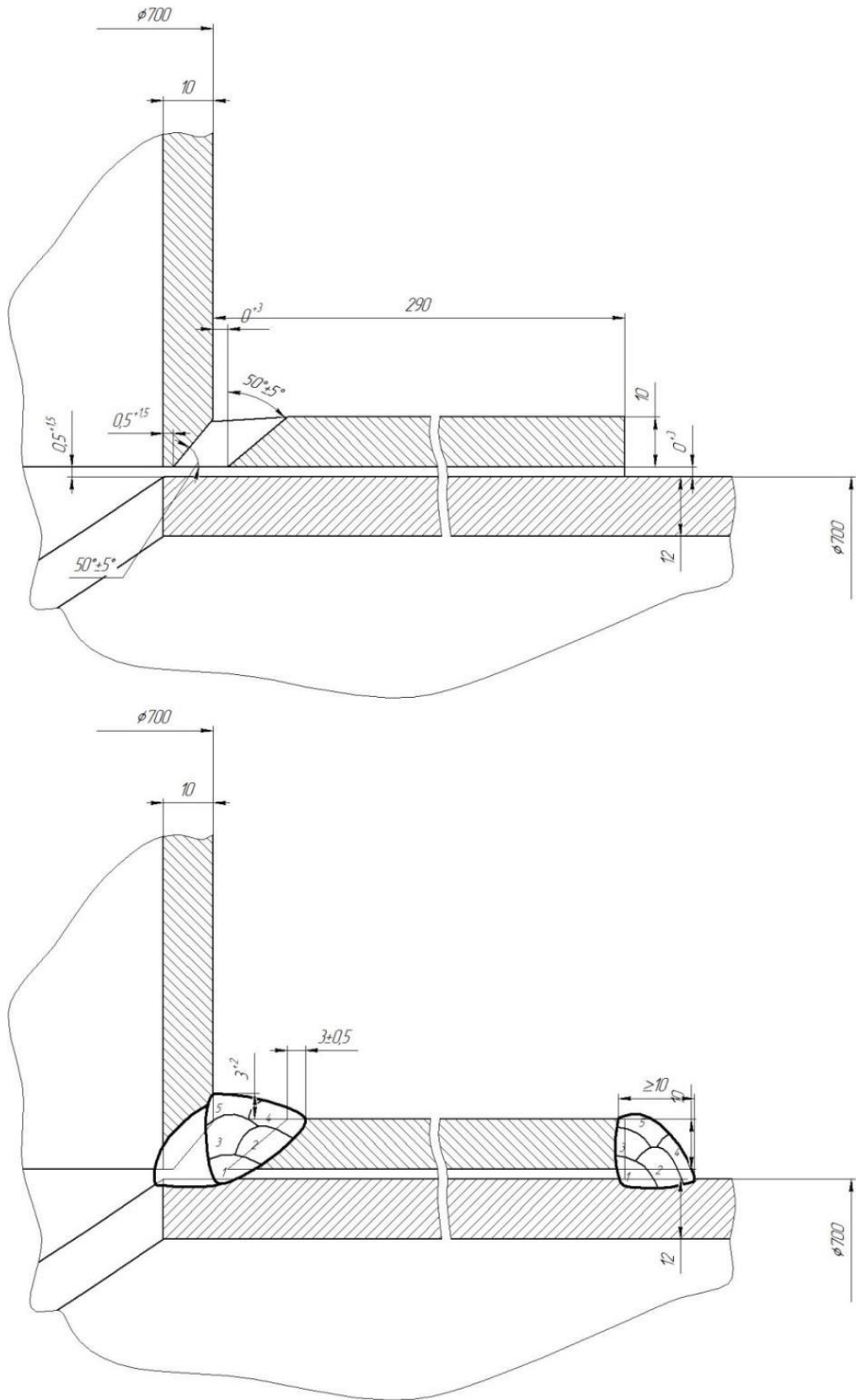


Рисунок 1.10 – Геометричні розміри трійникового з'єднання [16]

Патрубок (відгалуження) відносно основної труби (обичайки) повинен розташовуватися таким чином, щоб відстань від заводського шва на обичайці до

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		18

патрубка була не менше 250 мм. При цьому відхилення від перпендикулярності має бути не більше 1 мм, а зміщення осей обичайки та патрубка не повинно перевищувати 5 мм.

Отвір в обичайці (основній трубі) вирізують за допомогою механізованого газового зварювання. Для цього застосовується машина CG2-800 представлена на рисунку 1.11. Дана машина дозволяє виконувати отвори діаметром від 90 до 800 мм в обичайці діаметром від 300 до 2000 мм. Товщина стінки обичайки може бути не більше 5...70 мм. Правильний вибір мундштука забезпечує відсутність необхідності механічної обробки крайки після різання. Як паливо використовуються гази ацетилену або пропану. Допуск овальності різі становить  $\pm 1$  мм, чистота поверхні різання – не менше 12,5.



Рисунок 1.11 – Спеціалізована машина для вирізування отворів у трубах CG2-800

Обрізання торця патрубка виконують із застосуванням газорізальної машини «HUAWEI WELDING&CUTTING НК-203» моделі НК-203, представленої на рисунку 1.12. Ця машина дозволяє отримувати точний та якісний різ на трубах діаметром 630...720 мм.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		19



Рисунок 1.12 – Газорізальна машина «Huawei Machine» модель НК-203

Зварювання виконують на постійному струмі прямої полярності («+» - на електроді). Параметри режиму зварювання наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Параметри режиму та зварювальні матеріали під час виготовлення зварних трійників

Шари	Марка електрода	Ø, мм	Полярність	Струм, А
Кореневий	ОК-53.70 або LB-52U	2,5	зворотня	70 – 90
		3,2		80 – 120
Заповнюючий	ОК 53.70	3,2	зворотня	90 – 120
		4		130 – 170
Облицювальний	ОК 53.70	3,2	зворотня	80 – 110
		4		130 – 160

Патрубок слід розташовувати вертикально відносно обичайки. Під час виконання кожного валика зварного шва його слід розбивати на 6 ділянок. Зварювання кожної ділянки виконують таким чином, щоб кожна наступна ділянка була діаметрально протилежною до раніше звареної ділянки. У цьому випадку напрям зварювання кожної ділянки має збігатися з напрямом зварювання попередньої ділянки [16].

Зміщення «замків» суміжних шарів відносно один до одного має бути 25...30 мм.

Після приварювання патрубка необхідно до встановлення та приварювання підсилювальних накладок контролювати зварний шов із застосуванням візуального методу та неруйнівного контролю. Як джерело живлення застосовується зварювальний випрямляч ВД-252.

Зварювання слід виконувати за один цикл без перерв двома зварювальниками. У процесі зварювання контролюють міжшарову температуру, яка має бути не нижчою за 100 °С. У разі зниження температури або при вимушеній перерві, необхідно виконати супутній підігрів до температури 150 °С. У процесі зварювання необхідно виконувати пошарове очищення зварного шва із застосуванням механічної шліфувальної машини. Кожен шар шва необхідно піддавати візуальному контролю. У разі виявлення видимих дефектів, їх слід усунути механічною обробкою.

Якість зварювання контролюється такими методами:

- візуально-вимірювальний контроль місця зварювання обсягом 100%;
- радіографічний контроль обсягом 100%.

Огляду для виявлення зовнішніх дефектів повинні піддаватися всі зварні шви незалежно від застосування інших методів контролю. Огляд зварних швів повинен проводитися по всій їх довжині з двох сторін, окрім місць, недоступних для огляду. Неозброєним оком або із застосуванням лупи з не менш ніж чотириразовим збільшенням перевіряють наявність тріщин, підрізів, свищів, пропалів, напливів, непроварів кореня та кромки.

Не допускається зварювати заготовки та складальні одиниці до усунення наявних у зоні зварного з'єднання недопустимих вм'ятин, задирок, окалини, іржі тощо.

Якість підготовки кромки під зварювання визначається чистотою кромки, правильністю їх обробки.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		21

Перед контролем зварний шов і прилеглі до нього поверхні повинні бути очищені від шлаку та інших забруднень, що ускладнюють огляд, на ширину не менше 20 мм по обидва боки шва.

Дефекти, виявлені зовнішнім оглядом, слід усунути перед проведенням контролю іншими методами.

Візуальний контроль зварних з'єднань проводиться неозброєним оком або оптичними приладами. Розрахункові з'єднання повинні розглядатися із застосуванням лупи десятикратного збільшення.

При зовнішньому огляді виявляються напливи, подрізи, пропали, незаварені кратери, зовнішні тріщини швів та навколошовної зони, непровари кореня шва, пористість.

За результатами візуального контролю мають виконуватися такі вимоги:

- зварний шов повинен мати гладку структуру з плавним переходом до основного металу, при цьому нерівність не повинна бути більшою за 0,5 мм (якщо шов є легкодоступним) або не більше 1 мм (якщо шов є важкодоступним);
- повинні бути відсутні скупчення пор і шлакових включень, свищі, напливи по всій довжині зварного шва;
- не допускається наявність незаварених кратерів.

За результатами рентгенівського контролю повинні виконуватися такі вимоги:

- не допускається наявність непроварів у корені шва завглибшки понад 3 мм;
- не допускаються пори та шлакові включення розміром більше 3 мм;
- не допускаються скупчення пор більше 5-штук на 1 см<sup>2</sup>.

Якщо виявлені неприпустимі дефекти, необхідно їх усунути. Видалення дефекту виконується механічним способом (абразивним інструментом, вирубанням, фрезеруванням) по всій довжині дефекту плюс 10 мм у кожную сторону від дефекту. Заборонено виплавляти дефект дуговими засобами. Допустиме застосування плазово-дугових процесів. Якщо виявлені наскрізні

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		22

тріщини, перед їх зварюванням слід засвердлити кінці, щоб унеможливити подальше підростання тріщини при нагріванні від зварювання. Зварювання дефектної ділянки слід виконувати на всю глибину.

Не допускається виправлення дефектної ділянки більше двох разів. Зварювання за базовою технологією має такі недоліки:

- значна кількість дефектів зварювання, що потребують витрат часу та матеріалів для їх усунення;
- мала продуктивність ручного дугового зварювання;
- важкі умови праці зварювальника, які позначаються на його здоров'ї, а також продуктивності та якості зварювання.

#### **1.4 Обґрунтування вибору способу зварювання**

При виборі способу зварювання необхідно керуватися:

- властивостями матеріалу деталей, що зварюються;
- товщиною деталей, що зварюються;
- габаритами виконуваної конструкції;
- підвищенням продуктивності та зниженням витрат при зварюванні конструкції.

Виходячи з властивостей матеріалу деталей, що зварюються, товщини і габаритів виробу в якості можливих способів удосконалення технології зварювання можна розглянути:

- ручне дугове зварювання покритими електродами;
- механізоване та автоматичне зварювання у захисних газах дротом суцільного перерізу;
- механізоване та автоматичне зварювання у захисних газах порошковим дротом;
- механізоване зварювання самозахисним порошковим дротом;
- зварювання неплавким електродом в інертному газі.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		23

Найпоширенішим способом зварювання в даний час можна вважати ручне дугове зварювання.

Ручне дугове зварювання має ряд переваг, які дозволили набути йому широкого поширення в багатьох галузях промисловості:

- відносна дешевизна та простота зварювального обладнання;
- можливість виконання зварювання з використанням вже наявного на підприємстві обладнання;
- побудова технологічного процесу із застосуванням ручного дугового зварювання не потребує глибоких професійних знань.

В даний час застосування ручного дугового зварювання планомірно скорочується. Це зумовлено його недоліками, вплив яких слід враховувати у сучасному виробництві:

- збільшені втрати зварювального матеріалу на вигорання, розбризкування та утворення недопалків;
- низька продуктивність процесу зварювання, яка обумовлена малою продуктивністю ручного дугового зварювання. В даний час ручне дугове зварювання вичерпало можливості підвищення продуктивності за рахунок коригування параметрів режиму та призначення оптимальних зварювальних матеріалів;
- недостатня стабільність якості зварювання, зумовлена пористістю, непроварами та виникненням тріщин через перегрівання основного металу;
- важкі умови праці зварювальника, обумовлені шкідливістю зварювального аерозолі, що утворюється під час згорання зварювальних електродів.

Як переваги зварювання дротом суцільного перерізу в суміші захисних газів, схема виконання якого представлена на рисунку 1.13, слід зазначити [17], [19]:

- продуктивність, яка вища, ніж у ручного дугового зварювання;

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		24

– у процесі зварювання не утворюється шлакова кірка, що позитивно позначається на якості зварних швів;

– розплавлений метал має підвищену порівняно з ручним дуговим зварюванням і зварюванням порошковим дротом в'язкістю, що дозволяє виконувати зварювання в різних просторових положеннях;

– обладнання для механізованого зварювання в захисних газах дротом суцільного перерізу дещо складніше, ніж для ручного дугового зварювання, але набагато простіше, ніж для зварювання неплавким електродом, крім того, суцільний дріт не заламується, в порівнянні з порошковим дротом.

Недоліками механізованого зварювання дротом суцільного перерізу в захисних газах є [16], [18]:

– наявність газових балонів та механізму подачі дроту, що дещо ускладнює спосіб зварювання та знижує його мобільність;

– підвищене розбризкування електродного металу обмежує струм зварювання і не дозволяє підвищити продуктивність зварювальних робіт за рахунок переходу на форсовані режими зварювання;

– через знижену пластичність розплавленого металу підвищується ймовірність появи тріщин.

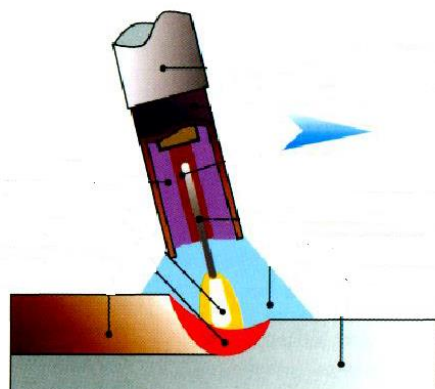


Рисунок 1.13 – Схема виконання механізованого зварювання дротом суцільного перерізу у захисних газах

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		25

Розширеними технологічними можливостями володіє механізоване зварювання порошковим дротом у захисних газах [18], перевагами якого є:

- можливість підвищення продуктивності у порівнянні зі зварюванням дротом суцільного перерізу;
- суттєве підвищення стійкості до тріщиноутворення;
- поліпшення якості та зовнішнього вигляду зварних швів;
- зменшення теплового перегріву основного металу.

Однак цей спосіб зварювання поєднує в собі недоліки зварювання порошковими дротами та зварювання в захисних газах [20]:

- залишається необхідним застосування газового обладнання, що знижує мобільність зварювальника та погіршує якість газового захисту при зварюванні на відкритому повітрі;
- порошковий дріт схильний до заломів і вимагає застосування складнішого механізму подачі, сама подача дроту може здійснюватися на меншу відстань, ніж при зварюванні дротом суцільного перерізу.

Зварювання самозахисним порошковим дротом надає значні переваги при організації технологічного процесу, які найповніше виявляються саме в умовах монтажу та ремонту [21]. Схема виконання зварювання представлена на рисунку 1.14. У числі переваг зварювання самозахисними порошковими дротиками можна зазначити:

- відсутність газової апаратури, що підвищує мобільність способу зварювання при виконанні монтажних та ремонтних робіт;
- поліпшення захисту шва при зварюванні на відкритому повітрі;
- можливість підвищення продуктивності зварювання в порівнянні зі зварюванням дротом суцільного перерізу.

Однак застосування самозахисних порошкових дротів обмежується через численні недоліки:

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		26

- самозахисний дріт схильний до заломів, що зумовлює підвищені вимоги до подаючого механізму, і зменшує відстань, на яку може бути поданий дріт;

- горіння самозахисного дроту відбувається нерівномірно, оболонка дроту розплавляється, а сердечник дроту може висипатися у зварювальну ванну і спричинити утворення пор і шлакових включень;

- наявність шлаку на поверхні зварного шва призводить до необхідності зачистки при виконанні багат шарових швів, що знижує продуктивність виконуваних робіт;

– через підвищену плинність шлаку при зварюванні порошковим самозахисним дротом виникає висока небезпека утворення шлакових кишень, ускладнюється зварювання у вузьке розроблення та зварювання кореневого шару шва;

– висока плинність металу зварювальної ванни суттєво ускладнює виконання вертикальних та стельових швів.

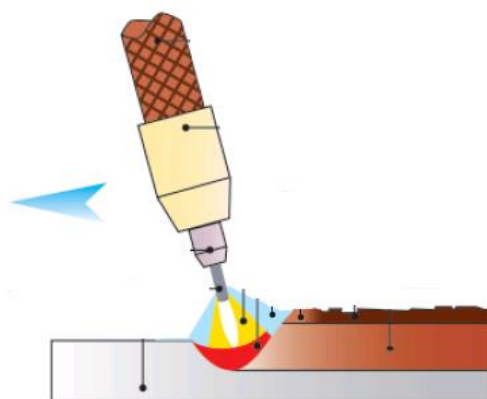


Рисунок 1.14 – Схема виконання зварювання самозахисним порошковим дротом

При зварюванні неплавким електродом, в середовищі інертних газів, схема виконання якого представлена на рисунку 1.15, отримують найвищу якість зварних швів. У числі переваг зварювання неплавким електродом, в інертних газах слід зазначити:

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		27

- якісний захист зварювальної ванни;
- можливість зварювання у вузьке розроблення та високу якість виконання кореневого шару шва;
- при зварюванні не утворюється шлакова кірка, що підвищує якість зварювання;
- низька схильність металу зварного шва до утворення тріщин і пор.

Серед недоліків зварювання слід зазначити:

- висока вартість захисного газу;
- необхідність у високій кваліфікації зварювальника;
- висока вартість зварювального обладнання.



Рисунок 1.15 – Схема виконання зварювання неплавким електродом у захисних газах

На основі аналізу переваг та недоліків кожного способу зварювання для побудови проектної технології пропонуємо застосувати механізоване зварювання в захисних газах дротом суцільного перерізу.

У ході виконання цієї випускної кваліфікаційної роботи слід передбачити заходи щодо підвищення ефективності обраного способу зварювання за рахунок усунення недоліків, зазначених вище.

Базова технологія виготовлення зварного трійника передбачає застосування ручного дугового зварювання, недоліками якого є:

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		28

- значна кількість дефектів зварювання, що потребує витрат часу та матеріалів для їх усунення;
- низька продуктивність ручного дугового зварювання;
- важкі умови праці зварювальника, які позначаються на його здоров'ї, а також продуктивності та якості зварювання.

Також аналіз властивостей зварних з'єднань із сталі 09Г2С показав проблему зниження ударної в'язкості зварних швів, яку теж потрібно вирішити.

При аналізі альтернативних способів зварювання були розглянуті: ручне дугове зварювання покритими електродами, механізоване та автоматичне зварювання у захисних дротом суцільного перерізу, механізоване та автоматичне зварювання у захисних газах порошковим дротом, механізоване зварювання самозахисним порошковим дротом, зварювання неплавним електродом. На основі аналізу переваг та недоліків кожного способу пропонуємо застосувати механізоване імпульсно-дугове зварювання в захисних газах дротом суцільного перерізу.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		29

## 2 Методика виготовлення зразків та проведення досліджень мікроструктури

### 2.1 Методика проведення мікроструктурних досліджень

Як об'єкт дослідження був обраний штампозварний трійник розміром 1020×325 мм, який виготовлявся зі сталі 09Г2С з товщиною стінки 12 мм, подовжувальне кільце товщиною 10 мм виготовлялося зі сталі 09Г2С. З кільцевого зварного шва у напрямку вздовж осі труби виконувалося вирізання зразків для проведення макро- та мікроструктурних досліджень.

При аналізі хімічного складу шва не було виявлено відхилень у складі від заявленого хімічного складу наплавленого металу, представленого в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вміст хімічних елементів у ділянках зварного шва

Назва зразків	Вміст хімічних елементів, %										
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Nb	Ti
Зовнішній шов	0,1	1,43	0,44	0,07	0,54	0,1	0,005	0,014	0,17	0,01	0,007
Внутрішній шов	0,08	0,98	0,54	0,05	0,04	0,06	0,002	0,01	0,012	0,006	0,01
Середина шва	0,09	1,12	0,59	0,05	0,31	0,06	0,003	0,01	0,015	0,01	0,008

Відбір зразків проводиться з елементів великогабаритних зварних заготовок з відступом не менше 50 мм від початку або від кінця зварного шва (рис.2.1). Вирізка зразків повинна виконуватись з різних ділянок по довжині зварного шва. З нероз'ємних з'єднань проводиться вирізка зразків для кожного типу механічних випробувань чи структурних досліджень.



Рисунок 2.1 - Схема вирізання зразків для структурних досліджень макроскопічних характеристик

Зразки для структурного аналізу виготовляються методом механічного вирізання із зразків великогабаритних циліндричних і плоских листових заготовок з подальшою вирізкою шліфів. Подальша підготовка полягає в механічному шліфуванні та поліруванні. Після полірування зразки піддавати хімічному травленню.

Для вирізання зразків з трубного сегмента застосовували верстат Q-80Z з водяним охолодженням, що дозволяє вирізати зразки без їхнього перегрівання.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		31



Рисунок 2.2 – Верстат Q-80Z з водяним охолодженням для вирізання зразків з трубного сегмента

Вирізка зразків проводиться поперечно до напрямку зварного шва за схемою, представленою на рисунку 2.1. Товщина шліфів для зварних з'єднань повинна бути не менше 5 мм, ширина - відповідати товщині листів, що зварюються, а довжина від 15 до 55 мм залежно від товщини листового прокату. Довжина підбирається таким чином, щоб на шліфі були присутні крім шва і навколошовної зони ділянки основного металу, які не піддаються впливу зварювання. Шліфи необхідно вирізати на відстані не менше ніж 50 мм від краю зварного шва.

Шліфи повинні зберігатися в умовах, що не сприяють хімічному чи механічному пошкодженню підготовлених поверхонь у процесі зберігання.

Для дослідження макроструктури зварних з'єднань, отриманих при виготовленні великогабаритних плоских і циліндричних конструкцій, необхідно проводити підготовку шліфів наступним чином.

Спочатку виконується шліфування поверхні шліфів за допомогою шліфувального паперу різної зернистості (ГОСТ 6456), а надалі поліруються із застосуванням алмазної пасті зернистості АСМ 1/0, АСМ 0,5/0 ВОМ (ГОСТ

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		32

25593). Для шліфування та полірування металографічних зрізків застосовували верстат МР-1В.



Рисунок 2.3 – Верстат МР-1В для шліфування та полірування металографічних зрізків

Зразки після полірування необхідно зберігати в умовах, що перешкоджають окисленню та погіршенню якості зразків. Дослідження макро- та мікроструктури проводилися на полірованих та травлених у розчині (4 мл  $\text{HNO}_3$  + 96 мл  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) шліфах поперечного перерізу з використанням металографічного мікроскопа ММО-1600АТ. Металографічний цифровий комплекс ММО-1600АТ зображений на рисунку 2.4, призначений для дослідження мікроструктури металів і сплавів у відбитому світлі у світлому полі при прямому освітленні, що визначає сферу його використання: металографічні лабораторії науково-дослідних інститутів та підприємств металургійної, машинобудівної промисловості.

Наявність фотоапарата чи камери дає можливість отримувати цифрові знімки високої якості, виводити їх на екран комп'ютера чи телевізора, обробляти та оцінювати за допомогою програм для аналізу зображень.

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		33



Рисунок 2.4 – Мікроскоп металографічний ММО-1600АТ

Основні технічні характеристики:

- ціна розподілу шкали об'єкта-мікрометра 0,01 мм;
- предметний столик, що дозволяє розмістити та переміщати зразок вагою до 2 кг;
- збільшення від x50 до x2000;
- револьверний пристрій п'ятипозиційний.

Мікротвердість металу ділянок зварного шва вимірювали твердоміром ТКР-35, представленому на рисунку 1.24.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		34



Рисунок 2.5 – Вимірювання мікротвердості

## 2.2 Методика одержання зразків для випробувань на статичний розтяг

Для визначення тимчасового опору при статичному розтягу відповідно до ГОСТ 6996-66 проводиться вирізка зразків із заготовок зварної конструкції трійника. Вирізка зразків здійснюється відповідно до схеми, представленої на рисунку 2.6 з дотриманням відступів від початку і кінця шва таким чином, щоб зварний шов розташовувався переважно в центральній частині робочої зони взірця для випробувань.



Рисунок 2.6 - Схема вирізання зразків для визначення тимчасового опору при розтягуванні

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		35

Розміри зразків в залежності від товщини основного металу вибираються відповідно до ГОСТ 6996-66. Загальний вигляд, форма зразків наведено на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд зразка для випробувань на розтяг зварних з'єднань

Наявність посилення зварного шва з лицьового боку, що не перешкоджає проведенню випробувань, не враховується при випробуваннях і саме потовщення в зоні шва не видалається. При необхідності дане потовщення може бути видалено механічною обробкою.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		36

### 3 Результати мікроструктурних досліджень

#### 3.1 Дослідження мікроструктури макрошліфа зварного шва

На зразку, представленому на рисунку 3.1, заповнення розроблення виконувалося за три проходи. У цьому випадку слід звернути увагу, що зварний шов виконаний зі зміщенням, тобто, спостерігається порушення співвісності між нижнім та верхнім валиками. Оскільки зварний шов має нерівномірну структуру, зварний зразок руйнується по ділянках, які мають найбільш крихку структуру.



Рисунок 3.1 – Макрошліф зварного шва

В результаті проведеного дослідження мікроструктури зварних швів виявлено крупнозернисту структуру з виділенням відманштетового фериту. Така структура негативно впливає на механічні властивості металу зварного шва [22], [23]. Мікроструктура металу зварного шва на відстані 2,5 мм від зовнішньої поверхні труби представлена на рисунку 3.2. На рисунку 3.3 представлена мікроструктура металу зварного шва на відстані 4 мм від зовнішньої поверхні труби. Порівняння цих рисунків дозволяє зробити

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		37

висновок, що зі збільшенням глибини металу зменшується вміст грубоголастої структури. Інакше кажучи, структурні складові розподіляються за висотою зварного шва нерівномірно, що підтверджується раніше проведеними дослідженнями [24].

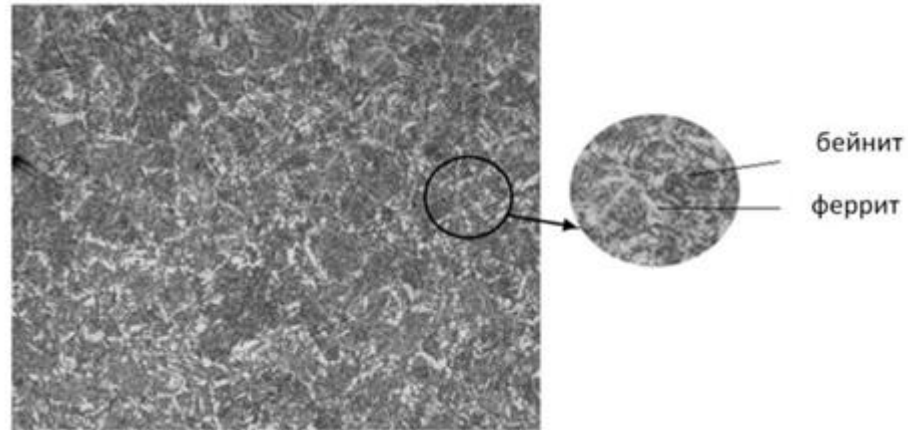


Рисунок 3.2 – Мікроструктура металу зварного шва на відстані 2,5 мм від зовнішньої поверхні труби (збільшення 100 крат)

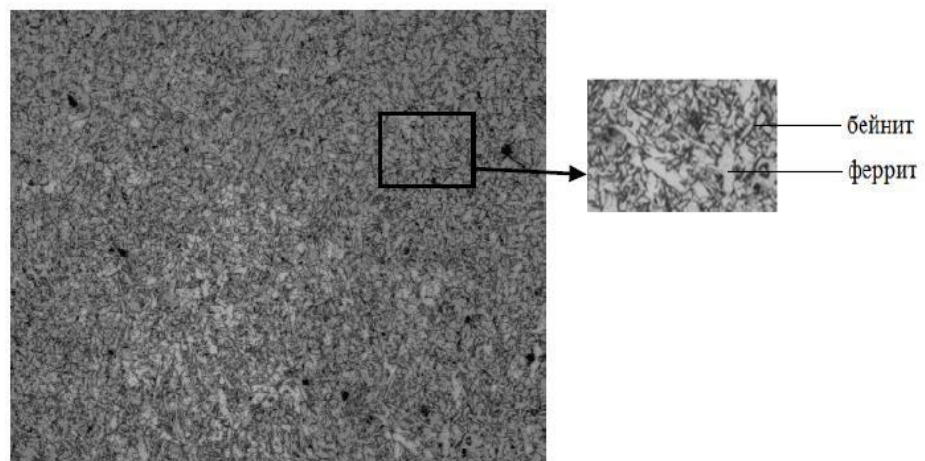


Рисунок 3.3 – Мікроструктура металу зварного шва на відстані 4 мм від зовнішньої поверхні труби (збільшення 100 крат)

Виконувалося дослідження впливу кількості проходів на структуру металу зварного шва. Виконували зварювання зразків у 2 та 3 проходи. Аналіз мікроструктури зразків, представлених на рисунку 3.4-а і 3.5-б, дозволив

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		38

зробити висновок, що збільшення числа проходів при зварюванні зменшує утворення грубої відманштеттової структури.

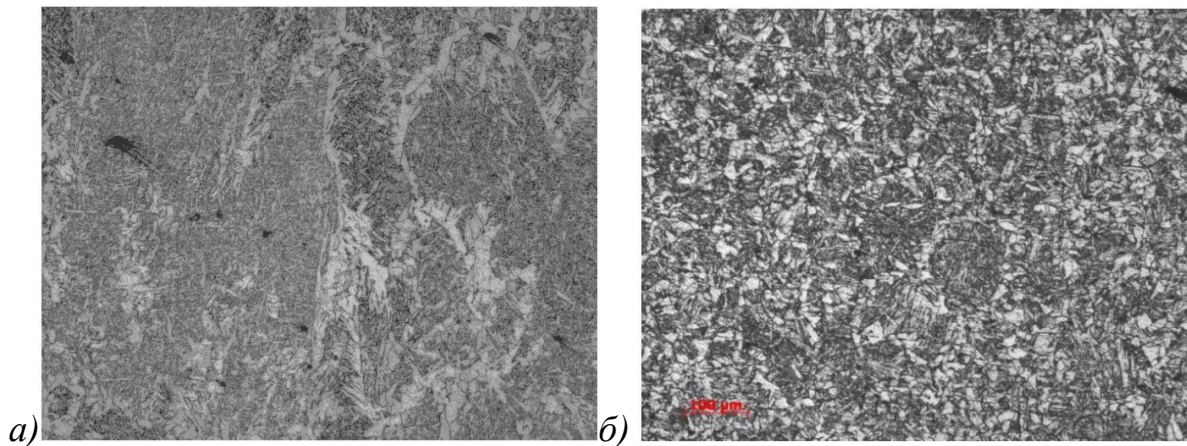


Рисунок 3.4 – Мікроструктура металу зварного шва (збільшення 100 крат) після зварювання в три проходи (а) та після зварювання у чотири проходи (б)

За результатами вимірювання мікротвердості можна зробити висновок про позитивний вплив останніх проходів на структуру металу зварного шва. На рисунку 3.5 представлені результати вимірювання мікротвердості на зразках після зварювання в три проходи. На рисунку 3.5 представлені результати вимірювання мікротвердості на зразках після зварювання в три проходи.

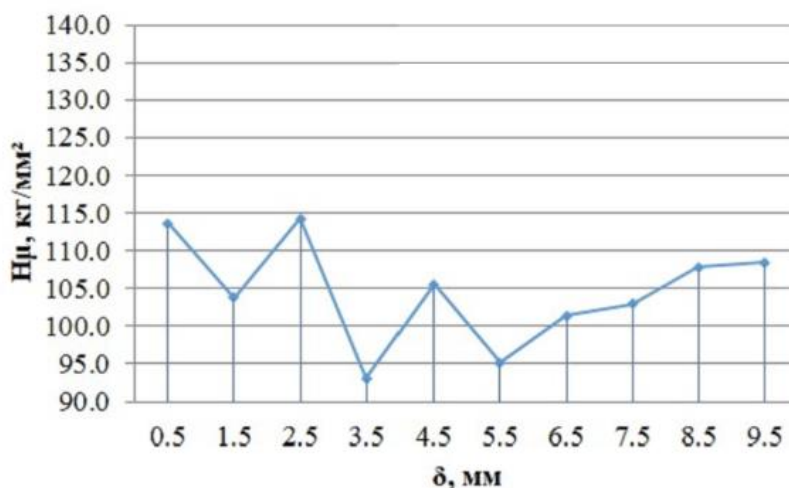


Рисунок 3.5 – Ділянки та результати вимірювання мікротвердості при зварюванні в три проходи

З рисунку 3.5 видно, що найбільше значення твердості спостерігається в області виконання останнього валика, який не перекристалізується, як попередні валики. При випробуваннях зразків, виконаних з використанням трьох валиків, під час ударних випробувань встановлено, що значення ударної в'язкості відповідає вимогам стандарту. На зразках, виконаних із застосуванням трьох проходів, отримані значення ударної в'язкості  $KCU=234$  Дж/см<sup>2</sup>.

Таким чином, можна зробити висновок про позитивний вплив відпалюючого валика, на механічні властивості зварних з'єднань при виготовленні трійників зі сталі 09Г2С.

Отримані результати узгоджуються з раніше проведеними дослідженнями за кордоном [25]

### 3.2 Випробування розтягом зразків трійника

Механічні випробування зразків зварних плоских заготовок показують, що середні значення тимчасового опору при розтягуванні становлять 513 МПа. Типова діаграма випробування представлена на рисунку 3.6. Тимчасовий опір зразка становить 512 МПа. При переході від пружної стадії до стадії пластичного переходу чітко виділяється ділянка плинності. Руйнування зразків відбувається після досить тривалого падіння зусилля навантаження.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		40

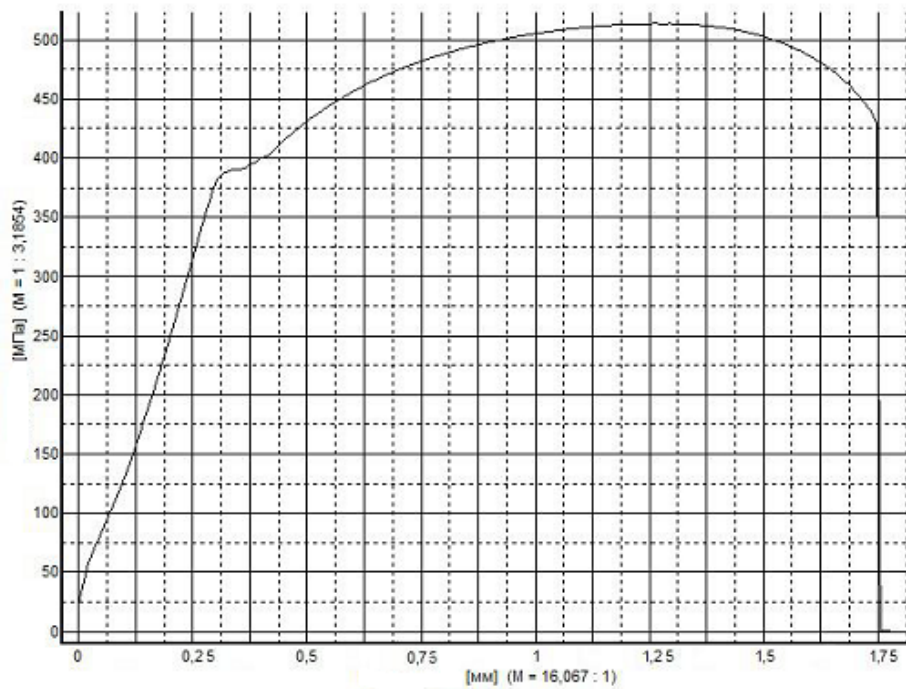


Рисунок 3.6 – Діаграма випробування на розтяг зразка зі сталі 09Г2С товщиною 2,5 мм.

Випробування розтягом показують, що середнє значення тимчасового опору зразків становить 625 МПа, тимчасовий опір яких становить 566 МПа. На рисунку 3.7 представлено типову діаграму випробування зразка сталі 09Г2С на розтяг. Тимчасовий опір зразка становить 624 МПа. Загальний характер деформації аналогічний зразкам товщиною 2,5 мм, за винятком відсутності в даному випадку ділянки плинності.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		41

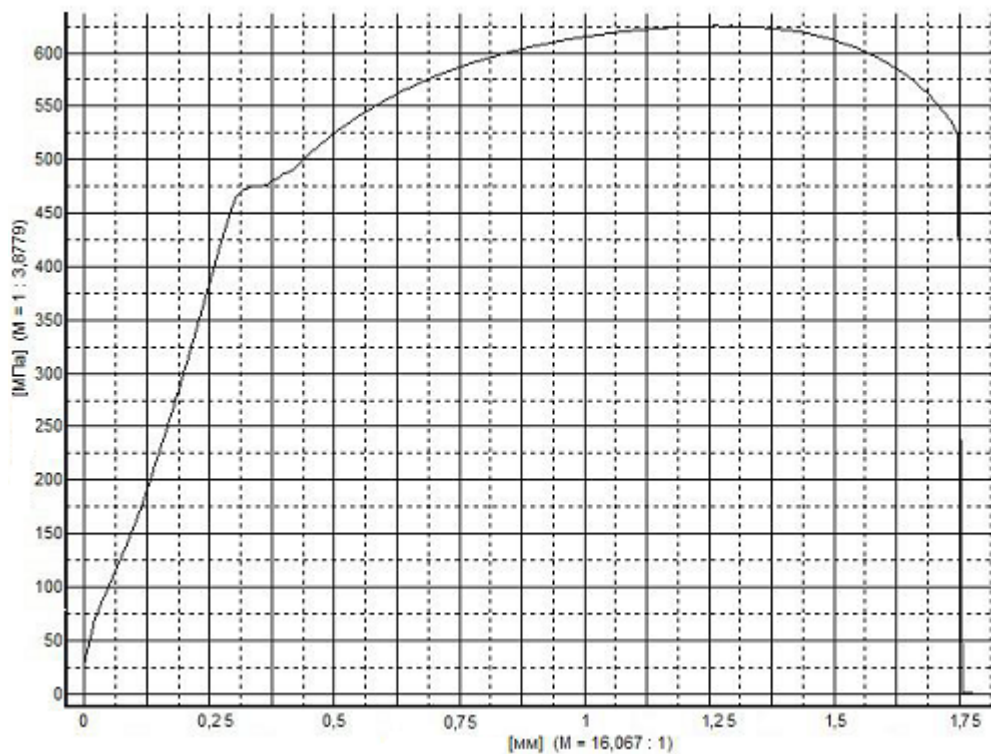


Рисунок 3.7 – Діаграма випробування на розтяг зразка зі сталі 09Г2С тощиною 5 мм.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		42

#### 4 Дослідження впливу мікроструктури на втомну міцність сталі 09Г2С

Виконання зварних швів під час виготовлення конструкцій магістральних трубопроводів є відповідальним завданням, від вирішення якого залежить безпека експлуатації всього трубопроводу. Аварії на трубопроводах в основному відбуваються через дефекти, що утворюються при зварюванні, які в ході тривалої експлуатації трубопроводу починають себе проявляти.

Для того, щоб підвищити якість зварних з'єднань при виконанні елементів трубопроводів продовжуються дослідження в галузі взаємозв'язку механічних властивостей металу зварного шва та дефектів при зварюванні [26], [27].

Значний вплив на властивості зварних з'єднань мають неметалеві включення, які обов'язково присутні у металі зварного шва. Ці включення відіграють роль концентраторів напружень і в процесі експлуатації трубопроводу можуть призвести до утворення тріщин і згодом до руйнування трубопроводу [28].

Дослідження виконували на зварних зразках із сталі 09Г2С. Зварні шви виконували із застосуванням технології MIG зварювання, у захисному газі «аргон+вуглекислий газ».

У ході металографічних досліджень із перерізу зварного шва виявлено такі зміни структури, представленої на рисунку 4.1:

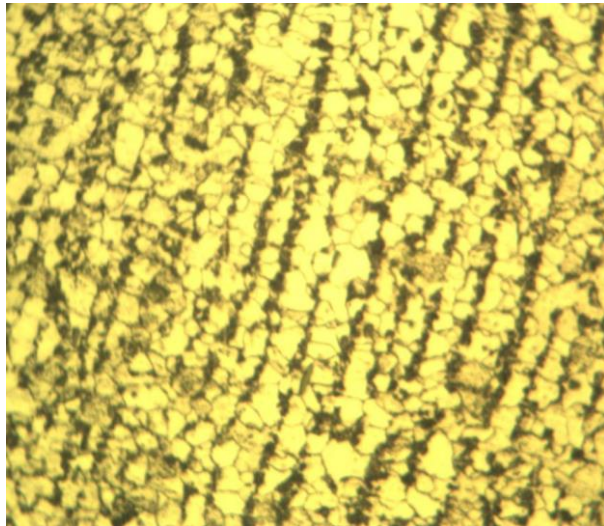
- структура основного металу – дрібнозерниста феритно-перлітна;
- кореневий шар шва – феритно-перлітна структура, в якій переважає перлітна фаза, є включення голчастого фериту (відманштетту);
- заповнюючі шари характеризуються збільшенням частки феритної фази, структура зерна близька до структури основного металу;

					КРМ.ПМЗм-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		43

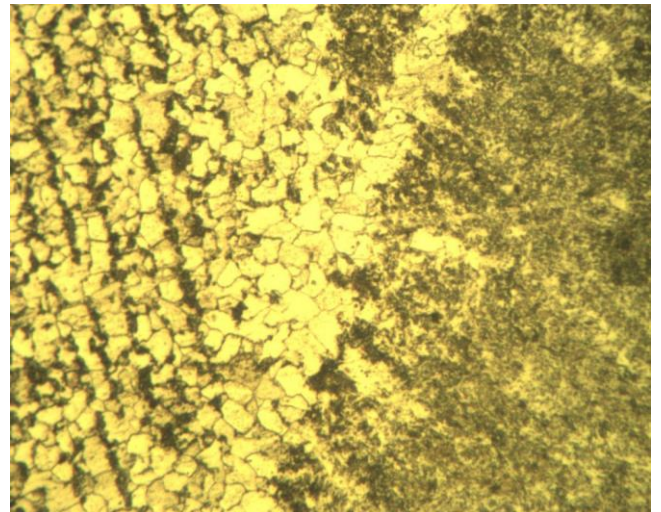
– облицювальний шар має структуру з величезним переважанням голчастого фериту (відманштетту).

Особливості структури різних шарів зварного шва представлені у таблиці 4.1.

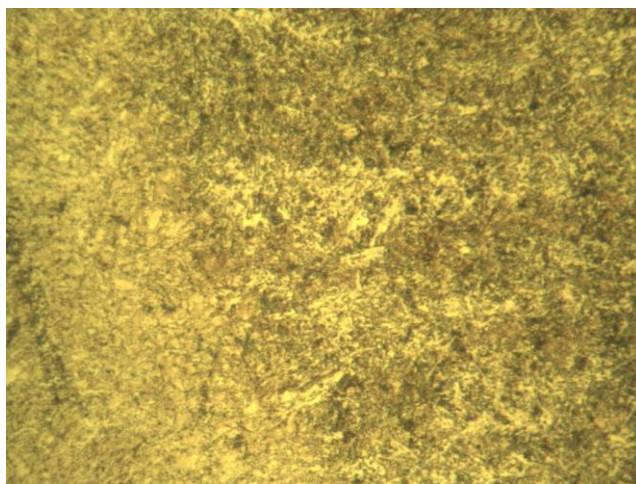
У заповнюючих шарах міститься значна кількість неметалевих включень, що видно за даними таблиці 4.1. Це пояснюється виконанням в кілька проходів і впливом повторного термічного циклу.



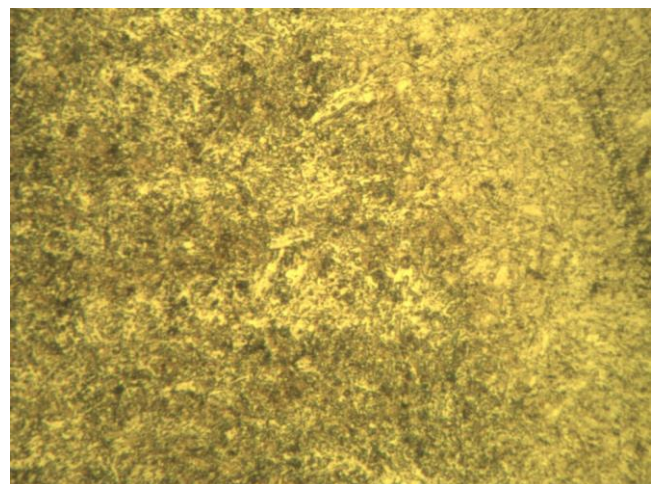
а



б



в



г

а – основний метал; б – зона сплавлення; в – наплавлений шар;  
г – відманштеттова структура

Рисунок 4.1 – Мікроструктура сталі 09Г2С

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		44

Таблиця 4.1 – Мікроструктура різних зон зварного з'єднання сталі 09Г2С

Зона зварного шва	Об'ємна частка неметалевих включень за ГОСТ 1778	Структурні складові
Основний метал	0,844	38,7% - ферит, 61,3 % - перліт
Облицювальний шар	0,528	70% - ферит, 30 % - перліт
Заповнюючі шари	0,808	51,3% - ферит, 48,7 % - перліт
Кореневий шар	0,502	28,3% - ферит, 71,7 % - перліт

Розміри неметалевих включень змінюються у широкому діапазоні і визначаються природою цих включень. В результаті розкислення металу зварного шва утворюються включення малих розмірів, величина яких визначається, головним чином, у якому стані металу вони утворилися – у твердому чи рідкому. Також розміри включень впливають на швидкість охолодження, зменшення швидкості охолодження призводить до збільшення розмірів неметалевих включень. Розміри включень залежать також від їхнього хімічного складу: силікатні включення – 150 мкм, нітриди титану – 7 мкм, оксид алюмінію – 2...7 мкм, сульфід марганцю – 2...8 мкм [29].

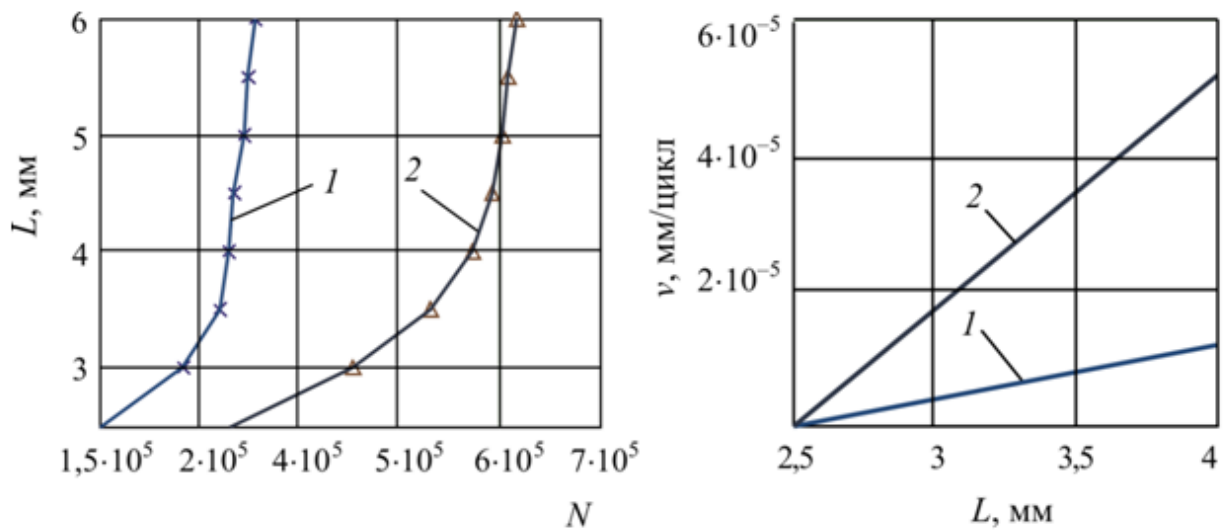
Неметалеві включення можуть мати різну форму. Каплеподібна форма характерна для оксиду заліза. Куляста форма характерна для силікатних включень та оксисульфідів заліза. Сульфід заліза утворює плівку по межах зерен металу.

При випробуваннях на втомну міцність виготовлялися зразки типу Шарпі, представлені на рисунку 4.2, які вирізали зі зварного шва. При вирізці зразків першого типу намагалися максимально захопити облицювальний шар шва і заповнюючі шари, надріз виконували з боку облицювального шару. При вирізці зразків другого типу намагалися максимально захопити корінь шва та заповнюючі шари, надріз виконували з боку кореня шва.



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд зразків при випробуваннях на втомну міцність

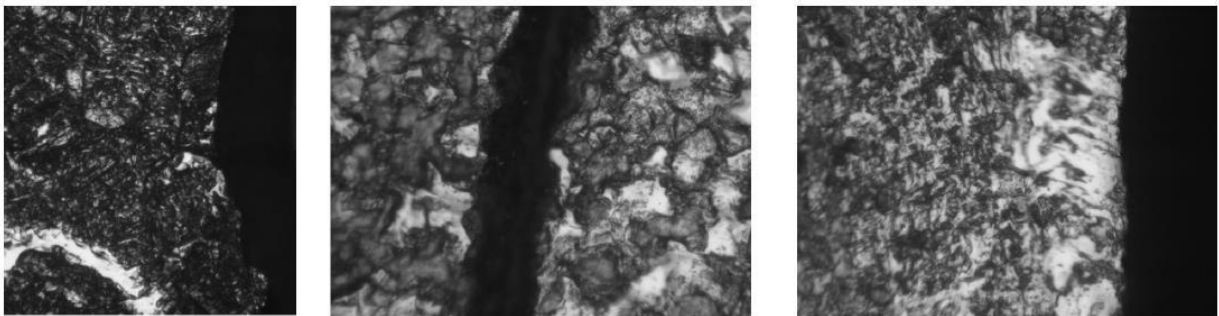
Випробування показали, що інкубаційний період зародження втомної тріщини для зразків з надрізом з боку облицювального шару становить  $(1,5...2) \cdot 10^5$  циклів, а для зразків з надрізом з боку кореня шва –  $(3,2...3,5) \cdot 10^5$  циклів, як показано на рисунку 4.3.



1 - зразки з надрізом з боку облицювального шару; 2 – зразки з надрізом з боку кореня шва

Рисунок 4.3 – Втомні криві (ліворуч) та швидкість підростання тріщини (праворуч)

Підростання тріщин у корені шва характеризується рівномірністю, швидкість підростання становить 1,1...1,3 мм/цикл, при цьому руйнування відбувається переважно за межами перлітного зерна, як показано на рисунку 4.4. При проходженні втомної тріщини по заповнюючих шарах швидкість підростання тріщини уповільнюється, що пояснюється збільшенням частки феритної фази, при цьому злам має в'язкий характер, як на рисунку 4.5.

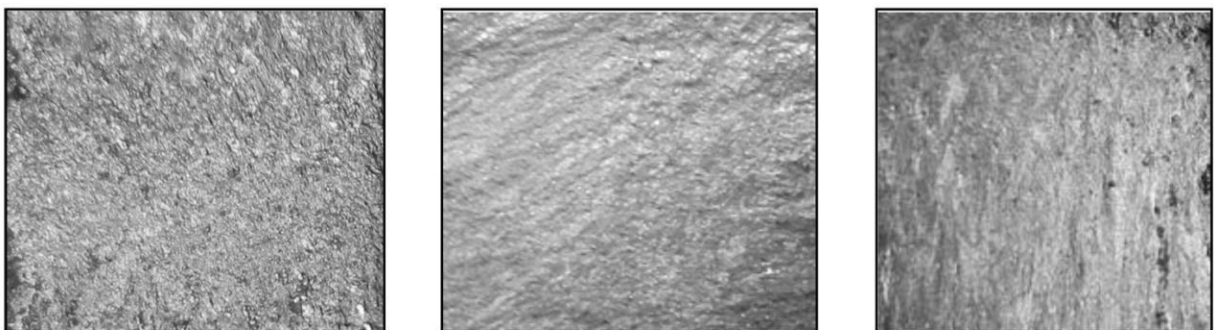


*a*

*б*

*в*

Рисунок 4.4 – Особливості проходження втомної тріщини на зразках у корені шва (а), заповнювальних шарах (б) та облицювальному шарі (в)



*a*

*б*

*в*

Рисунок 4.5 – Структура зламу у втомній тріщині в корені шва (а), заповнюючих шарах (б) і облицювальному шарі (в)

Підростання втомної тріщини з боку облицювального шару відбувається значно швидше, швидкість становить 1,3...2,8 мм/цикл. Саме руйнування відбувається у структурі з відманштеттовим феритом і є внутрішньозерновою. При переході тріщини в заповнюючі шари, відбувається деяке зменшення

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		47

швидкості її підростання. Характер зламу має осередки крихкого руйнування, як показано на рисунку 4.5.

При зварюванні конструкцій для магістральних трубопроводів зі сталі 09Г2С слід звернути особливу увагу на формування облицювального шару, який може стати джерелом зародження втомних тріщин при експлуатації трубопроводу.

Тому, пропонується використовувати спосіб зі стабілізації краплеперенесення при механізованому зварюванні у захисних газах. Спосіб імпульсно-дугового зварювання дозволяє дозувати енергію, яка витрачається на формування краплі розплавленого металу, стабілізувати розміри краплі та покращувати формування зварного шва.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		48

## ВИСНОВКИ

Досліджені зразки сталі 09Г2С демонструють оптимальні структурні параметри та механічні характеристики. Структура зони термічного впливу досліджених зразків є неоднорідною. Дендритна структура шва в області плавлення дуговим джерелом представлена стовпчастими зернами. Мікротвердість металу шва вища значень мікротвердості у вихідному металі.

Випробуваннями на статичний розтяг металу шва виявлено, що залежно від напрямку підростання дендритів по відношенню до напружень під час випробувань, спостерігається анізотропія металу шва.

Також аналіз властивостей зварних з'єднань із сталі 09Г2С показав проблему зниження ударної в'язкості зварних швів. На основі проведених досліджень зроблено висновок про позитивний вплив відпалючого валика, на механічні властивості зварних з'єднань при виготовленні трійників зі сталі 09Г2С.

При зварюванні конструкцій для магістральних трубопроводів зі сталі 09Г2С слід звернути особливу увагу на формування облицювального шару, який може стати осередком зародження втомних тріщин при експлуатації трубопроводу.

Запропоновано використовувати спосіб зі стабілізації краплеперенесення при механізованому зварюванні у захисних газах. Спосіб імпульсно-дугового зварювання дозволяє дозувати енергію, яка витрачається на формування краплі розплавленого металу, стабілізувати розміри краплі та покращувати формування зварного шва.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		49

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гладков Е.А., Бродягін В. Н. Імпульсні технології управління краплеперенесенням при MIG\MAG зварюванні // Зварювання та діагностика. 2014. № 3. С. 17-21.
2. Прохоров В. В. Піскорський П. В., Глушак Н. В. Автоматичне зварювання самозахисним порошковим дротом. Переваги процесу // Автоматичне зварювання. 2012. № 6. С. 94-95.
3. Васильєв О. П., Сverdлик Ю. М., Устюжанін А. В. Про можливість застосування зварних трійників» // Зварювання та діагностика. 2014. № 7. С. 33-35.
4. Дуб О.В. Неметалеві включення низьколегованої трубної сталі // Металург. 2003. № 4. С. 67-73.
5. Карєва Н. Т., Заварцев Н. А., Чунгаков Д. Т. Дослідження причин зниження ударної в'язкості деталей трубопроводів із сталі 10Г2ФБЮ // Вісник ЗНУ, 2020. Т. 20, № 3. С. 33-41.
6. Клімов В. Н., Адаскін А. М., Сєдов Ю. Є. Матеріалознавство в машинобудуванні // КНУ, 2016. 535 с.
7. Крампіт А. Г., Зернін Е. А., Крампіт М. А. Сучасні способи імпульсно-дугового MIG/MAG зварювання // Технології та матеріали. 2015. № 7. С. 4–10.
8. Крампіт Н.Ю., Крампіт А.Г., Князьков С.А. Особливості імпульсного управління процесом зварювання довгою дугою у вуглекислому газі// Автоматизація та сучасні технології. 2002. № 9. С. 12-15.
9. Кривоносова Є.А., Рудакова О. А. Визначення характеристик опору втоми багатошарових зварних швів сталі 10Г2ФБЮ // Вісник КНУ. 2012. № 2. С. 29-36.
10. Лозовська, А.В. Дослідження впливу додаткового нагріву на

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		50

структуру та властивості низьколегованих трубних сталей контрольованої прокатки з метою реалізації спадкового зміцнення виробів у процесі термічної обробки: Дисертація магістра. Донецьк: ДонДТУ. 2009.

11. Мозок В. М. Додаткові особливості технології дугового механізованого та автоматичного зварювання з імпульсною подачею електродного дроту // Зварювальне виробництво. 2010. № 2. С. 34-38
12. Новіков І. І. Теорія термічної обробки металів // К.: Машинобудування, 1978. 392 с.
13. Василів В. В. Дефекти зварних з'єднань // К.: Академія, 2012. 64 с.
14. Павлов Н. В., Крюков А. В., Зернін Є. А. Зварювання з імпульсною подачею дроту в суміші газів // Зварювальне виробництво. 2010. № 4. С. 27-28.
15. Потап'євський А. Г. Зварювання в захисних газах плавким електродом. К.: Машинобудування, 1974. 240 с.
16. Походня І. К., Максимов С. Ю., Рябцев І. А. Дослідження та розробки ІЕС ім. О.О. Патона в галузі електродугового зварювання та наплавлення порошковим дротом // Автоматичне зварювання. 2010, № 12. С. 34-42.
17. Федосєєва Є. М., Ігнатов М. Н., Летягін І. Ю. Вплив повторного термічного циклу зварювання на утворення неметалевих включень у багат шарових зварних швах трубних сталей // Зварювання та діагностика. 2011. № 2. С. 18-21.
18. Федосєєва Є. М., Ігнатов М. Н., Казимов К. П. Сучасні методи ідентифікації неметалевих включень у зварних з'єднаннях трубних сталей // Машинобудування. 2011. № 1. С. 45-47.
19. Федосов С. А. Основи технології зварювання // К.: Машинобудування, 2017. 125 с.
20. Шевченко А. А., Семенова Є. С., Шабурова Н. А. Визначення причин низької ударної в'язкості кільцевого зварного шва // Вісник КНУ, серія «Машинобудування». 2019. Т. 19. № 2. С. 63-70.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		51

21. Шлепаков В. Н. Гаврилюк Ю. А., Котельчук А. С. Сучасний стан розробки та застосування порошкових дротів для зварювання вуглецевих та низьколегованих сталей // Автоматичне зварювання. 2010, № 3. С. 46-51.
22. Щедро А. Д., Шапіро Я. О. Виробництво трубних вузлів - комплексне завдання // НАФТОГАЗ. 2008. № 5. С. 48-50.
23. Яковлєв Д.С. Аналіз різних типів зварювальних дротів для зварювання трубних сталей при товщинах стінки труб понад 25 мм // Вісник ЗНУ. 2012. № 39. С. 157-159.
24. Dixon K. Shielding gas selection для GMAW steels // Welding and Metal Fabrication. 1999. № 5. P. 8-13.
25. Lucas W. Choosing a shielding gas. Pt 2 // Welding and Metal Fabrication. 1992. № 6. P. 269–276.
26. Maksuti R., Mehmeti H., Imeri S. Correlation of microstructure and hardness of twopass submerged arc welds of line pipe steel X65 // International Journal of Microstructure and Materials Properties. 2010. Vol. 4. № 3. P. 347–355.
27. Wang, F., Hou W. K., Hu S. J. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding // J. Phys. D: Applied Physics. 2003. vol. 36. P. 1–19.
28. Yamamoto T. Mathematical modeling of metal active gas arc welding // Sci. and Technology of Welding & Joining. 2002. № 4. P. 260–264.
29. Yamamoto H., Okazaki K., Harata S. The effect of short circuiting current control on the spatter generation in CO<sub>2</sub> arc welding // Intern. Inst. of Welding : Doc. 212-649–86. 1986. P. 1–17.

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докum	Підпис	Дата		52

## ДОДАТКИ

					КРМ.ПМЗМ-23.00.00.000.ПЗ	Арк
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата		53