

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
БАКАЛАВРА**

**КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ**

**Група ЗТ-22-1**

**Василь Матійчук**

**2026**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут архітектури та  
будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»

*Матійчук Василь Романович*  
\_\_\_\_\_  
прізвище, ім'я, по батькові, студента(ки) (підпис)

Група ЗТ-22-1

*Розроблення технології складання та зварювання абсорбера*  
\_\_\_\_\_  
тема

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

за освітньо-професійною програмою підготовки бакалаврів  
«Інжиніринг зварювальних технологій»  
спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

|                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Керівник:</p> <p><i>к.т.н.; доцент</i></p> <p>_____<br/>науковий ступінь, вчене звання</p> <p><i><b>Матвієнків Олег Михайлович</b></i></p> <p>_____<br/>прізвище, ім'я, по батькові</p> <p>_____<br/>підпис</p> | <p>Завідувач кафедри будівництва:</p> <p><i>к.т.н.; доцент</i></p> <p>_____<br/>науковий ступінь, вчене звання</p> <p><i><b>Андрусяк Андрій Васильович</b></i></p> <p>_____<br/>прізвище, ім'я, по батькові</p> <p>_____<br/>підпис</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДОННАБА»  
Кафедра будівництва  
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр  
Освітньо-професійна програма «Інжиніринг зварювальних технологій»  
Спеціальність 131 – Прикладна механіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри будівництва**

\_\_\_\_\_ Андрусяк А.В.  
< > \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**

на випускню кваліфікаційну роботу бакалавра

Студента(ки) Матійчука Василя Романовича

1. Тема роботи: Розроблення технології складання та зварювання адсорбера

затверджена наказом по університету від < 25 > травня 2026 р. № 219/7

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 18.червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи креслення виробу; матеріал – двошарова сталь 16ГС+08Х13

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. 1. Загальний розділ. (Аналіз матеріалів конструкції та визначення їх зварюваності. Аналіз існуючого технологічного процесу.) 2. Технологічний розд. (Вибір способів зварювання та зварювальних матеріалів. Визначення параметр. режиму зварювання. Вибір основного та допоміжного звар. обладнання. Кон-ль якості. 3. Конструкторський розділ. Висновки.

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

1. Креслення конструкції та зварних з'єднань.

2. Схема технологічного процесу.

3 - 6. Креслення складально-зварювальних стендів та пристосувань.

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

Керівник \_\_\_\_\_

(підпис)

(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Номер етапів бакалаврської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | <i>Вступ. Загальний розділ.</i>   | <i>01.05...05.05.2026</i>      |          |
| 2 | <i>Технологічний розділ.</i>      | <i>06.05...30.05.2026</i>      |          |
| 3 | <i>Конструкторський розділ.</i>   | <i>01.06...10.06.2026</i>      |          |
| 4 | <i>Безпека праці. Висновки.</i>   | <i>11.06...17.06.2026</i>      |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |
|   |                                   |                                |          |

Здобувач \_\_\_\_\_ / В.Р. Матійчук /

Керівник роботи \_\_\_\_\_ / О.М. Матвієнків /

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота присвячена розробці вдосконаленого технологічного процесу виготовлення тарілчастого абсорбера для очистки циркуляційного газу нафтопереробного виробництва. Апарат виготовляється з двошарової сталі 16ГС+08Х13, розрахований на робочий тиск 6,3 МПа, температуру до 200 °С та має об'єм 48,9 м<sup>3</sup>.

У роботі проведено аналіз конструкції виробу та технологічності зварної конструкції, виконано оцінку зварюваності матеріалів основного (16ГС) і плакуючого (08Х13) шарів. Розроблено раціональний технологічний процес, що передбачає застосування автоматичного зварювання під флюсом для поздовжніх і кільцевих швів корпусу та ручного дугового зварювання для приварювання штуцерів, люків і тарілок.

Розраховано режими зварювання для кожного типу з'єднань, погонну енергію та ширину зони термічного впливу. Розроблено комплекс заходів із боротьби зі зварювальними напруженнями і деформаціями. Описано систему технічного контролю якості, що включає 100 % радіографічний та ультразвуковий контроль основних швів і гідравлічне випробування пробним тиском 7,9 МПа.

У конструкторському розділі виконано компоновання складально-зварювальних установок і розроблено план цеху виробничою площею 2500–3000 м<sup>2</sup>. Проведено розрахунок черв'ячного редуктора кран-укосини. У розділі безпеки праці проаналізовано умови праці, розраховано захисне заземлення і систему вентиляції зварювальної ділянки відповідно до чинних нормативних документів.

**Ключові слова:** абсорбер, двошарова сталь, зварювання під флюсом, 16ГС, 08Х13, ручне дугове зварювання, зварювальні матеріали, контроль якості, технологічний процес, нафтопереробне обладнання.

## ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the development of an improved manufacturing process for a plate absorber used in the purification of circulating gas in oil refining production. The apparatus is manufactured from two-layer steel 16GS+08Kh13, designed for a working pressure of 6.3 MPa, a temperature of up to 200 °C, and has a volume of 48.9 m<sup>3</sup>.

The work includes an analysis of the product's design and the manufacturability of the welded structure, as well as an assessment of the weldability of the materials of the base layer (16GS) and the cladding layer (08Kh13). A rational manufacturing process has been developed, which involves the use of automatic submerged arc welding for longitudinal and circumferential seams of the shell, and manual arc welding for attaching nozzles, manholes, and trays.

Welding parameters have been calculated for each type of joint, including heat input per unit length and the width of the heat-affected zone. A set of measures to combat welding stresses and deformations has been developed. A quality control system is described, which includes 100% radiographic and ultrasonic inspection of primary welds and hydraulic testing at a proof pressure of 7.9 MPa.

In the design section, the layout of assembly and welding stations has been completed and a workshop floor plan with a production area of 2,500–3,000 m<sup>2</sup> has been developed. A calculation of the worm gearbox for a jib crane has been carried out. In the occupational safety section, working conditions have been analyzed, and protective grounding and the ventilation system for the welding area have been calculated in accordance with applicable regulatory documents.

**Keywords:** absorber, two-layer steel, submerged arc welding, 16GS, 08Kh13, manual arc welding, welding consumables, quality control, manufacturing process, oil refining equipment.

## ЗМІСТ

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                   | 7  |
| 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....                                                      | 9  |
| 1.1 Загальна характеристика зварної конструкції абсорбера .....               | 9  |
| 1.2 Характеристика технологічності конструкції абсорбера .....                | 11 |
| 1.3 Аналіз матеріалів зварної конструкції та визначення їх зварюваності ..... | 13 |
| 1.4 Аналіз існуючих технологічних процесів .....                              | 17 |
| 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....                                                  | 19 |
| 2.1 Вибір способів зварювання і зварювального устаткування .....              | 19 |
| 2.1.1 Техніко-економічне обґрунтування способу зварювання .....               | 19 |
| 2.1.2 Вибір зварювальних матеріалів .....                                     | 21 |
| 2.1.3 Визначення та розрахунок режимів зварювання .....                       | 24 |
| 2.1. 4 Вибір основного та допоміжного зварювального устаткування .....        | 29 |
| 2.2 Розробка технологічного процесу складання та зварювання .....             | 32 |
| 2.2.1 Заготівельні операції .....                                             | 33 |
| 2.2.2 Технологія складання та зварювання .....                                | 35 |
| 2.3 Вибір заходів зі зварювальними напруженнями та деформаціями .....         | 38 |
| 2.4 Технічний контроль якості та виправлення браку .....                      | 48 |
| КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....                                                 | 46 |
| 3.1 Компонування складальних та зварювальних установок .....                  | 46 |
| 3.2 Розрахунок окремих елементів пристосувань .....                           | 48 |
| 3.3 Розробка плану цеху .....                                                 | 51 |
| 4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ .....                                                         | 54 |
| 4.1 Аналіз умов праці та небезпечних виробничих факторів .....                | 54 |
| 4.2 Електробезпека .....                                                      | 55 |

|           |      |                 |        |      |                                                                |                    |      |         |
|-----------|------|-----------------|--------|------|----------------------------------------------------------------|--------------------|------|---------|
|           |      |                 |        |      | КРБ.ЗТ-87.00.00.000 ПЗ                                         |                    |      |         |
| Змн.      | Лист | № докум.        | Підпис | Дата |                                                                |                    |      |         |
| Розробив  |      | Матійчук В.Р.   |        |      | Розроблення технології<br>складання та зварювання<br>абсорбера | Літ.               | Арк. | Аркушів |
| Перевірив |      | Матвієнків О.М. |        |      |                                                                |                    | 5    | 61      |
| Рецензент |      |                 |        |      |                                                                | ІФНТУНГ ЗТК - 22-1 |      |         |
| Н. Контр. |      | Матвієнків О.М. |        |      |                                                                |                    |      |         |
| Затверд.  |      | Андрусак А.В.   |        |      |                                                                |                    |      |         |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 4.3 Виробнича санітарія . . . . .            | 55 |
| 4.4 Пожежна безпека . . . . .                | 57 |
| 4.5 Засоби індивідуального захисту . . . . . | 58 |
| ВИСНОВКИ . . . . .                           | 59 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ. . . . .          | 60 |
| ДОДАТКИ . . . . .                            | 62 |

|      |      |          |        |      |                        |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.3Т-87.00.00.000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                        | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                        |      |

## ВСТУП

Зварювання є одним з найбільш поширених технологічних процесів у сучасному промисловому виробництві. Воно знайшло широке застосування в машинобудуванні, будівництві, нафтогазовій промисловості, суднобудуванні, авіаційній та космічній техніці. Завдяки постійному вдосконаленню методів зварювання, зварювальних матеріалів та обладнання стало можливим виготовлення конструкцій практично будь-якої складності, що відповідають найвищим вимогам якості та надійності. Сучасний рівень розвитку технологій зварювання дозволяє з'єднувати метали будь-якої товщини і практично будь-яких хімічних композицій, що в багатьох випадках дозволяє замінити дорогі відливки та поковки більш дешевими зварними вузлами.

Нафтогазова промисловість є однією з галузей, що найбільше використовує зварні металеві конструкції. Підприємства галузі застосовують різноманітну ємнісну апаратуру: абсорбери для очистки технологічних газів, колонні апарати для ректифікації та десорбції, теплообмінне обладнання, резервуари для зберігання нафтопродуктів, системи трубопроводів. Виготовлення всього цього обладнання практично неможливе без застосування зварювальних технологій. Водночас до зварних з'єднань нафтогазового обладнання ставляться підвищені вимоги, зумовлені роботою апаратів під тиском, при підвищених температурах і в умовах агресивних хімічних середовищ.

Одним з ефективних технічних рішень, що дозволяє поєднати механічну міцність і корозійну стійкість при мінімальних витратах дорогих легованих матеріалів, є застосування двошарових (біметалевих) сталей. Конструкції з двошарових сталей типу «вуглецева сталь + корозійностійка сталь» широко застосовуються у хімічному та нафтохімічному машинобудуванні. Вони дозволяють скоротити витрату дорогих корозійностійких сталей у 5–10 разів порівняно з виготовленням конструкцій цілком з корозійностійкого матеріалу. Разом з тим зварювання двошарових сталей є технологічно складнішим

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 7    |

процесом, ніж зварювання однорідних матеріалів, оскільки вимагає застосування різних зварювальних матеріалів для різних шарів і дотримання суворої послідовності виконання операцій.

Темою даної бакалаврської роботи є розробка технологічного процесу виготовлення абсорбера для очистки циркуляційного газу з двошарової сталі 16ГС+08Х13. Апарат є тарілчастим вертикальним посудом, що працює при тиску 6,3 МПа і температурі до 200 °С, з об'ємом 48,9 м³. Специфіка конструкції вимагає розробки раціональної технології зварювання, що забезпечить необхідні механічні властивості та корозійну стійкість зварних з'єднань.

Метою роботи є розробка вдосконаленого технологічного процесу виготовлення абсорбера на базі аналізу існуючих рішень, вибору раціональних методів зварювання та зварювальних матеріалів для двошарової сталі, розрахунку режимів зварювання, вибору зварювального обладнання й оснащення, проектування складально-зварювальної ділянки, а також розробки заходів з охорони праці.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Загальна характеристика зварної конструкції виробу та його елементів

Об'єктом розробки даної бакалаврської роботи є тарілчастий абсорбер для очистки циркуляційного газу нафтопереробного виробництва. Абсорбери – це апарати, в яких здійснюються процеси поглинання газів або парів рідкими абсорбентами. Абсорбційний процес протікає на межі розділу фаз газ–рідина, тому абсорбери конструюються таким чином, щоб забезпечити максимально розвинену поверхню зіткнення між фазами при мінімальному гідравлічному опорі [1].

Тарілчастий абсорбер являє собою вертикальну циліндричну посудину, всередині якої на рівних відстанях одна від одної встановлені горизонтальні перегородки – тарілки (рис. 1.1).

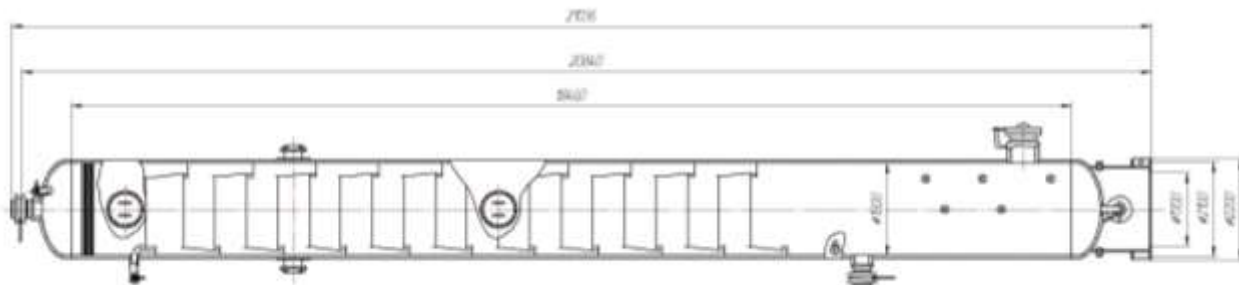
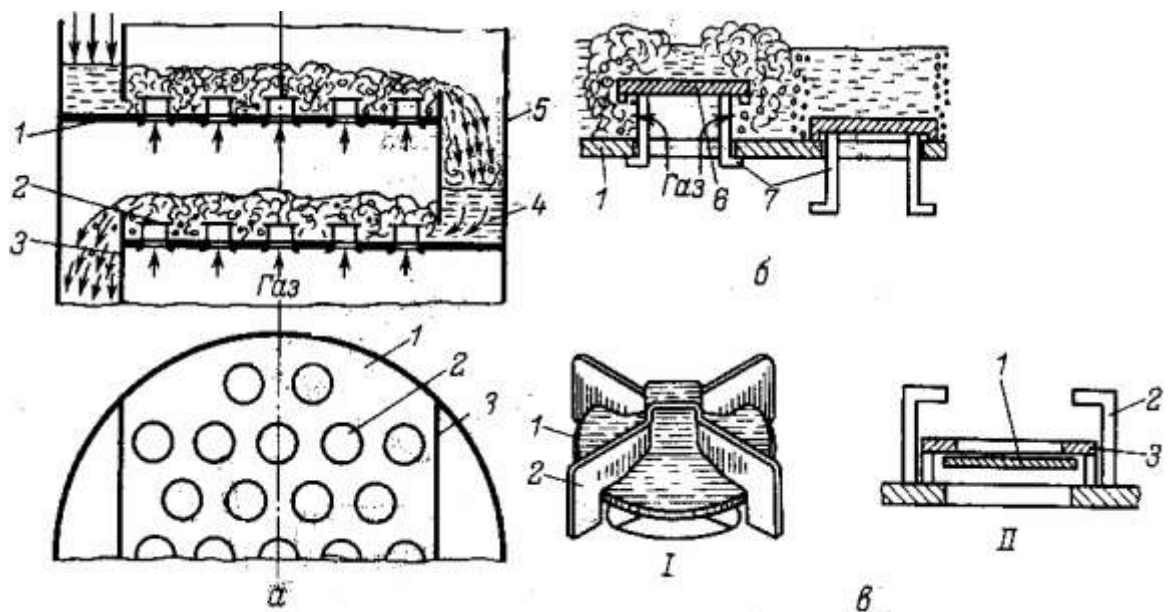


Рисунок 1.1 - Абсорбер для очистки циркуляційного газу

Тарілки забезпечують спрямований рух фаз і багаторазову взаємодію рідини та газу по висоті апарата. У розроблюваному абсорбері застосовані клапанні тарілки, принцип роботи яких полягає в тому, що клапан вільно лежить над отвором у тарілці і зі зміною витрати газу змінює висоту підйому, регулюючи площу зазору для проходу газу (рис. 1.2). Завдяки цьому швидкість газу на виході із зазору залишається приблизно постійною у широкому

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 9    |

діапазоні витрат, що забезпечує стабільну ефективну роботу тарілки та мінімальне бризкоунесення.



а - дві сусідні тарілки з круглими клапанами; б - принцип роботи клапана, 1 - тарілка, 2 - клапан, 3 - переточні перегородка з порогом; 4 - гідравлічний засув, 5 - корпус колони; 6 - диск клапана, 7 - обмежувач підйому клапана; в - круглі клапани з верхнім обмежувачем (I) і з баластом (II): 1 - дисковий клапан, 2 - обмежувач, 3 –балласт

Рисунок 1.2- Пристрій клапанних тарілок.

Основні технічні характеристики абсорбера: розрахунковий тиск – 6,3 МПа; розрахункова температура – 200 °С; об'єм апарата – 48,9 м³; матеріал корпусу – двошарова сталь 16ГС+08Х13 (основний шар + корозійностійкий плакуючий шар); товщина стінки обичайки – 32 мм (основний шар 16ГС – 28 мм, плакуючий шар 08Х13 – 4 мм); діаметр отворів під клапани тарілок – 35–40 мм; діаметр самих клапанів – 45–50 мм.

Конструктивно абсорбер складається з таких основних вузлів і деталей:

- Корпус – циліндрична обичайка (або кілька обичайок), що виготовляється з двошарової листової сталі методом вальцювання і подальшого зварювання поздовжніх швів;

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 10   |

- Верхнє і нижнє еліптичні днища – виготовляються штампуванням або зварюванням з пелюсток двошарової листової сталі; з'єднуються з обичайкою кільцевими швами;
- Клапанні тарілки – горизонтальні перегородки з корозійностійкої сталі, що приварюються до корпусу кутовими швами зсередини апарата;
- Штуцери та люки – патрубки для підключення технологічних трубопроводів, приладів контролю та огляду апарата; приварюються до корпусу кутовими і стиковими швами;
- Опорне кільце (спідниця) – циліндрична конструкція, що з'єднується з нижнім днищем і служить для встановлення апарата на фундамент;
- Внутрішні пристрої – розподільчі тарілки, зливні пристрої, бризкоуловлювачі.

Загальна маса апарата в зборі становить близько 85–90 т. Висота апарата – близько 35 м. Зварні з'єднання корпусу виконуються відповідно до вимог ОСТ 26-291-94, а якість зварних швів контролюється радіографічним і ультразвуковим методами у відповідності до нормативних вимог для посудин першої групи (тиск понад 5 МПа).

Типи і кількість зварних з'єднань. Зварні з'єднання абсорбера відповідно до РТМ 26-291-79 поділяються на: стикові (тип С) – для поздовжніх і кільцевих швів корпусу; кутові (тип У) – для приварювання штуцерів, люків і фланців; таврові (тип Т) – для приварювання тарілок і опорних елементів. Загальна довжина поздовжніх швів обичайок (при 7 обичайках по 5 м) – близько 35 м. Загальна довжина кільцевих швів (8 швів  $\times$  периметр  $\sim \pi \cdot 1800 = 5655$  мм) – близько 45 м. Загальна кількість штуцерів і люків – 24 шт. Загальна кількість тарілок – 20 шт. (по одній на кожен секцію апарата). Таким чином, загальна довжина всіх зварних швів корпусу становить близько 80–85 м автоматизованих і 30–40 м ручних швів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 11   |

## 1.2 Характеристика технологічності зварної конструкції виробу

Технологічність конструкції – це сукупність властивостей, що визначають можливість її виготовлення з найменшими витратами праці та матеріалів при застосуванні прогресивних методів технологій відповідно до встановлених вимог якості, надійності та довговічності. Оцінка технологічності є необхідним етапом розробки технологічного процесу, оскільки дозволяє виявити конструктивні особливості виробу, що впливають на вибір способів зварювання та складально-зварювального оснащення.

Технологічна зварюваність – техніко-економічний показник, що характеризує можливість отримання зварного з'єднання необхідної якості, яке задовольняє вимогам надійності при експлуатації, з використанням наявного обладнання при найменших витратах праці та часу. Технологічність зварної конструкції визначається такими показниками: доступністю зварних швів для механізованих методів зварювання; можливістю виконання швів у нижньому і «в човник» положеннях; раціональністю форми і розмірів перерізів зварних швів; можливістю виконання зварювання за мінімальної кількості перекантовувань виробу.

Аналіз конструкції абсорбера з точки зору технологічності показує такі позитивні властивості:

- Поздовжні шви обичайок мають значну протяжність і виконуються в нижньому положенні, що дозволяє застосувати автоматичне зварювання під флюсом і забезпечити стабільно висок якість з'єднань;
- Кільцеві шви між обичайками і між обичайками та днищами також мають великий периметр і можуть виконуватися автоматично при обертанні виробу на роликовому стенді, що різко підвищує продуктивність і якість;
- Конструктивні розміри апарата дозволяють розмістити зварювальний трактор усередині обичайки для виконання внутрішніх кільцевих швів;

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 12   |

- Еліптичні днища є стандартизованими штампованими виробами, що скорочує обсяг підготовчих операцій;
- Тарілки приварюються кутовими швами невеликого катета (4–6 мм) зсередини апарата, що не потребує складних пристосувань.

Разом з тим конструкція має ряд особливостей, що ускладнюють технологічний процес:

- Матеріал корпусу – двошарова сталь, зварювання якої вимагає різних зварювальних матеріалів і суворої послідовності виконання шарів;
- Значна маса і розміри апарата вимагають застосування потужних підйомно-транспортних засобів і відповідного зварювального оснащення;
- Робота апарата під тиском 6,3 МПа висуває жорсткі вимоги до якості зварних з'єднань і обсягу їх контролю (100 % – для поздовжніх і кільцевих швів).

Для підвищення технологічності при проектуванні технологічного процесу передбачено: застосування автоматичного зварювання під флюсом для основних швів корпусу; чітку регламентацію послідовності виконання шарів при зварюванні двошарової сталі; застосування спеціалізованого складально-зварювального оснащення (роликовий стенд з флюсовою подушкою, стенд для складання обичайок з днищами).

Загальний висновок щодо технологічності: конструкція абсорбера є достатньо технологічною для умов одиничного виробництва на спеціалізованому підприємстві. Коефіцієнти технологічності знаходяться на рівні, що відповідає сучасним вимогам до виробів хімічного машинобудування. Впровадження запропонованих заходів щодо механізації і автоматизації зварювання дозволить суттєво підвищити фактичну технологічність виробу у виробничих умовах.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 13   |

### 1.3 Аналіз матеріалів зварної конструкції та визначення їх зварюваності

Правильний вибір і аналіз матеріалів є основою для розробки раціональної технології зварювання. Конструктивне застосування двошарової сталі 16ГС+08Х13 зумовлено необхідністю поєднання достатньої механічної міцності (забезпечується основним шаром 16ГС) з корозійною стійкістю в агресивних середовищах (забезпечується плакуючим шаром 08Х13). Розглянемо ці матеріали детальніше.

Сталь 16ГС – конструкційна низьколегована кремніймарганцева сталь відповідно до ГОСТ 5520-79. Область застосування: виготовлення посудин, апаратів, котлів і трубопроводів, що працюють під тиском при температурі від –70 до +450 °С; зварних листових конструкцій у хімічному, нафтовому та нафтохімічному машинобудуванні. Хімічний склад наведено в таблиці 1.1 [3].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 16ГС за ГОСТ 5520-79, %

| C         | Si        | Mn        | Ni    | S      | P      | Cr    | N      | Cu    | As    |
|-----------|-----------|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 0,12–0,18 | 0,40–0,70 | 0,90–1,20 | ≤0,30 | ≤0,040 | ≤0,035 | ≤0,30 | ≤0,008 | ≤0,30 | ≤0,08 |

Механічні властивості сталі 16ГС (при товщині листа понад 20 мм) наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 16ГС

| σв, МПа | σт, МПа | δ, % | ψ, % | KCU, Дж/см² |
|---------|---------|------|------|-------------|
| 450–590 | 295     | 21   | 50   | 59          |

Зварюваність оцінюється за еквівалентним вмістом вуглецю  $C_{\text{екв}}$ . Широко використовується формула Міжнародного інституту зварювання (МІЗ) [4]:

$$C_{\text{екв}} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15, \quad (1.1)$$

а також спрощена формула для конструкційних сталей:

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

$$Секв = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr+Mo+V)/10. \quad (1.2)$$

Підставивши максимальні значення вмісту елементів із таблиці 1.1 у формулу (1.2):

$$Секв(16ГС) = 0,18 + 1,20/20 + 0,30/15 + 0,30/10 = 0,18 + 0,06 + 0,02 + 0,03 = 0,29 \%$$

Згідно з класифікацією зварюваності: Секв < 0,25 % – добра зварюваність; 0,25–0,35 % – задовільна (можливе холодне тріщиноутворення, рекомендується підігрів при товщинах понад 30 мм). Секв(16ГС) = 0,29 % відповідає задовільній зварюваності. При товщині стінки 32 мм рекомендується підігрів до температури 100–150 °С. Сталь 16ГС добре зварюється всіма промисловими методами зварювання без схильності до утворення гарячих тріщин і надмірного зростання зерна в зоні термічного впливу.

Сталь 08Х13 – корозійностійка мартенситно-феритна сталь за ГОСТ 5632-72. Завдяки вмісту хрому 12–14 % вона стійка до корозії у водяному конденсаті, розчинах кислот і лугів помірної концентрації, нафтопродуктах та технологічних газах. Хімічний склад наведено в таблиці 1.3 [3].

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сталі 08Х13 за ГОСТ 5632-72, %

| C     | Si    | Mn    | Ni    | S      | P      | Cr        |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------|
| ≤0,08 | ≤0,80 | ≤0,80 | ≤0,60 | ≤0,025 | ≤0,030 | 12,0–14,0 |

Механічні властивості сталі 08Х13 наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сталі 08Х13

| σв, МПа | σт, МПа | δ, % | ψ, % | КСУ, Дж/см² |
|---------|---------|------|------|-------------|
| ≥490    | ≥275    | ≥20  | –    | ≥78         |

Зварюваність сталі 08Х13. Для розрахунку С<sub>екв</sub> мартенситно-феритних сталей враховується значний вміст хрому:

$$Секв(08Х13) = 0,08 + 0,80/20 + 0,60/15 + 14,0/10 = 0,08 + 0,04 + 0,04 + 1,40 = 1,56 \%$$

Значення Секв > 0,45 % свідчить про погану зварюваність. Основні труднощі при зварюванні сталі 08X13: схильність до мартенситного перетворення в зоні термічного впливу при охолодженні, що призводить до утворення холодних тріщин; схильність до зростання зерна при тривалому перебуванні при температурах понад 900 °С; небезпека утворення сигматичної фази при відпалюванні в діапазоні 550–850 °С, що різко знижує ударну в'язкість; небезпека міжкристалітної корозії при нагріванні до температур 450–650 °С.

Заходи, що передбачаються технологічним процесом для забезпечення якісного зварювання сталі 08X13: попередній та супутній підігрів до температури 200–300 °С (контролюється термоолівцем або контактним пірометром); застосування аустенітних зварювальних матеріалів типу Св-06Х25Н12ТЮ для перехідного та корозійностійкого шарів, що забезпечують більш пластичний метал шва; обмеження погонної енергії зварювання для зменшення зони термічного впливу; обов'язковий відпуск після зварювання при 680–720 °С для зняття залишкових напружень і перетворення мартенситу.

Металургійні особливості зварювання двошарової сталі 16ГС+08Х13. При зварюванні двошарових сталей в перехідній зоні виникають специфічні металургійні процеси, зумовлені перемішуванням металів різних шарів в зварювальній ванні. Основні проблеми: 1) при занадто великій глибині проплавлення в перехідний метал шва потрапляє значна кількість вуглецю з основного шару (16ГС), що може призвести до утворення карбідів хрому і погіршення корозійної стійкості; 2) розбавлення аустенітного металу шва залізом з основного шару може призвести до часткового феритоутворення і зниження пластичності; 3) різниця коефіцієнтів лінійного теплового розширення шарів створює додаткові теплові напруження на границі з'єднання.

Для мінімізації цих ефектів РТМ 26-291-79 рекомендує: виконувати перехідний шар з боку плакуючого шару (всередині виробу) до рівня або незначно вище границі між шарами; використовувати зварювальні матеріали з

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 16   |

підвищеним вмістом хрому (Св-06Х25Н12ТЮ замість стандартних аустенітних дротів), щоб компенсувати розбавлення аустенітного шва вуглецевим металом; суворо дотримуватись режимів, що обмежують погонну енергію (не більше 3000–3500 Дж/мм для перехідного шару). Застосування зазначених заходів забезпечує вміст хрому в металі перехідного шару не менше 18 % навіть при 30–40 % розбавленні основним металом, що гарантує задовільну корозійну стійкість.

Схема структурних зон зварного з'єднання двошарової сталі. Зварне з'єднання двошарової сталі 16ГС+08Х13 включає такі зони: 1) метал основного шву з боку 16ГС – низьколегована структура типу феритно-перлітна або бейнітна; 2) зона термічного впливу по стороні 16ГС – може мати підвищену твердість у зоні перегріву (до 320 НV), але це прийнятно; 3) перехідний шов – аустенітна або аустенітно-феритна структура (вміст фериту 5–15 %), яка забезпечує пластичний стик між твердим основним і корозійностійким металами; 4) метал корозійностійкого шву – аустенітна структура з вмістом  $\delta$ -фериту не менше 3–8 % (необхідно для запобігання утворенню гарячих тріщин); 5) зона термічного впливу по стороні 08Х13 – мартенситна або мартенситно-феритна структура, яка через підігрів і відпуск перетворюється в відпущений мартенсит з прийнятними механічними властивостями.

Особливості зварювання двошарової сталі 16ГС+08Х13. При зварюванні двошарових сталей необхідно забезпечити: відсутність перемішування металу різних шарів у перехідній зоні; зварювальні матеріали для кожного шару мають відповідати його хімічному складу. Спочатку виконується основний шар (з боку 16ГС) або перехідний шар, потім – корозійностійкий плакуючий шар. Це запобігає розбавленню корозійностійкого металу вуглецевим при зварюванні основного шару.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 1.4 Аналіз існуючих технологічних процесів

Більшість технологічних процесів виготовлення абсорбера, що застосовується на підприємствах, передбачають переважне використання ручного дугового зварювання покритими електродами (РДЗ) для всіх типів з'єднань. Такий підхід має ряд суттєвих недоліків, особливо при виготовленні великогабаритного апарата з двошарової сталі.

Аналіз недоліків існуючих технологічних процесів:

1. Низька продуктивність. При виконанні поздовжніх і кільцевих швів корпусу великої довжини методом РДЗ продуктивність наплавлення становить лише 0,8–3,0 кг/год. Це призводить до значних витрат часу на зварювання основних швів, що є критичним для крупносерійного і навіть одиничного виробництва посудин таких розмірів.

2. Висока залежність якості від кваліфікації зварника. При РДЗ якість шва суттєво залежить від стабільності рухів зварника, його фізичного стану, уваги. Це призводить до варіабельності механічних властивостей металу шва і нестабільності геометрії зварного з'єднання, що особливо критично для посудин під тиском 6,3 МПа, де вимагається 100% контроль всіх швів.

3. Значне розбризкування металу (до 15–20 %). При РДЗ коефіцієнт витрат електродного металу на розбризкування досягає 15–20 %, що призводить до підвищених витрат зварювальних матеріалів і додаткових витрат на зачищення поверхні виробу.

4. Відсутність спеціалізованого оснащення. В базовому процесі не застосовується роликовий стенд для обертання виробу при зварюванні кільцевих швів, що вимагає частих перекантовувань виробу і неминуче призводить до виконання частини зварних швів у вертикальному або стельовому положеннях, знижуючи продуктивність і погіршуючи якість.

5. Неоптимальна послідовність зварювання шарів. В базовому процесі недостатньо чітко регламентується послідовність виконання шарів при

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 18   |

зварюванні двошарової сталі, що може призводити до перегріву корозійностійкого шару або його перемішування з основним металом при зварюванні наступних проходів.

Тому в розроблюваному технологічному процесі ці недоліки необхідно усунути шляхом: заміни РДЗ на автоматичне зварювання під флюсом (АФ) для поздовжніх і кільцевих швів корпусу; застосування зварювального трактора для виконання внутрішніх швів; використання роликового станку з флюсовою подушкою для зварювання кільцевих швів; суворої регламентації послідовності виконання шарів при зварюванні двошарової сталі відповідно до РТМ 26-291-79; застосування попереднього підігріву корозійностійкого шару.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Вибір способів зварювання і зварювального устаткування

Розробка технологічного процесу зварювання починається з вибору методів зварювання та є найбільш відповідальним етапом, так як від правильного вибору методу зварювання залежать: тип і марка зварювальних матеріалів; продуктивність і трудомісткість процесу; необхідне устаткування і оснащення; якість і стабільність зварних з'єднань; умови праці зварників.

#### 2.1.1 Техніко-економічне обґрунтування способів зварювання

Вибір способу зварювання є одним з ключових рішень при розробці технологічного процесу, оскільки він безпосередньо визначає продуктивність, якість і собівартість зварних з'єднань. При виборі способу зварювання для виготовлення абсорбера необхідно враховувати такі чинники: тип і просторове положення зварних швів; марку і товщину зварюваних матеріалів; вимоги до якості зварних з'єднань; обсяг виробництва і серійність; наявність обладнання і кваліфікованого персоналу; техніко-економічна ефективність [5].

Для виготовлення абсорбера в розробленому технологічному процесі застосовуються два методи зварювання: автоматичне зварювання під шаром флюсу (ГОСТ 8713-79, процес 121 за ISO) та ручне дугове зварювання покритими електродами (ГОСТ 5264-80, процес 111 за ISO).

Порівняльні характеристики обраних методів зварювання наведено в таблиці 2.1.

Автоматичне зварювання під флюсом (АФ) обрано для виконання поздовжніх швів обичайок (з'єднання С19) і кільцевих швів між обичайками та між обичайками і днищами (з'єднання У7). Вибір АФ обумовлений: великою протяжністю цих швів (поздовжній шов обичайки – 3–5 м, кільцевий шов – понад 10 м); вимогами до стабільно високої якості швів найбільш відповідальних з'єднань посудини, що працює під тиском 6,3 МПа;

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 20   |

можливістю виконання зварювання в нижньому положенні при встановленні виробу на роликовий стенд; значно вищою продуктивністю (у 5–10 разів) порівняно з РДЗ; мінімальними витратами зварювальних матеріалів.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика методів зварювання

| Показник                           | АФ (автомат. під флюсом) | РДЗ (ручне дугове)    |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Продуктивність наплавлення, кг/год | 8–15                     | 0,8–3                 |
| Витрати ел. металу (втрати)        | $\leq 2 \%$              | до 15–20 %            |
| Якість захисту зварюв. ванни       | Максимальна              | Залежить від зварника |
| Просторове положення швів          | Нижнє, в човник          | Будь-яке              |
| Необхідна кваліфікація             | Оператор                 | Зварник 4–6 розряду   |
| Мінімальна довжина шва (ефект.)    | від 500 мм               | від 50 мм             |

Переваги автоматичного зварювання під флюсом при виготовленні абсорбера: підвищена продуктивність – до 15 кг/год наплавленого металу при великих струмах; мінімальні втрати електродного металу на розбризкування (не більше 2 %); надійний захист зони зварювання шаром флюсу, що виключає вплив атмосфери; відсутність у зварника впливу шкідливого ультрафіолетового випромінювання дуги; стабільність параметрів режиму протягом всього часу зварювання; можливість зварювання на великих струмах (до 1800 А) без шкоди якості, що дозволяє виконувати глибоке проплавлення за один прохід.

Ручне дугове зварювання покритими електродами (РДЗ) обрано для приварювання штуцерів і люків (з'єднання УЗ) та для приварювання тарілок усередині корпусу (з'єднання Т4). Застосування РДЗ для цих операцій обґрунтовується: відносно малою довжиною кожного окремого шва (0,1–0,5 м); різноманітністю просторових положень (вертикальне, стельове, в обмеженому просторі всередині апарата); можливістю виконання зварювання

в важкодоступних місцях; простотою і мобільністю обладнання; відпрацьованою технологією і наявністю кваліфікованих зварників.

### 2.1.2 Вибір зварювальних матеріалів

Зварювальні матеріали є одним з найважливіших чинників, що визначають якість зварних з'єднань. При виборі зварювальних матеріалів для зварювання абсорбера з двошарової сталі 16ГС+08Х13 необхідно забезпечити: рівномірність зварного шва з основним металом відповідного шару; необхідні пластичні властивості та ударну в'язкість металу шва; корозійну стійкість металу шва в зоні корозійностійкого шару, рівноцінну корозійній стійкості сталі 08Х13; мінімальне перемішування металів різних шарів у перехідній зоні.

Для автоматичного зварювання під флюсом основного шару (сталь 16ГС) обрано зварювальний дріт марки Св-10НЮ у поєднанні з флюсом АН-348А. Вибір дроту Св-10НЮ обумовлений: вмістом нікелю 1,5–1,9 %, що підвищує ударну в'язкість металу шва при низьких температурах (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ); вмістом алюмінію 0,10–0,25 % у ролі розкислювача, що знижує вміст оксидів у металі шва; відповідністю механічних властивостей наплавленого металу вимогам до сталі 16ГС ( $\sigma_{\text{в}} \geq 480 \text{ МПа}$ ,  $\text{КСУ} \geq 44 \text{ Дж/см}^2$  при  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Хімічний склад дроту наведено в таблиці 2.2 [6].

Таблиця 2.2 – Хімічний склад зварювального дроту Св-10НЮ, %

| С    | Mn      | Cr   | Ni      | Cu    | Ti   | Si   | P     | Al        |
|------|---------|------|---------|-------|------|------|-------|-----------|
| 0,10 | 0,4–0,7 | 0,25 | 1,5–1,9 | 0,025 | 0,10 | 0,30 | 0,030 | 0,10–0,25 |

Флюс АН-348А є висококремнистим, високомарганцевим окисним флюсом хімічної активності  $A_{\text{ф}} = 0,7–0,75$ . Він призначений для механізованого дугового зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Забезпечує хорошу стабільність горіння дуги, задовільне формування шва, низьку схильність до пороутворення. Хімічний склад флюсу наведено в таблиці 2.3 [6].

Таблиця 2.3 – Хімічний склад флюсу АН-348А, %

| SiO <sub>2</sub> | MnO   | MgO   | CaF <sub>2</sub> | CaO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S     | P     |
|------------------|-------|-------|------------------|------|--------------------------------|-------|-------|
| 41–44            | 34–38 | 5–7,5 | 4–5,5            | <6,5 | <4,5                           | <0,15 | <0,12 |

Для виконання перехідного та облицювального (корозійностійкого) шарів при автоматичному зварюванні обрано зварювальний дріт Св-06Х25Н12ТЮ у поєднанні з флюсом АН-26С. Вибір дроту Св-06Х25Н12ТЮ обумовлений: вмістом хрому 24–26,5 % і нікелю 11,5–13,5 %, що забезпечує аустенітну структуру металу шва і його корозійну стійкість; вмістом титану 0,60–1,00 % і алюмінію 0,40–0,80 %, які стабілізують карбіди і запобігають міжкристалітній корозії; підвищеним вмістом хрому порівняно зі сталлю 08Х13 компенсує часткове розбавлення металу шва основним металом. Хімічний склад дроту наведено в таблиці 2.4 [6].

Таблиця 2.4 – Хімічний склад зварювального дроту Св-06Х25Н12ТЮ за ГОСТ 2246-70, %

| C     | Si        | Mn    | Cr        | Ni        | Ti        | S      | P      | Al        |
|-------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|
| ≤0,08 | 0,60–1,00 | ≤0,80 | 24,0–26,5 | 11,5–13,5 | 0,60–1,00 | ≤0,020 | ≤0,030 | 0,40–0,80 |

Флюс АН-26С призначений для автоматичного зварювання корозійностійких і жаростійких сталей. На відміну від флюсу АН-348А він є низькокремнистим, що мінімізує перехід кремнію в метал шва і зберігає легуючі елементи (Cr, Ni, Ti). Забезпечує гладке формування шва, легке відділення шлакової кірки та мінімальне окиснення легуючих елементів. Хімічна основа флюсу АН-26С: SiO<sub>2</sub> – 30–35 %; MnO – 6–10 %; CaO – 13–17 %; MgO – 10–15 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14–18 %; CaF<sub>2</sub> – 10–14 %. Хімічна активність А<sub>ф</sub> = 0,30–0,35, що є значно нижчою, ніж у АН-348А (0,70–0,75), що пояснює менше вигорання легуючих елементів. Флюс зберігається в герметичних ємностях і прожарюється перед використанням при 300–350 °С упродовж 1 год для зниження вологості до ≤ 0,05 %.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Вимоги до зберігання і підготовки зварювальних матеріалів. Зварювальний дріт зберігається в сухому опалюваному приміщенні, захищеному від прямого контакту із вологою і корозійно-активними середовищами. Перед подачею в зварювальний автомат дріт очищається від іржі та мастила механічним або хімічним способом. Поверхня чистого дроту повинна мати характерний металевий блиск. Забороняється використання дроту зі слідами іржі, вологи або механічних пошкоджень ізоляційного шару (для мідненого дроту).

Для ручного дугового зварювання (приварювання штуцерів, люків та тарілок) для основного шару (сталь 16ГС) обрано електроди типу Є50А марки УОНІ-13/55 К5А. Ці електроди з основним покриттям призначені для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкцій, де до металу шву висуваються підвищені вимоги щодо пластичності та ударної в'язкості. Хімічний склад наплавленого металу наведено в таблиці 2.5 [6].

Таблиця 2.5 – Хімічний склад наплавленого металу електрода Є50А (УОНІ-13/55), %

| <b>C</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> |
|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 0,06     | 0,40      | 1,10      | ≤0,015   | ≤0,015   |

Для перехідного і корозійностійкого шарів при РДЗ обрано електроди типу Є-10Х25Н13Г2 марки ОЗЛ-6. Ці аустенітні електроди забезпечують метал шва з вмістом хрому 22,5–26,5 %, що гарантує корозійну стійкість навіть при частковому розбавленні основним металом. Хімічний склад наплавленого металу наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Хімічний склад наплавленого металу електрода Є-10Х25Н13Г2 (ОЗЛ-6), %

| <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>C</b> | <b>S</b> | <b>P</b> |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1,0–2,5   | ≤0,10     | 22,5–26,5 | 11,5–14,1 | ≤0,12    | ≤0,02    | ≤0,03    |

### 2.1.3 Визначення та розрахунок режимів зварювання

Режим зварювання – це сукупність параметрів зварювального процесу (сила зварювального струму, напруга на дузі, швидкість зварювання, діаметр електродного дроту та ін.), що забезпечують отримання зварного шва заданих розмірів, форми і властивостей. Для двошарового металу розрахунок режимів проводиться окремо для кожного шару, оскільки різні шари мають різні теплофізичні характеристики, товщини і вимоги до механічних властивостей наплавленого металу.

Основними параметрами режиму автоматичного зварювання під флюсом є: діаметр електродного дроту  $d_e$  (мм); сила зварювального струму  $I_{зв}$  (А); напруга на дузі  $U_d$  (В); швидкість зварювання  $V_{зв}$  (м/год); швидкість подачі дроту  $V_{нд}$  (м/год). Між параметрами існують функціональні залежності, що визначають геометрію шва. Глибина проплавлення  $h$  зростає зі збільшенням струму і зменшенням швидкості зварювання та діаметра дроту. Ширина шва  $e$  зростає зі збільшенням напруги на дузі. Висота підсилення  $q$  зростає зі збільшенням швидкості подачі дроту і зменшенням швидкості зварювання. Встановлення раціональних параметрів режиму дозволяє отримати шви потрібних розмірів з мінімальними витратами зварювальних матеріалів і максимальною продуктивністю.

Погонна енергія зварювання є комплексним параметром, що характеризує кількість теплоти, яка вводиться в метал на одиницю довжини шва [7]:

$$q_n = \eta \cdot U_d \cdot I_{зв} / V_{зв}, \text{ Дж/мм}, \quad (2.1)$$

де  $\eta$  – ефективний ККД теплового процесу зварювання (для АФ  $\eta = 0,85$ ; для РДЗ  $\eta = 0,65$ ). Погонна енергія визначає ширину ЗТВ, максимальну температуру в ній і швидкість охолодження, що безпосередньо впливає на структуру і властивості зони термічного впливу. Для двошарової сталі 16ГС+08Х13 погонна енергія при зварюванні корозійностійкого шару

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 25   |

обмежується значенням  $q_n \leq 3500$  Дж/мм для запобігання перегріву і зниження корозійної стійкості.

Повздовжній шов обичайки – з'єднання С19 за РТМ 26-291-79. Зварювання виконується в такій послідовності:

1) автоматичне зварювання перехідного шару з боку корозійностійкого шару до рівня границі між шарами (дріт Св-06Х25Н12ТЮ + флюс АН-26С);

2) розчистка кореня шва з зовнішнього боку механічним шляхом і автоматичне зварювання основного шару ззовні (дріт Св-10НЮ + флюс АН-348А);

3) зварювання корозійностійкого шару (дріт Св-06Х25Н12ТЮ + флюс АН-26С).

Розрахунок ширини зони термічного впливу (ЗТВ). Максимальна температура в будь-якій точці ЗТВ при зварюванні (формула Рикаліна для площинного стоку теплоти):

$$T_{\max} = (q_n / (2\pi \cdot \lambda \cdot \rho c)) \cdot (1 / y^2) \cdot \exp(-y^2 \cdot \rho c \cdot V_{\text{зв}} / (2\lambda)), \quad (2.2)$$

де  $\lambda = 40$  Вт/(м·К) – теплопровідність сталі 16ГС;

$\rho c = 3,5 \cdot 10^6$  Дж/(м³·К) – об'ємна теплоємність;

$y$  – відстань від осі шва, м. Для точки з  $T_{\max} = 1500$  °С (межа ЗТВ) при  $q_n = 2600$  Дж/мм =  $2,6 \cdot 10^6$  Дж/м:

$$y(\text{ЗТВ}) = \sqrt[4]{(q_n / (2\pi \cdot \lambda \cdot \rho c \cdot (T_{\max} - T_0)))} = \sqrt[4]{(2,6 \cdot 10^6 / (2\pi \cdot 40 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 1480))} = 2,9 \text{ мм.}$$

Таким чином, ширина ЗТВ по стороні 16ГС становить близько  $2 \cdot 2,9 = 5,8$  мм на один прохід. Ширина ЗТВ корозійностійкого шару при  $q_n = 1261$  Дж/мм:

$$y(\text{ЗТВ}) = \sqrt[4]{(1261 \cdot 10^3 / (2\pi \cdot 13 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 1480))} \approx 2,0 \text{ мм.}$$

Мала ширина ЗТВ корозійностійкого шару є важливим показником, оскільки вузька ЗТВ мінімізує ризик міжкристалітної корозії.

Розрахунок площ перерізу шарів (з ескізу з'єднання С19):

- основний шар –  $F_n = 0,75 \cdot 3 \cdot 1 + 16 = 36$  мм²;

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 26   |

- перехідний шар –  $F_H = 15,6 + 6 + 14 + 13 = 42 \text{ мм}^2$  (з геометрії розробки кромки);

- облицювальний шар –  $F_H = 18 \cdot 1 = 18 \text{ мм}^2$ .

Сила зварювального струму для автоматичного зварювання розраховується за глибиною проплавлення:

$$I_{зв} = (h/k) \cdot 100, A, \quad (2.3)$$

де  $h$  – необхідна глибина проплавлення, мм;  $k = 1,5$  – коефіцієнт для автоматичного зварювання під флюсом.

Для основного шару ( $h = 10 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = (10/1,5) \cdot 100 = 650 \text{ А}$ .

Для перехідного ( $h = 6 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = 400 \text{ А}$ .

Для облицювального ( $h = 4 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = 270 \text{ А}$ .

Діаметр електродного дроту:

$$de = 2 \cdot \sqrt{(I_{зв} / (i \cdot \pi))}, \text{ мм}, \quad (2.4)$$

де  $i = 30 \text{ А/мм}^2$  – допустима густина струму для дроту АФ.

Для основного шару:  $de = 2 \cdot \sqrt{(650 / (30 \cdot 3,14))} = 5 \text{ мм}$ .

Для перехідного:  $de = 4 \text{ мм}$ . Для облицювального:  $de = 4 \text{ мм}$ .

Напруга на дузі для основного і облицювального шарів приймається за рекомендаціями: 30 В та 35 В відповідно. Для перехідного шару:

$$U_d = 20 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{(de \cdot I_{зв})} + 1 = 20 + 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{(1,8 \cdot 120)} + 1 \approx 40 \text{ В}. \quad (2.5)$$

Швидкість зварювання:

$$V_{зв} = \alpha_n \cdot I_{зв} / (F_H \cdot \gamma \cdot 100), \text{ м/год}, \quad (2.6)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт наплавлення (10 г/(А·год) для основного і 12 для облицювального шарів);  $\gamma = 7,85 \text{ г/см}^3$  – питома маса сталі.

Для основного шару:  $V_{зв} = 10 \cdot 650 / (0,36 \cdot 7,85 \cdot 100) = 23 \text{ м/год}$ .

Для перехідного:  $V_{зв} \approx 4 \text{ м/год}$ .

Для облицювального:  $V_{зв} = 12 \cdot 270 / (0,18 \cdot 7,85 \cdot 100) \approx 23 \text{ м/год}$ .

З'єднання У7 застосовується для з'єднання обичайок між собою і для приварювання днищ до обичайок. Зварювання виконується в тій самій

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 27   |

послідовності, що й поздовжній шов С19. Площі перерізів шарів (з ескізу з'єднання У7):

- основний шар –  $F_H = 0,75 \cdot 2 \cdot 26 + 7 \cdot 2 = 53 \text{ мм}^2$ ;
- перехідний шар –  $F_H = 13 \cdot 2 + 69 = 95 \text{ мм}^2$ ;
- корозійностійкий шар –  $F_H = 30 \cdot 1 = 30 \text{ мм}^2$ .

Розрахунок сили зварювального струму для кільцевого шва:

- для основного шару ( $h = 9 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = (9/1,5) \cdot 100 = 600 \text{ А}$ ;
- для перехідного ( $h = 8 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = (8/1,5) \cdot 100 \approx 530 \text{ А}$ ;
- для облицювального ( $h = 3 \text{ мм}$ ):  $I_{зв} = (3/1,5) \cdot 100 = 200 \text{ А}$ .

Діаметр електродного дроту:

- для основного шару –  $d_e = 2 \cdot \sqrt{(600/94,2)} \approx 5 \text{ мм}$ ;
- для перехідного:  $d_e \approx 5 \text{ мм}$ ;
- для облицювального:  $d_e \approx 3 \text{ мм}$ .

Напруга на дузі: основний шар – 30 В; облицювальний – 35 В; перехідний – 30 В (за формулою 2.3).

Швидкість зварювання для кільцевого шва (з формули 2.6):

- основний шар –  $V_{зв} = 10 \cdot 600 / (0,53 \cdot 7,85 \cdot 100) = 14 \text{ м/год}$ ;
- перехідний –  $V_{зв} = 11 \cdot 530 / (0,95 \cdot 7,85 \cdot 100) \approx 8 \text{ м/год}$ ;
- облицювальний –  $V_{зв} = 12 \cdot 200 / (0,30 \cdot 7,85 \cdot 100) \approx 10 \text{ м/год}$ .

З'єднання У3 – приварювання штуцерів (РДЗ). Діаметр електрода: для основного шару – 5 мм, для перехідного/облицювального – 6 мм.

Сила струму при РДЗ:

$$I_{зв} = \pi \cdot d^2 / (4) \cdot i, \text{ А}, \quad (2.5)$$

де  $i = 12 \text{ А/мм}^2$  (для  $d = 5 \text{ мм}$ ) і  $11 \text{ А/мм}^2$  (для  $d = 6 \text{ мм}$ ).

Для основного шару:  $I_{зв} = 3,14 \cdot 25 / 4 \cdot 12 = 220 \text{ А}$ .

Для перехідного та облицювального шарів:  $I_{зв} = 3,14 \cdot 36 / 4 \cdot 11 = 310 \text{ А}$ .

Напруга на дузі – 25 В (за рекомендаціями РТМ).

З'єднання Т4 – приварювання тарілок (РДЗ). Площа перерізу  $F_H = 19,5 \text{ мм}^2$ ;  $d = 5 \text{ мм}$ ;  $I_{зв} = 220 \text{ А}$ ;  $U_d = 25 \text{ В}$ ;  $V_{зв} = 0,40 \text{ см/с}$ .

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 28   |

Визначення швидкості подачі електродного дроту (для АФ). Швидкість подачі дроту розраховується з умови рівності маси розплавленого електрода і маси наплавленого металу:

$$V_{nd} = 4 \cdot \alpha_n \cdot I_{зв} / (\pi \cdot d_e^2 \cdot \gamma), \text{ м/год}, \quad (2.7)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт наплавлення (г/(А·год));  $\gamma = 7,85 \text{ г/см}^3$  – питома маса сталі;  $d_e$  – діаметр дроту (мм).

Для основного шару поздовжнього шва:  $V_{nd} = 4 \cdot 10 \cdot 650 / (3,14 \cdot 36 \cdot 7,85) = 26000/888,6 \approx 29 \text{ м/год}$ .

Для перехідного шару:  $V_{nd} = 4 \cdot 11 \cdot 400 / (3,14 \cdot 16 \cdot 7,85) = 17600/394,9 \approx 44 \text{ м/год}$ .

Для облицювального шару:  $V_{nd} = 4 \cdot 12 \cdot 270 / (3,14 \cdot 16 \cdot 7,85) = 12960/394,9 \approx 33 \text{ м/год}$ .

Аналогічно для кільцевих швів: основний шар  $V_{pd} \approx 38 \text{ м/год}$ ; перехідний – 38 м/год; облицювальний – 43 м/год.

Перевірка погонної енергії зварювання для кожного шару. Погонна енергія перевіряється з умови неперевищення допустимих значень для кожного типу металу:

Для основного шару (С19):  $q_p = 0,85 \cdot 30 \cdot 650 / 6,38 = 2600 \text{ Дж/мм} < 4000 \text{ Дж/мм}$  (норма для 16ГС) – умова виконується.

Для перехідного шару:  $q_p = 0,85 \cdot 40 \cdot 400 / 1,11 = 12\,252 \text{ Дж/мм}$ . Значення перевищує норму, однак для перехідного шару РТМ 26-291-79 допускає підвищену погонну енергію, оскільки цей шар виконується аустенітним матеріалом. Рекомендується збільшити швидкість зварювання перехідного шару до 6–8 м/год для зниження  $q_p$  до 3000–4500 Дж/мм.

Для облицювального шару (08Х13):  $q_p = 0,85 \cdot 35 \cdot 270 / 6,38 = 1261 \text{ Дж/мм} < 3500 \text{ Дж/мм}$  (норма для аустенітних матеріалів) – умова виконується.

Зведену таблицю режимів зварювання для всіх з'єднань і шарів наведено в таблиці 2.7.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 29   |

Таблиця 2.7 – Зведені режими зварювання абсорбера

| З'єднання      | Шар           | Ізв, А | Уд, В | Взв, м/год     | de, мм | Процес |
|----------------|---------------|--------|-------|----------------|--------|--------|
| С19 (поздовж.) | Основний      | 650    | 30    | 23             | 6      | АФ     |
| С19 (поздовж.) | Перехідний    | 400    | 40    | 4              | 4      | АФ     |
| С19 (поздовж.) | Облицюв.      | 270    | 35    | 23             | 4      | АФ     |
| У7 (кільц.)    | Основний      | 600    | 30    | 14             | 5      | АФ     |
| У7 (кільц.)    | Перехідний    | 530    | 30    | 8              | 5      | АФ     |
| У7 (кільц.)    | Облицюв.      | 200    | 35    | 10             | 3      | АФ     |
| У3 (штуцери)   | Основний      | 220    | 25    | 0,27 см/с      | 5      | РДЗ    |
| У3 (штуцери)   | Перехід./Обл. | 310    | 25    | 0,12–0,27 см/с | 6      | РДЗ    |
| Т4 (тарілки)   | Основний      | 220    | 25    | 0,40 см/с      | 5      | РДЗ    |

#### 2.1.4 Вибір основного та допоміжного зварювального устаткування

Вибір зварювального устаткування визначається прийнятими методами зварювання, розрахованими режимами, а також техніко-економічними показниками обладнання. Усе обладнання вибирається з умови забезпечення необхідних діапазонів регулювання струму і напруги з запасом не менше 20–30 % від максимальних розрахункових значень.

Для зварювання зовнішніх поздовжніх і кільцевих швів корпусу абсорбера обрано консольну зварювальну установку ESAB CaB 640 с з підвісною зварювальною головкою A6S Compact 700 (рис. 2.1) [8].



Рисунок 2.1 – Консольна установка ESAB CaB 460

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.3Т - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 30   |

Установка призначена для зварювання під флюсом і дозволяє виконувати зварювання з обох боків шва при горизонтальному переміщенні консолі вздовж шва. Технічні характеристики наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики зварювальної установки ESAB CaB 460c

| Параметр                          | Значення |
|-----------------------------------|----------|
| Діаметр електродного дроту, мм    | 2–6      |
| Номінальний зварювальний струм, А | 350–1800 |
| Швидкість зварювання, м/хв        | 0,1–2,0  |
| Горизонтальне переміщення, мм     | 5000     |
| Вертикальне переміщення, мм       | 3000     |
| Довжина, мм                       | 7215     |
| Висота, мм                        | 4500     |
| Маса, кг                          | 2900     |

Як джерело живлення для установки ESAB обрано зварювальний випрямляч Патон ВДМ-1202 П (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Зварювальний випрямляч Патон ВДМ-1202 П

Діапазон регулювання струму даного випрямляча покриває розрахункові значення струму для основного шару (650 А). Технічні характеристики наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики зварювального випрямляча Патон ВДМ-1202 П

| Параметр                       | Значення    |
|--------------------------------|-------------|
| Напруга живлення, В            | 3×380       |
| Частота, Гц                    | 50          |
| Номінальний струм, А (ТВ=100%) | 1000        |
| Тривалість навантаження, %     | 100         |
| Номінальна робоча напруга, В   | 60          |
| Напруга х.х., В                | ≤75         |
| Споживана потужність, кВА      | 90          |
| Маса, кг                       | 65          |
| Габарити, мм                   | 740×610×640 |

Для виконання внутрішніх кільцевих швів і перехідних шарів обрано зварювальний трактор ESAB Versotrac (EWT 1000) [10]. Трактор переміщається безпосередньо по внутрішній поверхні обичайки, що дозволяє виконувати зварювання всередині великогабаритних посудин. Номінальний струм 1000 А з запасом перекидає розрахункові значення для внутрішніх швів. Технічні характеристики наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Технічні характеристики зварювального трактора ESAB Versotrac (EWT 1000)

| Параметр                          | Значення |
|-----------------------------------|----------|
| Напруга живлення, В               | 380      |
| Номінальний зварювальний струм, А | 1000     |
| Діаметр електродного дроту, мм    | 1,6–5,0  |
| Швидкість подачі дроту, м/хв      | 9        |
| Швидкість зварювання, м/хв        | 0,1-2    |
| Маса, кг                          | 65       |

Для ручного дугового зварювання штуцерів, люків і тарілок обрано зварювальний випрямляч ПАТОН ВД-400СГД АС/DC MMA/TIG. Це потужний професійний трифазний універсальний зварювальний випрямляч класичного типу, призначений для роботи у важких промислових умовах. Апарат поєднує в собі функції джерела постійного (DC) та змінного (АС) струму для ручного дугового зварювання (ММА) та аргонодугового зварювання (TIG). Апарат забезпечує стабільне горіння дуги що відповідає розрахунковим режимам РДЗ (220–310 А). Технічні характеристики наведено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Технічні характеристики зварювального випрямляча ПАТОН ВД-400СГД

| Параметр                       | Значення    |
|--------------------------------|-------------|
| Напруга живлення, В            | 3×380       |
| Частота, Гц                    | 50          |
| Номінальний струм, А (ТВ=100%) | 400         |
| Межі регулювання струму, А     | 90–400      |
| Напруга х.х., В                | 53          |
| Номінальна робоча напруга, В   | 32          |
| Споживана потужність, кВА      | 25          |
| Діаметр електрода ММА, мм      | 2–6         |
| Маса, кг                       | 120         |
| Габарити, мм                   | 800×415×670 |

## 2.2 Розробка технологічного процесу виготовлення зварної конструкції

Технологічний процес виготовлення абсорбера являє собою сукупність послідовних операцій, що забезпечують перетворення вихідних матеріалів (листовий прокат, поковки, трубні заготовки) в готовий апарат відповідно до конструкторської документації. Технологічний маршрут розроблено відповідно до вимог ОСТ 26-291-94, РТМ 26-291-79 і технічних умов на

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 33   |

виготовлення посудин 1-ї групи (тиск понад 5 МПа). При розробці маршруту керувалися такими принципами:

- дотримання прямоточності виробничого процесу;
- мінімізація переміщень деталей між операціями;
- виконання контрольних операцій після кожного відповідального технологічного кроку.

### 2.2.1 Заготівельні операції

Заготівельні операції є першим і необхідним етапом технологічного процесу, що включає підготовку всіх деталей і вузлів до складання і зварювання. Від якості виконання заготівельних операцій суттєво залежить якість зварних з'єднань і точність геометричних розмірів готового апарата.

Операція 010. Вхідний контроль листового прокату. Перед запуском у виробництво листовий прокат зі сталі 16ГС+08Х13 перевіряється на відповідність вимогам ГОСТ 10885-85. Контролюються: маркування і відповідність сертифікатам якості на хімічний склад і механічні властивості; геометричні розміри листів (товщина, ширина, довжина) в межах допусків за ГОСТ 19903-74; якість поверхні основного і плакуючого шарів (тріщини, розшарування, корозія не допускаються); суцільність зчеплення шарів – ультразвуковий контроль по всій площі листа (ГОСТ 10885-85). Норми контролю: 100 % листів підлягають перевірці маркування і зовнішньому огляду; вибірково (не менше 10 % від партії) контролюються механічні властивості. Листи, що не відповідають вимогам, до виробництва не допускаються і підлягають поверненню постачальнику.

Операція 020. Правка листів. Листовий прокат надходить у цех у рулонах або в листах і може мати нерівності (хвилястість, жолоблення), що виникли при транспортуванні та зберіганні. Виправлення виконується на листоправильній машині з роликами. Після правки відхилення від площинності не повинно перевищувати 1 мм/м.

Операція 030. Розмітка і розкрій. Розмітка виконується відповідно до розкрійних карт, складених з урахуванням: необхідних припусків на обробку

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 34   |

кромок; мінімального відходу металу; розташування серцевинних і крайових дефектів листа за межами заготовок. Розрізання виконується на гільйотинних ножицях (для листів завтовшки до 16 мм) або газовим різанням для великих товщин. Оскільки основний матеріал – двошарова сталь, використовується тільки механічне різання або плазмове різання для точних прямолінійних різів.

Операція 040. Підготовка кромок. Підготовка кромок виконується механічною обробкою (фрезерування або стругання) або термічним різанням з наступним механічним зачищенням. Форма розробки кромок відповідає РТМ 26-291-79 для двошарових сталей: для з'єднання С19 (поздовжній шов) – V-подібна розробка з відповідним знятим шаром; для з'єднання У7 (кільцевий шов) – двостороння Х-подібна або V-подібна. Особливість підготовки кромок двошарових сталей: після загальної обробки кромок необхідно видалити корозійностійкий плакуючий шар на відстані 3–5 мм від кромки для забезпечення правильного виконання перехідного шару. Прилеглі до шва ділянки зачищаються до металевого блиску на ширину 20–30 мм.

Операція 050. Вальцювання обичайок. Виправлені листи вальцюються в циліндричні обичайки на трьохвалковій листозгинальній машині. Вальцювання виконується при температурі навколишнього середовища не нижче +5 °С. Після вальцювання перевіряються: правильність кола (відхилення від кругової форми не більше 0,5 % від номінального діаметра); замикання поздовжнього стику (зазор і зміщення кромок в допустимих межах). При необхідності виконується підгин крайок обичайки.

Операція 060. Вирізання отворів під штуцери та люки. Отвори вирізаються ручним плазмовим різанням з використанням установки Selma УВР-120. Переваги плазмового різання перед газовим для даної конструкції: висока якість різу зі мінімальною зоною термічного впливу; можливість різання корозійностійкого шару без його значного перегріву; більша швидкість процесу. Параметри різання: струм 80–100 А; швидкість різання 0,6–1,0 м/хв (для S = 32 мм); газ – стиснене повітря (тиск 0,4–0,6 МПа). Після плазмового різання кромки отворів обробляються механічно: зачищення нерівностей,

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 35   |

формування необхідного кута розробки кромки і видалення корозійностійкого шару на задану ширину 15–20 мм. Точність вирізання центрів отворів –  $\pm 1$  мм, форми –  $\pm 2$  мм.

Операція 070. Підготовка штуцерів, люків і фланців. Штуцери являють собою відрізки труб зі сталі 16ГС з встановленими фланцями. Кінці штуцерів, що вставляються в корпус, готуються відповідно до РТМ 26-291-79 (тип з'єднання УЗ): скіс кромки  $45^\circ \pm 2,5^\circ$  зі сторони основного шару; зняття корозійностійкого шару на ширину 20–25 мм від кінця штуцера для виконання перехідного зварювального шару. Кромки знежирюються ацетоном або спиртом безпосередньо перед складанням.

### 2.2.2 Розробка технології складання та зварювання

Технологічний маршрут складання і зварювання передбачає виконання з'єднань у порядку, що мінімізує зварювальні деформації і забезпечує доступність зварних швів для контролю. Весь технологічний маршрут поділено на такі групи операцій: 100-ті (складання і зварювання обичайок); 200-ті (складання і зварювання з днищами); 300-ті (приварювання штуцерів і люків); 400-ті (приварювання тарілок); 500-ті (контрольні і випробувальні операції).

Операція 100. Складання поздовжнього стику обичайки. Звальцьована обичайка встановлюється на складально-зварювальний стенд. Поздовжній стик вирівнюється і перевіряється на відповідність вимогам: зазор в корені шва 1–2 мм; зміщення кромки не більше  $0,1S = 3,2$  мм; кутастість не більше  $f = 0,1S + 3 = 6,2$  мм. Виконується прихватка поздовжнього стику ручним дуговим зварюванням електродами УОНИ-13/55 з кроком 300–400 мм (від середини до країв стику). Довжина прихватки – 50–80 мм. Прихватки, що мають тріщини або пори, видаляються механічним способом і виконуються повторно.

Операція 110. Автоматичне зварювання поздовжнього шва С19. Послідовність виконання шарів: 1) попередній підігрів кромки до 200–250 °С (контроль термоолівцем); 2) автоматичне зварювання перехідного шару зсередини обичайки трактором ESAB Versotrac (EWT 1000), (дріт Св-06Х25Н12ТЮ,

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 36   |

флюс АН-26С) до рівня границі між плакуючим і основним шарами; 3) охолодження до температури нижче 300 °С; 4) розчистка кореня шва з зовнішнього боку (пневматичне зубило + шліфувальний круг) до чистого металу; 5) автоматичне зварювання основного шару ззовні установкою ESAB (дріт Св-10НЮ, флюс АН-348А); 6) зварювання корозійностійкого облицювального шару (дріт Св-06Х25Н12ТЮ, флюс АН-26С). Між проходами виконується зачищення шва від шлаку і бризок. Температура між проходами підтримується в діапазоні 100–300 °С.

Після зварювання поздовжнього шва виконується: візуальний і вимірювальний контроль (розмір шва, відсутність зовнішніх дефектів); перевірка відповідності геометрії шва вимогам креслення; за необхідності – виправлення дефектів і повторний контроль.

Операція 120. Складання обичайок між собою і з днищами. Кілька обичайок (залежно від загальної висоти апарата) складаються в кільцеві стики на стенді для складання обичайок з пневматичними притисками. Контролюються: зміщення кромок (не більше  $b = 0,1S$ ); зазор в корені стику 1–2 мм; зміщення поздовжніх швів суміжних обичайок не менше 100 мм (або потрібна товщина більш товстого елемента). Прихватка кільцевих стиків виконується аналогічно поздовжньому шву, але з більшою кількістю прихваток – через кожні 200–300 мм по колу.

Операція 130. Автоматичне зварювання кільцевих швів У7. Послідовність виконання аналогічна поздовжньому шву С19. Зварювання виконується на роликовому стенді при рівномірному обертанні виробу. Зовнішні шви виконує установка ESAB CaB 460 с, внутрішні – трактор ESAB Versotrac (EWT 1000).

Обов'язково передбачається флюсова подушка ременного або дискового типу під стиком для запобігання витіканню рідкого металу при зварюванні першого шару. Флюсова подушка при ременному варіанті подається безперервно в зону горіння дуги силами тертя між виробом і ременем. Тиск флюсу на стик регулюється натягненням ременя. При дисковому варіанті

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 37   |

флюсова подушка піднімається до стику пневмоциліндром і при обертанні виробу захоплює флюс разом із собою.

Операція 140. Приварювання штуцерів і люків УЗ (РДЗ). Виріб встановлюється на роликовий стенд. Штуцери і люки встановлюються в отвори корпусу, перевіряються їх взаємне розташування і геометрія, після чого виконується прихватка і зварювання відповідно до вимог РТМ 26-291-79 для з'єднання УЗ. Послідовність шарів: 1) основний шар (УОНІ-13/55); 2) підрубка кореня шва зсередини апарата; 3) зварювання кореня шва; 4) перехідний шар (ОЗЛ-6); 5) корозійностійкий шар (ОЗЛ-6). Підігрів аналогічний основним швам корпусу.

Операція 150. Приварювання тарілок Т4 (РДЗ). Тарілки встановлюються на опорні кільця всередині корпусу. Приварювання виконується кутовими швами катетом 4–6 мм. Зварювання ведеться в нижньому і горизонтальному положеннях від центра тарілки до периферії для мінімізації деформацій. Тарілки виготовляються з корозійностійкої сталі 08Х13, тому для їх приварювання до корпусу (двошарова сталь) застосовуються електроди ОЗЛ-6. Для запобігання деформуванню тарілок від нагріву виконується переривчасте зварювання ділянками по 50–80 мм з охолодженням між ділянками.

Операція 160. Термічна обробка (відпуск). Після завершення всіх зварювальних операцій корпус абсорбера завантажується в термічну піч або нагрівається переносними індукційними нагрівачами. Режим відпуску: 1) нагрівання зі швидкістю не більше 100 °С/год; 2) рівномірна витримка при 600–650 °С упродовж 2–3 год; 3) охолодження зі швидкістю не більше 100 °С/год до 300 °С; 4) охолодження на повітрі. Термообробка знімає залишкові зварювальні напруження і покращує пластичні властивості зони термічного впливу по стороні 08Х13 (відпуск мартенситу). Після термообробки перевіряється твердість металу в ЗТВ (не більше 300 НВ для 16ГС) і виконується ВВК зварних швів (перевірка на наявність тріщин, що могли виникнути при охолодженні).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 38   |

Операція 170. Фінальний технічний контроль. Після термообробки проводиться фінальний контроль якості: радіографічний або УЗ контроль 100 % поздовжніх і кільцевих швів; вимірювання геометрії апарата (діаметр, відхилення від круглості, висота); перевірка розташування штуцерів і люків відповідно до монтажного креслення.

Розрахунок витрат зварювальних матеріалів [12].

Маса наплавленого металу:

$$G_n = F \cdot l \cdot \gamma, \quad (2.7)$$

де  $F$  – площа перерізу шва,  $\text{см}^2$ ;  $l$  – довжина шва,  $\text{см}$ ;  $\gamma = 7,85 \text{ г/см}^3$ .

Для поздовжнього шва ( $l = 300 \text{ см}$ ):  $G_n = 1,78 \cdot 300 \cdot 7,85 = 4190 \text{ г}$ . Витрата дроту:  $G_d = G_n \cdot (1 + \psi) = 4190 \cdot 1,1 = 4609 \text{ г}$  ( $\psi = 0,1$  для АФ).

Витрата флюсу для зовнішнього шару:  $G_f = (U_d - 1,8) \cdot 780 / V_{зв} = (40 - 1,8) \cdot 780 / 14 = 2126 \text{ г/м}$ .

Зведена таблиця витрат зварювальних матеріалів за основними типами швів наведена в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Розрахунок витрат зварювальних матеріалів

| Шов            | Матеріал       | $G_n$ , г | $G_d$ , г | $G_f$ , г/м | Примітка   |
|----------------|----------------|-----------|-----------|-------------|------------|
| Поздовжній С19 | Св-10НЮ (осн.) | 424       | 466       | 3831        | зовн. шар  |
| Поздовжній С19 | Св-10НЮ (осн.) | 424       | 466       | 10350       | внутр. шар |
| Кільцевий У7   | Св-10НЮ (осн.) | 978       | 1076      | 2430        | зовн. шар  |
| 3 кільцеві У7  | Св-10НЮ (осн.) | 2934      | 3227      | 4662        | внутр. шар |

### 2.2.3 Вибір заходів боротьби зі зварювальними напруженнями та деформаціями

При виготовленні великогабаритного абсорбера з двошарової сталі виникають значні залишкові зварювальні напруження і деформації, які можуть призводити до порушення проектної геометрії апарата, зниження несучої здатності зварних з'єднань, утворення холодних тріщин у зоні термічного

впливу корозійностійкого шару а також виникнення небезпечних залишкових розтягуючих напружень у зварних швах корпусу.

Причини виникнення зварювальних деформацій:

- нерівномірний нагрів металу при зварюванні призводить до пластичних деформацій в зоні нагріву;
- після охолодження ці пластичні деформації викликають залишкові напруження і зміну форми виробу.

Для двошарової сталі ситуацію ускладнюють різні коефіцієнти лінійного розширення сталей 16ГС ( $\alpha \approx 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) і 08Х13 ( $\alpha \approx 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Комплекс заходів зменшення зварювальних напружень і деформацій:

1) Попередній зворотний вигин. Перед складанням кільцевих стиків обичайки встановлюються з примусовим попереднім зворотним вигином. Величину попереднього вигину визначають розрахунком або за дослідними даними так, щоб після зварювання і охолодження деформація наближалась до нуля.

2) Раціональна послідовність зварювання. Поздовжні шви виконуються до кільцевих. При зварюванні кільцевих швів дотримується симетричне виконання: першим виконується нижній кільцевий шов (між нижнім днищем і нижньою обичайкою), потім – у напрямку до верхнього днища. При багатопрохідному зварюванні кожен наступний прохід виконується у зворотному напрямку.

3) Жорстке закріплення в пристосуваннях. Деталі фіксуються в складально-зварювальних пристосуваннях (стенд з пневматичними притисками), що обмежує вільні деформації при зварюванні. Зовнішні стяжки залишаються встановленими до повного охолодження зварного з'єднання.

4) Попередній підігрів. Попередній підігрів до 200–300 °С зменшує температурний градієнт у металі при зварюванні, знижуючи залишкові напруження. Для сталі 08Х13 підігрів є обов'язковим і по своїй суті виконує функції не тільки захисту від холодних тріщин, але і зменшення залишкових деформацій.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 40   |

5) Термічна обробка після зварювання (відпуск). Після завершення всіх зварювальних операцій корпус абсорбера підлягає термічній обробці: нагрівання до температури 600–650 °С (для сталі 16ГС) зі швидкістю не більше 100 °С/год; витримка 2–3 год; охолодження зі швидкістю 80–100 °С/год до температури 300 °С, далі – на повітрі. Відпуск знімає залишкові напруження на 85–90 % від початкового рівня і покращує пластичні властивості зварних з'єднань.

6) Обертання виробу при зварюванні кільцевих швів. Зварювання кільцевих швів при рівномірному обертанні виробу на роликовому стенді забезпечує симетричний тепловий вклад по колу шва, що значно зменшує кутові деформації порівняно зі зварюванням нерухомого виробу.

Розрахунок очікуваної кутової деформації обичайки при зварюванні поздовжнього шва. Кутова деформація  $\beta$  (нахил кромки) при зварюванні стикового шва може бути оцінена за наближеною формулою:

$$\beta \approx (0,02 \cdot Q / S^2) \cdot (1 - S/50), \quad (2.8)$$

де  $Q$  – погонна енергія зварювання, Дж/мм;

$S$  – товщина металу, мм.

Погонна енергія при автоматичному зварюванні основного шару ( $I_{зв} = 650$  А;  $U_d = 30$  В;  $V_{зв} = 23$  м/год = 383 мм/хв = 6,38 мм/с;  $\eta = 0,85$  для АФ):

$$Q = \eta \cdot U_d \cdot I_{зв} / V_{зв} = 0,85 \cdot 30 \cdot 650 / 6,38 = 2600 \text{ Дж/мм.}$$

Підставивши відповідні значення у формулу 2.8 визначимо кутову деформацію.

$$\beta \approx (0,02 \cdot 2600 / 32^2) \cdot (1 - 32/50) = 0,0508 \cdot 0,36 = 0,018 \text{ рад} \approx 1,03^\circ.$$

Така деформація є прийнятною для даного типу конструкції (допустима кутове відхилення становить  $0,1S + 3 = 6,2$  мм на базі 1 м), але для мінімізації рекомендується застосування попереднього зворотного вигину. Попередній зворотний вигин призначається  $\beta' = -1^\circ$  (в протилежний бік), після зварювання результуюча кутова деформація:  $\beta_{рез} = \beta + \beta' = 1,03^\circ - 1^\circ = 0,03^\circ \approx 0$  (практично нульова).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 41   |

Для зменшення поздовжнього вкорочення обичайки після зварювання поздовжнього шва ( $\Delta L$ ) розраховуємо:

$$\Delta L = (\alpha_m \cdot q_n) / (E \cdot S), \quad (2.9)$$

де  $\alpha_m = 0,85$  – частка теплоти, що витрачається на нагрів металу шва і ЗТВ;  $q_n = Q/S$  – питома погонна енергія;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль пружності сталі.

$$\Delta L = (0,85 \cdot 81,25) / (2,1 \cdot 10^5 \cdot 32) = 69 / 6\,720\,000 \approx 0,00001 \text{ м/м} = 0,01 \text{ мм/м}.$$

Таке поздовжнє вкорочення є незначним і не впливає на точність розмірів апарата.

#### 2.2.4 Технічний контроль якості та виправлення браку

Система контролю якості при виготовленні абсорбера організується відповідно до вимог ОСТ 26-291-94 і включає вхідний, операційний та приймальний контроль.

Вхідний контроль: перевірка сертифікатів якості на листовий прокат, зварювальні матеріали, поковки, фланці; перевірка атестації зварників (посвідчення відповідно до НПАОП 0.00-1.29-10); перевірка справності зварювального обладнання і вимірювальних приладів; вибіркова перевірка хімічного складу металу та зварювальних матеріалів.

Операційний контроль: перевірка якості підготовки кромки (кут розкриття, притуплення, зазор) перед прихваткою; контроль температури підігріву перед зварюванням і між проходами; перевірка параметрів режиму зварювання в процесі виконання кожного шару; перевірка якості зачищення між шарами; візуальний контроль кожного шару перед нанесенням наступного.

Приймальний контроль зварних з'єднань включає такі методи неруйнівного контролю [13]:

а) Візуальний і вимірювальний контроль (ВВК) – 100 % всіх зварних з'єднань. Виявляє зовнішні дефекти: тріщини, пори, підрізи, напливи, незаплавлені кратери, зміщення кромки. Виконується до і після виправлення

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 42   |

поверхні шва. Поверхня шва і прилеглі ділянки очищаються від шлаку і бризок, шир. не менше 20 мм з кожного боку.

б) Радіографічний контроль (РГК) або ультразвукова дефектоскопія (УЗД) – 100 % поздовжніх і кільцевих швів (1-ша група посудин за ОСТ 26-291-94, тиск > 5 МПа). Метод обирається з умови найбільш повного виявлення характерних дефектів для конкретного типу з'єднання. РГК ефективний для виявлення об'ємних дефектів (пор, шлакових включень), УЗД – для виявлення площинних дефектів (тріщин, непроварів).

Радіографічний контроль зварних швів абсорбера. Для просвічування кільцевих швів застосовується схема панорамного просвічування: джерело іонізуючого випромінювання (рентгенівська трубка або гамма-апарат з ізотопом Іридій-192) встановлюється всередині апарата в центрі зварного шва. Рентгенографічна плівка накладається ззовні по всьому периметру шва – весь стик просвічується за одну експозицію. Переваги панорамної схеми: мінімальна фокусна відстань, мінімальна товщина просвічуваного металу, найбільш рівномірна якість зображення. Для поздовжніх швів застосовується схема просвічування через одну стінку: джерело знаходиться на осі шва ззовні, плівка – з протилежного боку. Чутливість рентгенографічного контролю: для товщини стінки 32 мм – клас чутливості В (за ДСТУ EN 462-1), що означає виявлення дефектів розміром 1,0 % від товщини стінки, тобто  $\geq 0,32$  мм.

Ультразвуковий контроль (УЗД). Для товстостінних зварних швів (S = 32 мм) ультразвуковий контроль застосовується як доповнення до радіографічного або як альтернативний метод. УЗД особливо ефективний для виявлення непроварів і тріщин, орієнтованих вздовж напрямку ультразвукового пучка. Контроль виконується луна-методом з кутовими суміщеними перетворювачами (кут вводу 70° для стінки 32 мм). Зони контролю: метал шва, зони сплавлення, ЗТВ на ширину не менше 50 мм з обох боків від осі шва. Чутливість налаштовується за стандартними зразками відповідно до ДСТУ EN 1712.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 43   |

в) Капілярний (ПТ) або магнітопорошковий (МТ) контроль – для корозійностійкого шару на виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів. Застосовується для контролю міжкристалітної корозії шва.

г) Гідравлічне випробування. Після завершення всіх зварювальних і контрольних операцій апарат піддається гідравлічному випробуванню пробним тиском:

$$P_{np} = 1,25 \cdot P_{роб} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]T = 1,25 \cdot 6,3 \cdot 1 \approx 7,9 \text{ МПа.}$$

Час витримки залежить від товщини стінки (таблиця 2.12).

Таблиця 2.12 – Час витримки при гідравлічному випробуванні

| Товщина стінки, мм                    | Час витримки, хв |
|---------------------------------------|------------------|
| До 50                                 | 10               |
| Понад 50 до 100                       | 20               |
| Понад 100                             | 30               |
| Литі, багат шарові (будь-яка товщина) | 60               |

Після витримки тиск знижується до розрахункового, при якому виконується огляд всієї поверхні апарата і перевірка герметичності зварних і роз'ємних з'єднань. Посудина вважається такою, що витримала випробування, якщо не виявлено течії, тріщин, потіння в зварних з'єднаннях і на основному металі; течії в роз'ємних з'єднаннях; видимих залишкових деформацій.

Виправлення браку. Поверхневі дефекти (підрізи, напливи, кратери) усуваються механічним шляхом або заварюванням. Внутрішні дефекти видаляються механічною виборкою (вирубка, шліфування) до здорового металу на всій довжині дефекту плюс 10 мм з кожного кінця; після цього виконується заварювання відповідним методом і матеріалом. Допускається виправлення не більше двох разів на одній ділянці. Після виправлення ділянка підлягає повторному контролю тими ж методами, що й основний шов.

Технічні умови на виготовлення зварних з'єднань. Усі зварні шви повинні відповідати вимогам ОСТ 26-291-94 щодо якості і розмірів. Основні вимоги до складання: відведення (кутастість) кромок – не більше  $f = 0,1S + 3$

мм (але не більше 5 мм); зміщення кромок у поздовжніх швах – не більше 0,1S (але не більше 3 мм); зміщення кромок у кільцевих швах (при S = 32 мм) – не більше 4 мм. Поздовжні шви суміжних обичайок повинні бути зміщені відносно одна одної не менш ніж на 100 мм. Прихватки виконуються із застосуванням тих самих присадних матеріалів, що і основний шов, і перед зварюванням переплавляються або видаляються механічним шляхом.

Вимоги до зварних з'єднань. Основні шви корпусу (С19, У7) виконуються з повним проплавленням по всій товщині. Якість зварних швів оцінюється за такими критеріями: посилення шва – в межах 0–3 мм; ширина шва – відповідно до розрахунку і ескізу з'єднання  $\pm 2$  мм; підріз – не допускається глибиною більше 0,5 мм і довжиною понад 10 % довжини шва; пори – не більше одного розміром до 1 мм на 100 мм довжини шва; тріщини будь-якого виду і напрямку – не допускаються. Якість корозійностійкого шару перевіряється методом капілярного або магнітопорошкового контролю: допускаються пори не більше 0,5 мм у кількості не більше 3 на 100 мм довжини шва, тріщини і непровари не допускаються.

Вимоги до матеріалів для виготовлення абсорбера. Листовий прокат із сталі 16ГС+08Х13 (ГОСТ 10885-85) постачається в термообробленому стані з листовим випробовуванням. Обов'язкові вимоги: масова частка сірки та фосфору не більше 0,035 % кожного; визначення границі текучості при температурі 410 °С (не менше 156 МПа); визначення ударної в'язкості при температурі мінус 20 °С і після механічного старіння (ГОСТ 5520-79). Кожен лист двошарової сталі підлягає перевірці суцільності зчеплення шарів ультразвуковим методом відповідно до ГОСТ 10885-85 – зони з відшаруванням плакуючого шару до виробництва не допускаються.

Листовий прокат із вуглецевої сталі товщиною більше 60 мм, призначений для виготовлення посудин під тиском понад 10 МПа, підлягає листовому контролю ультразвуковим методом (клас 1 за ГОСТ 22727). Поковки для фланців і патрубків зі сталі 16ГС (ГОСТ 19281-89) виготовляються за вимогами групи IV, клас 245 (ГОСТ 8479). Зварювальні

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 45   |

матеріали (дріт, флюс, електроди) постачаються з сертифікатами якості і підлягають вхідному контролю: перевірка маркування і відповідності сертифікату, зовнішній вигляд, вологість флюсу (прожарювання перед використанням). Електроди УОНІ-13/55 і ОЗЛ-6 прожарюються при 350–400 °С упродовж 1–1,5 год перед зварюванням.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 46   |

## 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Компонування складальних та зварювальних установок

Правильне компонування складально-зварювального обладнання на дільниці є необхідною умовою ефективної організації виробничого процесу. При проектуванні компонування основними вимогами є: дотримання принципу прямоточності (мінімальні зворотні переміщення деталей); максимальна механізація підйомно-транспортних операцій; дотримання нормованих відстаней між обладнанням; зручність обслуговування і ремонту [14].

Стенд для складання обичайок з днищами призначений для складання обичайок і днищ в стик і наступного виконання прихватки кільцевих швів. Установка складається з двох центраторів, з'єднаних поздовжньою балкою. Кожен центратор має 26 радіальних пневмоциліндрів, чотири торцевих відкидних гвинтових притиски і два бічних ручних притиски. Пневмоциліндри об'єднані в чотири секції: дві секції по 9 циліндрів і дві по 4 циліндри. Послідовність роботи: обичайка укладається на роликоопори і закріплюється бічними притисками; днище підводиться і притискається торцевими притисками; після включення пневмоциліндрів здійснюється вирівнювання кромки і прихватка. Технічні характеристики стану: максимальний діаметр виробу – 2500 мм; мінімальний діаметр – 600 мм; максимальна маса виробу – 50 т; хід пневмоциліндрів – 100 мм; робочий тиск пневмосистеми – 0,4–0,6 МПа.

Роликовий стенд РС-80 використовується для обертання виробу при зварюванні кільцевих швів і при встановленні апарата при приварюванні штуцерів. Основні технічні характеристики: вантажопідйомність – 80 т; діаметр виробу – 500–3000 мм; швидкість обертання виробу – 0,1–5,0 об/хв (плавне регулювання); матеріал роликів – сталь зі гумовим покриттям (для

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 47   |

запобігання пошкодженню плакуючого шару). Роликовий стенд обладнано флюсовою подушкою ременного типу для підтримання флюсу під стиком при зварюванні першого шару кільцевих швів знизу. Рух ременя і подача флюсу до місця горіння дуги відбуваються внаслідок сил тертя при обертанні виробу. Ширина ременя – 200 мм; матеріал – гумотканинна стрічка термостійка; максимальна температура контакту – 150 °С.

Для підключення зворотного проводу при зварюванні кільцевих швів застосовується дисковий струмознімач Т-83, що дозволяє уникнути закручування зварювального кабелю при обертанні виробу. Технічні характеристики: максимальний зварювальний струм – 1000 А; довжина – 200 мм; діаметр диска – 150 мм; перехідний опір – не більше 0,05 мОм.

Пристрій для розмітки торців і отворів обичайок використовується для точного нанесення центрів і контурів отворів під штуцери та люки. Пристрій кріпиться до внутрішньої поверхні обичайки і дозволяє виконувати розмітку без ручних вимірювань, що забезпечує точність і відтворюваність розташування отворів.

Загальне компонування дільниці передбачає розподіл на чотири функціональні зони: заготівельна зона (правильна машина, гільйотинні ножиці, вальцювальна машина, плазморізальна установка); зона складання і зварювання корпусу (стенд для складання обичайок з днищами, роликовий стенд з флюсовою подушкою, установка ESAB CaB 640 с, трактор АДС-1002); зона приварювання штуцерів і тарілок (роликовий стенд, зварювальний пост РДЗ з випрямлячем ВД-306Д); зона контролю і випробувань (гідравлічний випробувальний стенд).

Пристосування для розмітки отворів в обичайках дозволяє без ручних вимірювань точно нанести центри і контури отворів під штуцери та люки. Пристосування кріпиться до внутрішньої поверхні обичайки і складається з: опорних важелів для кріплення до обичайки; вертикальної стійки; горизонтальної стрілки з циферблатом для відліку кутових положень;

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 48   |

вертикальної шкали для відліку висот. Точність розмітки: по куту –  $\pm 0,5^\circ$ ; по висоті –  $\pm 1$  мм.

Установка плазмового різання Selma УВР-120 призначена для напівавтоматичного або автоматичного різання всіх видів металів і сплавів. Технічні характеристики: номінальний струм різання 120 А (ПВ 60 %); напруга живлення 380 В (50 Гц); маса 155 кг; габарити 660×520×900 мм. Переваги плазмового різання порівняно з газовим: більша швидкість і вища якість різу; можливість різання кольорових металів і корозійностійких сталей; відсутність деформацій після різання; менша ширина зони термічного впливу, що критично для збереження властивостей корозійностійкого шару 08Х13. Після плазмового різання глибина шару зі зміненими властивостями не перевищує 0,5–1,0 мм, тоді як після газового різання – 3–5 мм. Це дозволяє скоротити обсяг механічної обробки кромek отворів.

Для переміщення заготовок і готових вузлів між зонами дільниці і для монтажу апарата застосовуються мостові крани вантажопідйомністю 100 т (2 одиниці), встановлені в прольоті цеху. Підкранові рейки розміщуються на висоті, що забезпечує підйом максимально важкої частини апарата (обичайка в зборі масою до 50 т) над роликовим стендом з необхідним запасом висоти. Для переміщення окремих деталей і зварювального устаткування застосовуються ручні візки вантажопідйомністю 1–3 т.

### 3.2 Розрахунок окремих елементів пристосувань

Кран-укосина є стаціонарним підйомним механізмом, призначеним для проведення ремонтно-монтажних робіт безпосередньо на вертикальних апаратах нафтопереробної і нафтохімічної промисловості. Вона кріпиться безпосередньо до корпусу апарата за допомогою підкладного листа. Кран-укосина є зварною металевою конструкцією з вертикальним стояком (труба) і горизонтальною стрілою (двотавр або швелер), жорстко з'єднаними між собою за допомогою розкосів.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 49   |

Вихідні параметри для розрахунку редуктора кран-укосини: потужність на вхідному валу  $P_1 = 4,365$  кВт; кутова швидкість черв'яка  $\omega_1 = 151,26$  рад/с; кутова швидкість колеса  $\omega_2 = 6,05$  рад/с; передаточне відношення  $u = 25$ ; режим роботи – середній нормальний (СН); номінальний момент на вхідному валу  $T_1 = 28,4$  Н·м; ресурс  $h = 7000$  год.

Розрахунок параметрів навантаження черв'ячної передачі. Номінальний крутний момент на валу черв'ячного колеса:

$$T_2 = T_1 \cdot u \cdot \eta \approx 28,4 \cdot 25 \cdot 0,79 = 561 \approx 562 \text{ Н·м.} \quad (3.1)$$

Максимальний момент на черв'ячному колесі під час пуску при перевантаженні до 160 %:

$$T_{2max} = k_n \cdot T_2 = 1,6 \cdot 562 = 900 \text{ Н·м.} \quad (3.2)$$

Вибір матеріалів. Для черв'яка: сталь 40Х, гартування + відпуск до твердості 45–50 HRC, шліфування робочих поверхонь витків. Для черв'ячного колеса: центр – сталь 40; зубчастий вінець – бронза БрА10Ж3Мц1,5 (відливання в кокіль),  $\sigma_B = 550$  МПа,  $\sigma_T = 360$  МПа.

Допустимі напруження для зубчастого вінця з безолов'янистої бронзи при швидкості ковзання  $V_s = 5\text{--}6$  м/с:

$$[\sigma]_{HO} = 300 - 25 \cdot V_s = 300 - 25 \cdot 6,09 = 150 \text{ МПа.} \quad (3.3)$$

$$[\sigma]_{Fmax} = 0,8 \cdot \sigma_T = 0,8 \cdot 360 = 288 \text{ МПа.} \quad (3.4)$$

Проектний розрахунок. Параметри зачеплення: кількість витків черв'яка  $z_1 = 2$  (при  $u = 25$ ); кількість зубців колеса  $z_2 = 50$ ; модуль  $m = 5$  мм; коефіцієнт діаметра черв'яка  $q = 16$ . Міжосьова відстань:

$$A = 0,5 \cdot m \cdot (q + z_2) = 0,5 \cdot 5 \cdot (16 + 50) = 165 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Ділильні діаметри:  $d_1 = m \cdot q = 5 \cdot 16 = 80$  мм;  $d_2 = m \cdot z_2 = 5 \cdot 50 = 250$  мм.

Перевірка:  $a = (d_1 + d_2)/2 = (80 + 250)/2 = 165$  мм – відповідає розрахунку.

Діаметри вершин:  $da_1 = d_1 + 2m = 90$  мм;  $da_2 = d_2 + 2m = 260$  мм.

Діаметри западин:  $df_1 = d_1 - 2,4m = 68$  мм;  $df_2 = d_2 - 2,4m = 238$  мм. Ширина вінця:  $b_2 = 0,75 \cdot da_1 \approx 67$  мм.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 50   |

Перевірка контактної міцності. Фактична швидкість ковзання:  $V_s = \pi \cdot d_1 \cdot n_1 / (60000 \cdot \cos(\gamma)) = 6,09$  м/с. Колова сила на колесі:  $F_{t2} = 2T_2/d_2 = 2 \cdot 562 / 0,250 = 4496$  Н. Розрахункове контактне напруження:

$$\sigma_H = ZM \cdot Z_A \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{(F_{t2} \cdot k_H \beta \cdot k_{HV}) / (b_2 \cdot d_2))} = 148 \text{ МПа.} \quad (3.6)$$

Умова міцності:  $\sigma_H = 148 \text{ МПа} < [\sigma]_H = 150 \text{ МПа}$  – виконується.

Перевірка на згин. Розрахункове напруження згину:  $\sigma_F < [\sigma]_F = 133,66$  МПа – міцність забезпечується. Перевірка на максимальне навантаження:  $\sigma_{Fmax} < [\sigma]_{Fmax} = 288 \text{ МПа}$  – виконується.

Зусилля у зачепленні: колова сила на колесі  $F_{t2} = 4496$  Н; радіальна сила  $F_r = F_{t2} \cdot \tan(\alpha) = 4496 \cdot \tan(20^\circ) = 1636$  Н; осьова сила на колесі  $F_{a2} = F_{t2} \cdot \tan(\gamma) = 4496 \cdot \tan(14,0^\circ) = 1121$  Н. ККД передачі  $\eta = 0,79$ .

Вибір матеріалу і геометричні параметри валу черв'яка. Вал черв'яка виготовляється заодно з черв'яком зі сталі 40Х. Мінімальний діаметр вала з умови кручення:

$$d_v = (16 \cdot T_1 / (\pi \cdot [\tau]))^{1/3}, \quad (3.7)$$

де  $[\tau] = 20$  МПа – допустиме напруження при крученні.

$d_v = (16 \cdot 28,4 / (\pi \cdot 20))^{1/3} = (455,6 / 62,8)^{1/3} = (7,25)^{1/3} = 1,94$  см = 19,4 мм. Приймаємо  $d_v = 25$  мм (стандартний ряд).

Проектний розрахунок вала черв'ячного колеса. Матеріал вала – сталь 45 (нормалізована). Мінімальний діаметр вала колеса:

$$\begin{aligned} d_{v2} &= (16 \cdot T_2 / (\pi \cdot [\tau]))^{1/3} = (16 \cdot 562 / (\pi \cdot 20))^{1/3} = \\ &= (9005)^{1/3} = 20,8 \rightarrow d_{v2} = 40 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Вибір підшипників. Для вала черв'яка вибираємо радіально-упорні кулькові підшипники (тип 36205,  $d = 25$  мм,  $D = 52$  мм,  $B = 15$  мм,  $C_r = 14,3$  кН), що сприймають одночасно радіальне та осьове навантаження від черв'ячної передачі. Для вала черв'ячного колеса – радіально-упорні кулькові підшипники (тип 36208,  $d = 40$  мм,  $D = 80$  мм,  $B = 18$  мм,  $C_r = 28,1$  кН).

Змащення передачі. Черв'ячна передача змащується маслом, що заливається в картер редуктора. Рівень масла повинен забезпечувати занурення черв'яка (нижньочерв'ячна передача) або черв'ячного колеса

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 51   |

(верхньочерв'ячна) на глибину 1–2 витки. Марка масла – І-Г-А-100 (ГОСТ 17479.4-87), що відповідає швидкості ковзання 5–8 м/с і забезпечує необхідний мастильний шар між бронзовим вінцем і сталевим черв'яком. Температура масла при роботі не повинна перевищувати 90 °С.

### 3.3 Розробка плану цеху

План складально-зварювального цеху розробляється відповідно до технологічного процесу виготовлення абсорбера, норм технологічного проектування машинобудівних підприємств і вимог санітарних норм для зварювального виробництва.

При розробленні плану цеху враховуються такі основні вимоги:

- Прямоточність виробничого процесу: розташування обладнання в послідовності технологічних операцій без зворотних переміщень деталей і вузлів;
- Мінімальна площа ділянки за умови дотримання нормованих відстаней між обладнанням і будівельними конструкціями;
- Можливість розширення виробництва без корінної перебудови планування;
- Зручність для обслуговування і ремонту обладнання;
- Відповідність вимогам охорони праці і протипожежної безпеки.

Нормовані відстані між обладнанням і будівельними елементами (ОНТП 14-93): між бічними сторонами верстатів – не менше 1,2 м; від тильної сторони верстата до стіни – не менше 1,0 м; від передньої сторони (робочої зони) верстата до проїзду – не менше 1,5 м; ширина пішохідних проходів між рядами обладнання – не менше 1,4 м; ширина проїздів для підйомно-транспортних засобів – не менше 3,0 м.

Склад обладнання на ділянці: листоправильна машина ПЛ-1; гільйотинні ножиці НГ-32; тривалкова вальцювальна машина ВГМ-40×6000; установка плазмового різання Selma УВІР-120; стенд для складання обичайок

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 52   |

з днищами (з пневматичними притисками); роликовий стенд РС-80 (вантажопідйомність 80 т) з флюсовою подушкою; зварювальна установка ESAB CaB 460 с; зварювальний трактор ESAB Versotrac (EWT 1000) (2 шт.); зварювальний пост РДЗ (2 шт.); мостовий кран вантажопідйомністю 100 т (2 шт.); гідравлічний випробувальний стенд.

Розрахунок виробничої площі ділянки виконується аналітичним методом на основі площ, зайнятих обладнанням, і нормованих відстаней [15]. Площа під обладнання (з урахуванням зони обслуговування) становить орієнтовно 800–900 м². З урахуванням проходів, проїздів (коефіцієнт 2,5–3,0) і допоміжних приміщень (склади, комора ВТК) загальна площа ділянки становить 2500–3000 м². Висота прольоту цеху – не менше 16 м (з урахуванням висоти апарата 35 м і підйому краном). Будівля – однопролітна або двопролітна зі сіткою колон 24×12 м або 30×12 м.

Розрахунок числа робочих місць і чисельності працівників. Кількість основних виробничих робітників розраховується на основі річної трудомісткості і дійсного річного фонду часу. Річна програма – 4 абсорбери (одиничне виробництво). Трудомісткість виготовлення одного апарата (зварювальні і складально-зварювальні роботи) – орієнтовно 1800 нормо-год. Дійсний річний фонд часу одного робітника при 40-годинному робочому тижні (ДФРЧ):  $\Phi_d = (365 - 114) \times 8 = 2008$  год (з урахуванням відпустки 24 дні). Явочна кількість основних робітників:  $R_{яв} = N_p \cdot T_{шт} / \Phi_d = 4 \cdot 1800 / 2008 = 3,6 \rightarrow$  приймаємо 4 основних робітника (зварники та складальники). З урахуванням допоміжних робітників (стропальники, слюсарі, контролери) – загальна чисельність персоналу ділянки 8–10 осіб.

Організація виробничого процесу в часі. Ділянка працює в одну зміну тривалістю 8 год (5-денний тиждень). Тривалість виробничого циклу виготовлення одного абсорбера – 3–4 місяці (з урахуванням тривалості термічних операцій, контрольних і випробувальних процедур). Максимальний обсяг незавершеного виробництва в цеху одночасно – 2–3 апарати на різних стадіях готовності.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 53   |

Організація складування і транспортування. Листовий прокат зберігається в закритому складі в горизонтальному положенні (пачками не більше 1 м заввишки). Зварювальні матеріали зберігаються в сухому приміщенні при температурі +15–25 °С і відносній вологості не більше 60 %. Флюс зберігається в закритих ємностях і прожарюється безпосередньо перед використанням. Готові вузли і апарати переміщуються мостовими кранами вантажопідйомністю 100 т.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 54   |

## 4 БЕЗПЕКА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці та небезпечних виробничих факторів

Складально-зварювальна дільниця виготовлення абсорбера є виробничим об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки технологічний процес пов'язаний з виконанням електродугових зварювальних операцій, роботою з важкими і великогабаритними конструкціями, а також з використанням зварювальних матеріалів, що містять сполуки хрому і марганцю. Умови праці на дільниці характеризуються комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, перелічених у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Небезпечні і шкідливі виробничі фактори зварювальної дільниці

| № | Фактор                                           | НД                 | Норматив                        | Захисний захід                                  |
|---|--------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 | Ураження електричним струмом ( $U_{xx}$ до 80 В) | НПАОП 0.00-1.29-10 | Клас IP21;<br>$R_3 \leq 4$ Ом   | Захисне заземлення, діелектричні мати           |
| 2 | УФ та ІЧ випромінювання зварювальної дуги        | ДСТУ EN 175        | Фільтр DIN 10–13                | Щиток зварника, захисні екрани                  |
| 3 | Зварювальний аерозоль ( $Mn$ , оксиди Fe, Cr)    | ДСН 3.3.6.042-99   | $Mn \leq 0,2$ мг/м <sup>3</sup> | Місцева витяжка $\geq 1500$ м <sup>3</sup> /год |
| 4 | Гази (CO, NO <sub>2</sub> , озон)                | ГОСТ 12.1.005      | $CO \leq 20$ мг/м <sup>3</sup>  | Приточно-витяжна вентиляція                     |
| 5 | Шум від обладнання                               | ДСН 3.3.6.037-99   | $\leq 80$ дБА                   | Навушники $SNR \geq 25$ дБ                      |
| 6 | Бризки розплавленого металу                      | НПАОП 28.0-1.01-09 | –                               | Костюм, краги, щиток                            |
| 7 | Пожежна безпека                                  | НАПБ А.01.001-2014 | Категорія Г                     | Вогнегасники, пісок                             |

## 4.2 Електробезпека

Електробезпека на зварювальній дільниці забезпечується відповідно до НПАОП 0.00-1.29-10 і ПУЕ-2017. Зварювальне обладнання підключається до мережі 380 В з глухозаземленою нейтраллю. Усі металеві корпуси зварювальних установок, джерел живлення і допоміжного обладнання заземлюються із опором  $R \leq 4 \text{ Ом}$  [16].

Розрахунок захисного заземлення. Для умов дільниці (питомий опір ґрунту  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) опір одиночного вертикального стержневого заземлювача ( $d = 16 \text{ мм}$ ,  $l = 3 \text{ м}$ ,  $t_0 = 0,7 \text{ м}$ ):

$$R_{\text{од}} = \rho / (2\pi \cdot l) \cdot [\ln(2l/d) + 0,5 \cdot \ln((4t+l)/(4t-l))], \quad (4.1)$$

де  $t = t_0 + l/2 = 2,2 \text{ м}$ . Підставляємо:  $R_{\text{од}} = 100 / (2\pi \cdot 3) \cdot [\ln(375) + 0,5 \cdot \ln(2,03)] = 5,305 \cdot (5,93 + 0,35) = 33,3 \text{ Ом}$ .

Необхідна кількість заземлювачів при  $R_n = 4 \text{ Ом}$  і коефіцієнті використання  $\eta = 0,72$ :  $n = R_{\text{од}} / (R_n \cdot \eta) = 33,3 / (4 \cdot 0,72) \approx 11,6 \rightarrow$  приймаємо  $n = 12$  стержнів.

Стержні розміщуються по периметру будівлі дільниці на відстані 5 м один від одного і з'єднуються між собою сталевією смугою  $40 \times 4 \text{ мм}$ . Фактичний опір заземлювального пристрою – 3,8 Ом, що задовольняє нормативну вимогу  $R \leq 4 \text{ Ом}$ .

Додаткові заходи електробезпеки: застосування зварювального обладнання класу захисту IP21; ізоляція зварювальних кабелів з перевіркою не рідше 1 разу на 3 місяці ( $R \geq 0,5 \text{ МОм}$ ); застосування пристроїв автоматичного відключення напруги холостого ходу при перервах у зварюванні; використання діелектричних матів і рукавичок на робочих місцях.

## 4.3 Виробнича санітарія

Вентиляція. Зварювальні аерозолі при зварюванні двошарової сталі 16ГС+08Х13 містять сполуки марганцю (ГДК  $0,2 \text{ мг/м}^3$ ), хрому

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 56   |

шестивалентного (ГДК 0,01 мг/м<sup>3</sup>) і оксиди заліза (ГДК 6 мг/м<sup>3</sup>). Особливу небезпеку становлять сполуки хрому при зварюванні корозійностійкого шару 08Х13. Питоме виділення шестивалентного хрому при зварюванні електродами ОЗЛ-6 досягає 0,15–0,30 мг/А·хв, що в десятки разів перевищує його ГДК. Тому для робіт із корозійностійким шаром обов'язкове застосування засобів місцевої витяжної вентиляції з безпосереднім відсмоктуванням від джерела.

Розрахунок необхідної продуктивності системи вентиляції. Загальна кількість шкідливих речовин, що виділяються при зварюванні всіх трьох зварювальних постів (витрата дроту по 1 кг/год кожен):  $G(\text{Mn}) = 3 \cdot 0,01 \cdot 1000 = 30$  г/год (питоме виділення марганцю ~10 г/кг дроту);  $G(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 3 \cdot 5 \cdot 1000 / 1000 = 15$  г/год;  $G(\text{Cr}^{6+}) = 0,5$  г/год (при зварюванні корозійностійкого шару 1 пост з 3). Необхідний повітрообмін для розбавлення марганцю до ГДК:

$$L = G \cdot 1000 / (q_{\text{доп}} - q_{\text{пр}}) = 30 \cdot 1000 / (0,2 - 0,06) = 30000 / 0,14 = 214\,300 \text{ м}^3/\text{год}.$$

де  $q_{\text{пр}} = 0,3 \cdot q_{\text{доп}} = 0,06$  мг/м<sup>3</sup> – концентрація в приточному повітрі. З урахуванням ефективності місцевої витяжки 90 % фактична потреба загальнообмінної вентиляції:  $L_{\text{зо}} = 0,10 \cdot 214\,300 = 21\,430$  м<sup>3</sup>/год. Це є основним лімітуючим розрахунком. Кратність повітрообміну цеху (об'єм ~15 000 м<sup>3</sup>):  $K = 21\,430 / 15\,000 \approx 1,4$  год<sup>-1</sup>. Проте нормами технологічного проектування зварювальних цехів вимагається  $K \geq 6$  год<sup>-1</sup>, тому продуктивність загальнообмінної вентиляції приймається:  $L_{\text{зо}} \geq 6 \cdot 15\,000 = 90\,000$  м<sup>3</sup>/год. Місцева витяжна вентиляція додатково забезпечує видалення 90 % аерозолу безпосередньо від зварювальних постів продуктивністю  $3 \cdot 1800 = 5400$  м<sup>3</sup>/год.

Освітлення. Для зварювально-складальних робіт (розряд зорових робіт III-в) нормована освітленість: від системи загального освітлення – 200 лк; від комбінованого – 500 лк (ДБН В.2.5-28:2018). На дільниці встановлені LED-світильники, що забезпечують загальне освітлення 300 лк. Кожне робоче місце зварника обладнується місцевим освітленням (люмінесцентна лампа).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 57   |

Мікроклімат. Температура повітря в холодний період – не менше 16 °С (ДСН 3.3.6.042-99). Дільниця обладнана системою опалення. Вологість повітря – 40–60 %. Швидкість руху повітря – 0,2–0,3 м/с.

#### 4.4 Пожежна безпека

Виробнича дільниця відноситься до категорії Г за пожежовибухонебезпекою (НАПБ А.01.001-2014) – виробництва, пов'язані з обробкою негорючих речовин у гарячому стані, що супроводжується виділенням іскор і полум'я [16]. Клас пожежної небезпеки приміщення – П-ПА (ПУЕ-2017).

Основними джерелами займання на дільниці є: іскри і краплі розплавленого металу при зварюванні; нагрітий метал виробів; короткі замикання в електричних мережах. Для захисту від іскор і бризок металу встановлюються металеві захисні екрани та негорючі завіси навколо зварювальних постів. У радіусі 5 м від кожного зварювального поста забороняється зберігання горючих матеріалів (дерев'яні дошки, тканини, мастильні матеріали). Зварювальні роботи в зоні зберігання горючих матеріалів допускаються тільки за нарядом-допуском після спеціального очищення зони і встановлення пожежних постів.

Первинні засоби пожежогасіння: порошкові вогнегасники ВП-9 – 2 шт. на кожні 400 м<sup>2</sup> площі; вуглекислотні вогнегасники ВВК-2 – 2 шт. (для зварювального обладнання); ящики з піском об'ємом 0,5 м<sup>3</sup> – 1 шт. на кожні 400 м<sup>2</sup>. Дільниця обладнана автоматичною пожежною сигналізацією з тепловими сповіщувачами типу ІП-103. Передбачено не менше двох евакуаційних виходів шириною не менше 1,0 м, позначених знаками безпеки згідно з ДСТУ ISO 7010.

Внутрішнє пожежогасіння. Цех обладнано внутрішнім пожежопроводом з пожежними кранами Ду 50 мм на кожні 2500 м<sup>2</sup> підлогової площі. Відстань від будь-якого місця в цеху до найближчого пожежного крана – не більше 30

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 58   |

м. Тиск у системі пожежопроводу підтримується не менше 0,1 МПа. Зовнішній пожежний водогін забезпечує витрату 30 л/с при пожежі.

#### 4.5 Засоби індивідуального захисту

Зварники і слюсарі-складальники на дільниці забезпечуються ЗІЗ відповідно до Наказу Мінсоцполітики № 629 від 29.11.2018:

- Щиток зварника зі світлофільтром класу DIN 10 (при Ізв до 200 А) і DIN 11–12 (при Ізв 200–400 А) – для захисту очей і обличчя від УФ і ІЧ випромінювання;
- Захисні окуляри ЗНГ – для зачищувальних і підготовчих операцій;
- Напівмаска фільтруюча з фільтрами класу Р3 (проти аерозолів) і А2 (проти органічних газів) – для захисту органів дихання при зварюванні корозійностійкого шару;
- Костюм брезентовий зварника з вогнестійким просоченням (ДСТУ EN ISO 11611);
- Рукавиці зварника (краги) зі шкіри ВС – для захисту рук від ІЧ випромінювання і бризок металу;
- Черевики шкіряні на нескрипучій підошві зі сталевим захисним носком (клас S3);
- Протишумові вкладиші або навушники з  $SNR \geq 25$  дБ – при рівні шуму понад 80 дБА.

Зварники допускаються до самостійної роботи тільки після: проходження первинного інструктажу; стажування на робочому місці 5–15 змін (залежно від складності); перевірки знань вимог безпеки і отримання посвідчення. Перевірка знань проводиться щорічно комісією підприємства. Зварники, що виконують зварювання посудин під тиском, повинні мати чинне посвідчення зварника відповідно до НПАОП 0.00-1.29-10.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 59   |

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз конструкції абсорбера і встановлено, що конструкція є достатньо технологічною для умов одиничного виробництва на спеціалізованому підприємстві завдяки значній протяжності поздовжніх і кільцевих швів, придатних для механізованого зварювання.

Виконано аналіз зварюваності матеріалів конструкції та встановлено, що сталь 16ГС має задовільну зварюваність (Секв = 0,29 %), а сталь 08Х13 — погану (Секв = 1,56 %) через схильність до мартенситного перетворення в зоні термічного впливу. Визначено необхідні заходи з термічного оброблення до та після зварювання.

Розроблено раціональний технологічний процес складання та зварювання, що передбачає заміну базового ручного дугового зварювання автоматичним зварюванням під флюсом для поздовжніх і кільцевих швів. Це дозволяє підвищити та забезпечити стабільно високу якість швів.

Обґрунтовано вибір зварювальних матеріалів і розраховано режими автоматичного зварювання під флюсом. Розроблено комплекс заходів із боротьби зі зварювальними деформаціями: попередній зворотний вигин, раціональна послідовність зварювання, жорстке закріплення в пристосуваннях, обертання виробу на роликовому стенді.

Розроблено систему технічного контролю якості передбачено порядок виправлення браку з повторним контролем.

У конструкторському розділі виконано компонування складально-зварювального обладнання з чотирма функціональними зонами.

Впровадження розробленого технологічного процесу порівняно з базовим дозволяє у 5...10 разів підвищити продуктивність зварювальних операцій, суттєво знизити матеріальні витрати та забезпечити стабільно високу якість зварних з'єднань посудини, що відповідає вимогам ОСТ 26-291-94 для посудин першої групи (тиск понад 5 МПа).

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 60   |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Торопчинова К. Л. Абсорбер // Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua> /Абсорбер (дата звернення: 15.05.2026).
2. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво зварних конструкцій» для студентів освітньої програми «Технології та устаткування зварювання» усіх форм навчання. / Укл.: А.О. Шумілов, О.Є. Капустян. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 78 с.
3. Марочник сталей і сплавів. Веб-сайт. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата звернення 17.05.2026р.)
4. В.М. Коперсак. Теорія процесів зварювання – 2. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні: Текст лекцій. Ел.видання. К., НТУУ «КПІ», 2011. – 252 с.
5. Биковський О.Г., Пінковський І.В. Довідник зварника. – Київ: Техніка, 2002. 334с.
6. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. Посібник. – Миколаїв: НУК, 2004. 225 с.
7. Гуменюк І.В., Іваськів О.Ф., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання. Київ: Грамота, 2007. 272 с.
8. Компактні зварювальні головки А6S для внутрішнього зварювання URL: [https://esab.com/us/nam\\_en/products-solutions/product/welding-automation/submerged-arc-welding/welding-heads/a6s-compact-welding-heads-for-internal-welding/](https://esab.com/us/nam_en/products-solutions/product/welding-automation/submerged-arc-welding/welding-heads/a6s-compact-welding-heads-for-internal-welding/) (дата звернення: 01.06.2026).
9. Зварювальний випрямляч Патон ВДМ-1202 П. URL: <https://patonweld.com.ua/svarochnye-transformatory-paton/mnogopostovoy-svarochnyy-vypriyatel-paton-vdm-1202p> (дата звернення: 06.06.2026).
10. ESAB Versotrac (EWT 1000). URL: [https://esab.com/us/nam\\_en/products-solutions/product/welding-](https://esab.com/us/nam_en/products-solutions/product/welding-)

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | КРБ.ЗТ - 87.00.00.000 ПЗ | Анк. |
|      |      |          |        |      |                          | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

звернення: 08.06.2026).

11. Кривов Г.О., Зворикін К.О. Виробництво зварних конструкцій : підручник для студентів вищих навчальних закладів. К.: КВІЦ, 2012. 896 с.

12. Нормативи часу на зварювальні роботи. Загальномашинобудівні нормативи. — М.: Економіка, 1988.

13. Карпаш М.О. Методи контролю стану робочих поверхонь: конспект лекцій/ М.О. Карпаш, А.В. Яворський. — Івано-Франківськ: Факел, 2007. — 228с.

14. Карпенко А.С. Проектування складально-зварювальної оснастки. Київ.: НТТУ «КПІ», 2010. 229 с.

15. Модернізація зварювальних цехів : навчальний посібник для самостійного виконання курсової роботи з дисципліни «Модернізація зварювальних цехів» / доп. та перероб. В. П. Маршуба, Б. В. Сітніков. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 114 с.

16. Косовічева Н.В. Охорона праці та безпечне виконання робіт при підготовці кваліфікованих робітників професій зварювального напрямку: навчальний посібник з охорони праці для підготовки кваліфікованих робітників зварювального виробництва. – Харків: НМЦ ПТО, 2021 – 80 с.