

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній рівень)

на тему: Вдосконалення технологічного процесу виготовлення  
корпусу обертового автоклавного реактора

Виконав: студент (ка) 4 курсу, групи МП

Спеціальності “Прикладна механіка” 131

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Віскуп В.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лазарюк В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Дячун А.Є.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Шанайда В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТ  
доц., к.т.н. Окіпний І.Б.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025\_\_ р.

## З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Віскупу Володимиру Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Вдосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу обертового автоклавного реактора

Керівник проекту (роботи) Лазарюк Валерій Володимирович, доцент, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «23» січня 2025 року № 4/7-44

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 20 червня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) технічні умови на виготовлення;  
річна програма випуску – 1000 шт.; базовий технологічний процес виготовлення виробу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Вступ. Аналітична частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)  
Установка термічного різання. Стенд для зварювання кільцевих швів. Стенд з роликоопорами.  
Послідовність операцій технологічного процесу. План зварювальної ділянки.

7. Дата видачі завдання «23» \_січня 2025 р.

[illegible]

Лазарюк В.В.

---

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: «Вдосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу обертового автоклавного реактора» включає 4 частини пояснювальної записки з об'ємом 64 аркушів формату А4 та графічної частини об'єму 4 аркуша із формату А1. Пояснювальна записка містить, зокрема такі частини, як аналітична, технологічна, конструкторська та з безпеки життєдіяльності та з основи охорони праці. Мета даної кваліфікаційної роботи бакалавра є підвищити якість зварних швів та операцій складання обичайки, а також покращити масоперенесення під час зварювання у техпроцесі виготовлення обертового автоклавного реактора.

Пояснювальна записка містить 19 рисунків, 7 таблиць, 17 сторінок додатків. У роботі використано 21 літературне джерело.

У даній роботі удосконалено технологічний процес складально-зварювальних операцій для корпусу обертового автоклавного реактора, також пропонуються технологічні операції складання і зварювання, дано обґрунтування способів зварювання, зварювальних матеріалів; підібрано вітчизняну газову захисну суміш, режими зварювальних операцій пораховано на струменеве перенесення металу, удосконалено технологічні підходи щодо складання та виконання зварювання, підібрано раціональне устаткування та оснащення підготовчих та зварювальних операцій, покращено заходи із безпеки життєдіяльності і охорони праці.

Ключові слова: АВТОКЛАВНИЙ РЕАКТОР, МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ, ГАЗОВА СУМІШ  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , СКЛАДАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

## ЗМІСТ

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                | 8  |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ                                                                 | 9  |
| 1.1 Опис конструкції зварного виробу.                                                | 9  |
| 1.2 Характеристика матеріалу зварного виробу                                         | 10 |
| 1.3 Технічні умови на виготовлення зварного виробу                                   | 13 |
| 1.3.1 Вимоги до матеріалів виробу та напівфабрикатів                                 | 13 |
| 1.3.2 Вимоги до шорсткості, геометричності форми та розмірів                         | 14 |
| 1.3.3 Вимоги до зварних з'єднань виробу                                              | 17 |
| 1.3.4 Вимоги до складання виробу                                                     | 18 |
| 1.3.5 Вимоги до якості виробу                                                        | 20 |
| 1.4 Методи виготовлення та складання обичайок                                        | 22 |
| 1.4 Аналіз базового технологічного процесу                                           | 25 |
| 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ                                                               | 27 |
| 2.1 Вибір та обґрунтування способу зварювання                                        | 27 |
| 2.2 Вибір зварювальних матеріалів                                                    | 31 |
| 2.3 Розрахунок режимів зварювання                                                    | 33 |
| 2.4 Вибір і обґрунтування зварювального устаткування                                 | 37 |
| 2.5 Вибір методу контролю якості                                                     | 43 |
| 2.6 Опис вибраного технологічного процесу виготовлення виробу                        | 45 |
| 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ                                                            | 48 |
| 3.1 Вибір центруючого пристосування для обичайок                                     | 48 |
| 3.2 Розрахунок роликового стенду                                                     | 49 |
| 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ                                     | 54 |
| 5.1 Аналіз потенційних шкідливостей на зварювальній ділянці. Заходи щодо їх зниження | 54 |
| 5.2 Вимоги до виробничого освітлення та його нормування                              | 58 |
| ВИСНОВКИ                                                                             | 61 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ                                                                     | 62 |



## ВСТУП

Зварювання є однією з ключових технологій, що широко застосовується у сучасному машинобудуванні. Його використання дає змогу зменшити витрати металу, скоротити обсяг ручної праці та оптимізувати виробничі процеси.

Зварювання виступає важливим чинником підвищення технологічного рівня виробництва, особливо під час виготовлення циліндричних апаратів, таких як резервуари, баки або автоклави, до яких висуваються високі вимоги щодо міцності та герметичності. Зварювання сталевих реакторів, що працюють під тиском зі стінками середньої товщини пов'язане з низкою технічних проблем: утворенням тріщин у зоні термічного впливу, залишковими напруженнями й деформаціями, труднощами контролю якості зварних швів. Складання таких циліндричних посудин вимагає ретельної підготовки зварювальних кромek та формування стиків необхідної точності. Крім того, важливо забезпечити високу хімічну та корозійну стійкість з'єднань.

Впровадження механізованих та автоматичних способів зварювання в процесі виготовлення обладнання значно підвищує продуктивність праці, забезпечує стабільну якість виробу та відкриває можливості для подальшої модернізації технології.

У рамках даної кваліфікаційної роботи розроблено технологічний процес виготовлення автоклавного реактора для приготування рідкого скла для виготовлення зварювальних електродів. В роботі наведено обґрунтування вибору методу зварювання, матеріалів і обладнання, розраховано режими зварювання, а також складено технологічний процес. Окрему увагу приділено заходам безпеки праці. Завершальною частиною є комплект технічної документації, що включає креслення і графічно-розрахункові матеріали, необхідні для впровадження проєкту у виробництво.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Опис конструкції зварного виробу

Автоклавний реактор використовується для підготовки рідкого скла у технологічному процесу виготовлення зварювальних електродів. Такий автоклав має переваги перед стаціонарним, оскільки швидше досягаються параметри силікатної суміші, її однорідність, зменшується ризик перегрівання, а також є меншими енергозатрати на даний процес, зокрема менша температура процесу розчинення. Загальний вигляд корпусу обертового автоклавного реактора представлено на рисунку 1.1.

Підготовка калієвого рідкого скла марки UKRSIL K30 в обертовому автоклаві здійснюється за температури 160–175 °С і тиску 1,0–1,2 МПа протягом 3,5–5 годин, при цьому барабан обертається зі швидкістю 1,5–3 об/хв, що забезпечує інтенсивний тепло- та масообмін, рівномірність складу і прискорене розчинення кварцового піску. Суміш складається із кварцу, калійного лугу КОН та води у співвідношенні твердого до рідини 1 : 3,5–4,5, при завантаженні 65–70% об'єму реактора.

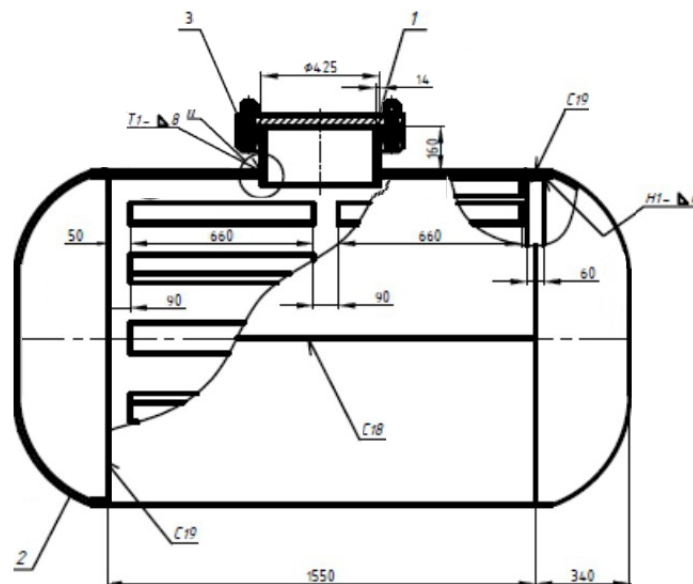


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд обертового автоклавного реактора



Даний реактор з діаметром 1000 мм та довжиною 2230 мм місткістю 3,4 м<sup>3</sup> використовується для приготування рідкого скла марки UKRSIL K30. Конструкція корпусу автоклавного реактора – є горизонтальною ємністю із середньою товщиною стінок 12 мм. Даний резервуар складається з циліндричної обичайки і двох еліпсоїдних донець 2 та завантажувального люка 3. Для забезпечення перемішування на внутрішній стороні реактора знаходяться планки ребер. Ємність виготовляється з теплостійких сталей 09Г2С, 16, 20, 20К. Вага конструкції 860 кг.

## 1.2 Характеристика матеріалу зварного виробу

Для виготовлення автоклавного реактора використовують маловуглецеві теплостійкі сталі, що можуть працювати у конструкціях під тиском. Для виготовлення даної ємності пропонується сталь P265GH, як європейський аналог сталі 20К. Сталь P265GH широко використовуються в Європі для виготовлення **посудин, що працюють під тиском**. Обидві сталі належать до низьколегованих сталей і призначені для експлуатації при температурах до 450 °С.

Хімічний склад цих марок має багато спільного. Вуглець у них міститься в межах приблизно до 0,20 %, що забезпечує хорошу міцність і зварюваність. Марганець у сталі 20К може бути дещо вищим, тоді як P265GH містить додаткові легуючі елементи, такі як хром, нікель та мідь, що покращує його механічні властивості і стійкість до корозії. Максимальні вмісти фосфору та сірки в обох марках досить низькі, що позитивно впливає на якість металу.

Щодо механічних властивостей, обидві сталі мають близькі характеристики. Межа плинності у P265GH, як правило, трохи вища і становить не менше 265 МПа для товщини прокату до 12 мм, у той час як у сталі 20К вона починається від 245 МПа. Міцність на розтягнення у 20К може бути дещо

ширшою за межі, однак загалом ці параметри досить схожі. Відносне подовження і ударна в'язкість обох марок приблизно однакові і відповідають вимогам для безпечної експлуатації у котлах і посудинах під тиском.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сталей P265GH (EN 10028-2) та 20K (ГОСТ 5520-79), %max, [1, 2]

| Елемент           | P265GH (максимум) | 20K (максимум) |
|-------------------|-------------------|----------------|
| Вуглець (C), %    | 0,22              | 0,20           |
| Кремній (Si), %   | 0,40              | 0,30           |
| Марганець (Mn), % | 1,10              | 1,20           |
| Фосфор (P), %     | ≤ 0,025           | ≤ 0,035        |
| Сірка (S), %      | ≤ 0,015           | ≤ 0,035        |
| Хром (Cr), %      | 0,30              | 0              |
| Молібден (Mo), %  | 0                 | 0              |
| Ванадій (V), %    | 0                 | 0              |
| Нікель (Ni), %    | 0,30              | 0              |
| Мідь (Cu), %      | 0,30              | 0              |
| Алюміній (Al), %  | ≤ 0,02            | —              |
| Азот (N), %       | ≤ 0,012           | —              |

Основною відмінністю є те, що марка P265GH відповідає сучасним європейським стандартам, що гарантують суворіший контроль якості, сертифікацію, а також рекомендації для зварювання і термічної обробки. Сталь 20K є радянським аналогом і, хоч і має близькі властивості, стандарти контролю якості в той час могли бути менш жорсткими.

Таблиця 1.2 - Механічні властивості сталей P265GH та 20K, [1, 2]

| Властивість                       | P265GH                         | 20K     |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------|
| Межа плинності, ReH (МПа)         | ≥ 265<br>(для товщини ≤ 16 мм) | ≥ 245   |
| Міцність на розтягнення, Rm (МПа) | 410–530                        | 410–590 |
| Відносне подовження, A (%)        | ≥ 22                           | ≥ 22    |
| Ударна в'язкість (при 20 °C)      | ≥ 27 Дж                        | ≥ 27 Дж |

Обидві марки застосовуються в подібних сферах — виготовленні котлів, теплообмінників та інших посудин під тиском. Однак P265GH має пере-

вагу завдяки більш точному складу та сучасним стандартам контролю, що робить її більш надійною для сучасних вимог промисловості.

Еквівалент вуглецю (CE, Carbon Equivalent) — це показник, який оцінює вплив легуючих елементів у сталі на її зварюваність та схильність до утворення тріщин. Один з найпоширеніших варіантів розрахунку CE запропонований Міжнародним інститутом зварювання (IIW, International Institute of Welding).

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (2.1)$$

де вміст у сталі легуючих компонентів беруть в максимальних мас. %.

Розрахунок еквіваленту вуглецю за максимальними значеннями вмісту елементів показує наступне:

$$P265GH: CE=0.22+0.1833+0.06+0.04=0.5033\approx 0.50,$$

$$20K: CE=0.20+0.20+0+0=0.40.$$

При максимальних вмістах елементів еквівалент вуглецю для P265GH складає близько 0,50, що свідчить про підвищену можливість утворення гартівних структур та відповідно, холодних тріщин, під час зварювання без застосування додаткових заходів (попередній нагрів, контроль тепловкладення тощо). Проте на практиці такі випадки малоімовірні за умови ретельного вхідного контролю. Проте перерахунок еквіваленту за середніми значеннями показує значення еквіваленту вуглецю для сталі P265GH приблизно 0,40, а для 20K — близько 0,33. Отже, можемо проводити зварювання даної сталі P265GH від компанії Метінвест без підігрівання за умови перевірки еквіваленту вуглецю для кожної партії.

### **1.3 Технічні умови на виготовлення зварного виробу**

Проектування та виготовлення автоклавного реактора повинні здійснюватися згідно вимог чинного законодавства та нормативних актів України [3-6] які пов'язані з безпекою експлуатації обладнання, що працює під тис-

ком, а саме: **Правилами охорони праці під час експлуатації** обладнання, що працює під тиском; Технічним регламентом безпеки обладнання, що працює під тиском, [5-6].

### **1.3.1 Вимоги до матеріалів виробу та напівфабрикатів**

Метали і напівфабрикати, що застосовуються при виготовленні та зварюванні обичайок та інших посудин, які працюють під тиском повинні враховувати положення ДСТУ-Н Б А.3.1-32:2015 «Настанова щодо монтажу та зварювання **посудин, що працюють під тиском**, при будівництві будівель та споруд», а також чинних галузевих і міжнародних стандартів, [3-6].

Матеріали, які застосовуються у технології реактора, повинні відповідати технічним умовам, мати сертифікати якості, забезпечувати надійне зварне з'єднання, відповідати вимогам зварюваності, механічної міцності та експлуатаційної надійності. Зокрема можна використовувати теплостійкі вуглецеві сталі при температурах до 450 °С, краще, щоб вуглецеві сталі відповідали умовам для сталей спокійної плавки. Сталь повинна мати: високу механічну міцність, стійкість до повзучості, низьку схильність до старіння, високу втомну міцність, структурну стабільність, гарантовану зварюваність.

Використовуються, як правило сталі, розроблені для роботи на підвищених температурах та тисках. Зазначені сталі повинні мати підтверджений хімічний склад з контрольованим вмістом вуглецю (до 0,22 %), марганцю (до 1,10 %), кремнію (до 0,40 %), фосфору (до 0,025 %) і сірки (до 0,015 %), що дозволяє досягати необхідного рівня зварюваності. Забороняється застосування металу з підвищеним вмістом шкідливих домішок або нестабільною структурою.

До напівфабрикатів (листів, труб, поковок) висуваються вимоги щодо геометричних допусків, чистоти поверхні (відсутність окалини, тріщин, забруднень), а також повної відповідності супровідній документації. Повинні бути надані сертифікати заводу-виробника, паспорти якості та дані про тер-

мообробку. Матеріали повинні проходити приймальний контроль за параметрами міцності: межа плинності — не менше 245 МПа для сталі 20К або 265 МПа для Р265GH, границя міцності на розтяг — 410 МПа, а також відносне подовження — не менше 22 %, ударна в'язкість — не менше 27 Дж/см<sup>2</sup> при температурі експлуатації.

Зварювальні матеріали повинні бути узгоджені з основним металом за хімічним складом і механічними властивостями. При використанні сталей з високим еквівалентом вуглецю ( $CE > 0,45$ ) обов'язковим є попередній підігрів та контроль тепловкладення. Зварювання повинно виконуватись за атестованими технологіями, а самі з'єднання — проходити неруйнівний контроль (ультразвуковий, радіографічний, візуальний).

Усі матеріали і напівфабрикати повинні мати супровідну документацію, яка підтверджує відповідність вимогам чинних стандартів, [3-6].

### **1.3.2 Вимоги до шорсткості, геометричності форми та розмірів**

Вимоги до якості поверхонь зварних з'єднань для теплообмінного устаткування в системах опалення регламентуються низкою нормативних документів, що встановлюють допуски на зазори, геометричні параметри швів, допустимі дефекти та шорсткість поверхні. Основна мета — забезпечити герметичність, міцність і довговічність зварної конструкції в умовах тиску та температури експлуатації.

Для стикових з'єднань, зокрема при зварюванні обечайок, допустимий зазор між кромками зазвичай становить від 1 до 3 мм — залежно від товщини металу, методу зварювання та типу підготовки кромок. У випадку, якщо товщина основного металу становить 4 мм, при з'єднанні без скосу кромок оптимальний зазор має бути в межах 1,0–1,5 мм для ручного дугового зварювання, або 0,5–1,0 мм — для TIG чи MIG/MAG. Кромки при цьому, як правило, не скошуються, лише злегка притуплюються, не більше ніж на 0,5

мм. Недостатній зазор може призвести до непровару, а надмірний — до провисання металу шва. Усі зазори перевіряються щупами перед зварюванням.

Для таврових з'єднань зазор між елементами не повинен перевищувати 2 мм для ручного дугового зварювання. При перевищенні цього значення необхідно здійснити механічне ущільнення деталей або використати компенсуючий валик, що небажано з технологічної точки зору.

Згідно з ДСТУ ISO 5817:2005, передбачено три рівні якості зварних швів: В (висока), С (середня), D (низька). Для теплообмінного обладнання в системах опалення, яке працює під тиском, зазвичай застосовується рівень В або С. Вимоги охоплюють: підрізи по краях шва — не більше 0,5 мм; перевищення або заниження посилення шва —  $\pm 1,5$  мм; непровар у корені — не допускається при наскрізному проварі; відхилення від прямолінійності шва — не більше 1 мм на 100 мм довжини; зміщення осей — до 10% товщини стінки, але не більше 2 мм.

Шорсткість поверхні зварного шва оцінюється за параметром Ra. Для зовнішніх швів теплообмінників допускається Ra не більше 40 мкм. Для внутрішніх швів, які контактують з теплоносієм, допускається шорсткість до 20 мкм.

Нормативними документами, що регулюють ці вимоги, є: ДСТУ EN ISO 5817:2022 — **з'єднання зварні плавленням, вимоги до якості**; ДСТУ EN ISO 9692-1:2014 **зварювання та споріднені процеси**, рекомендації щодо підготування зварних з'єднань; **ДСТУ EN ISO 6520 — 1:2015** класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах; **ДСТУ EN 13445 — 4:2015** виготовлення посудин, що працюють під тиском.

За основу для допусків обичайок приймаються вимоги стандартів  
ДСТУ EN 13445-4:2014

(Посудини, що працюють під тиском. Виготовлення), а також чинні виробничі технічні умови та креслення, затверджені під час проектування виробу. До їх геометричних параметрів висуваються підвищені вимоги щодо точності, оскільки відхилення можуть вплинути на монтаж, герметичність зварних з'єднань та рівномірність навантаження по стінці при тиску. Основні відхилення для таких обичайок регламентуються стандартами на виготовлення посудин, а також нормами технічного контролю.

Внутрішній або зовнішній діаметр обичайки має допуск  $\pm 1\%$ , але не більше  $\pm 5$  мм, для діаметра більше 1000 мм. Це відхилення допускається за умови, що форма обичайки залишається циліндричною, тобто не має локальних овальностей. Овальність обичайки — це різниця між найбільшим і найменшим діаметром, вимірним в одній поперечній площині, — не повинна перевищувати 1% від номінального діаметра.

Відхилення прямолінійності утворюючої поверхні не повинно перевищувати 2 мм на 1000 мм довжини обичайки. Якщо обичайка зварюється з декількох секторів або листів, окремо контролюється зсув крайок (еліптичність стиків), який не повинен перевищувати 1,5 мм. Висота зварного валика при збиранні обичайок не враховується при контролі основної геометрії, але після зварювання вона повинна відповідати рівню якості згідно з вимогами до з'єднань (зазвичай клас В або С за ДСТУ ISO 5817:2005).

Товщина стінки обичайки контролюється за нормами, прийнятими в конструкції — зазвичай допуск  $\pm 10\%$  для вуглецевих сталей, але не менше допустимої розрахункової товщини. Для обичайок, виготовлених методом вальцювання з листа, дозволяється розбіжність по довжині розгортки до  $\pm 3$  мм на 1000 мм. Це забезпечує точну підгонку при стиковці секцій та мінімізує зазори в місцях зварювання.

При контролі обичайок також перевіряється паралельність торців. Відхилення торців від перпендикулярності до осі обичайки допускається в межах 1 мм на кожні 100 мм діаметра.

Відносно локальних дефектів, то стандарт EN 12493 дозволяє дефекти типу вм'ятини, якщо їх глибина не перевищує 1 % довжини або 2 % ширини дефекту, за умови додаткових обґрунтувань

Ці вимоги відповідають EN 13445-4 та EN 12493, які прямо регламентують допуски виготовлення обичайок циліндричних посудин.

### **1.3.3 Вимоги до зварних з'єднань виробу**

Конструкція даного реактора має передбачати мінімальну кількість зварних швів. Не допускається розташування швів у зонах концентрації напруг чи згинальних моментів. Забороняються стикові з'єднання з неповним проваром, а також з'єднання внапусток. Конструкція має забезпечувати можливість проведення візуального та неруйнівного контролю. При різній товщині з'єднуваних елементів — осьовий зсув швів визначають за найбільшим значенням товщини. Відстань між зварним швом і отвором визначається за формулою:  $L=\sqrt{(D \cdot S)}$ , мм, де D — номінальний зовнішній діаметр елемента, мм; S — товщина матеріалу, мм.

Серед технологічних вимог відмітимо наступні. Зварювальні роботи дозволяються при температурі повітря не нижче 0 °С. Застосовуються лише стикові, кутові або таврові з'єднання при приєднанні фланців, патрубків та штуцерів. Зварювання виконується згідно з технічною документацією (WPS), розробленою для даного виробу.

Відсутність сертифікатів на матеріали обов'язково компенсується проведенням випробувань на заводі-виробнику. Посудини з робочим тиском понад 0,6 МПа підлягають державному нагляду як обладнання підвищеної небезпеки та мають проходити обов'язкову сертифікацію відповідно до законодавства України.



Для зварних швів дозволені тільки незначні поверхневі дефекти, які не знижують працездатність шва. Пористість допускається одинична або групова, але не більше 2% площі шва. Напливи, підрізи, кратери не допускаються при внутрішніх швах, можуть бути обмежено допустимими на зовнішніх, якщо не порушують геометрію. Тріщини, незаварені кратери, шлакові вclusions категорично заборонені. Вирви або вм'ятини можуть мати глибину не більше 0,5 мм при рівні якості В.

### 1.3.4 Вимоги до складання виробу

Складання теплообмінного обладнання є критичним етапом у виробництві, що безпосередньо впливає на його міцність, герметичність, стійкість до термічного навантаження та довговічність. До складання висуваються технічні вимоги, які стосуються точності збирання, контролю за зазорами, взаємного розміщення вузлів, підготовки до зварювання та монтажних припусків. Основні нормативні документи, що регламентують ці вимоги, — це ДСТУ Б EN 12952-5:2015, ДСТУ EN 13445-4:2015, а також технологічні інструкції підприємства-виробника.

Перед складанням усі деталі повинні пройти через вхідний контроль на відповідність розмірам, відсутність тріщин, вм'ятин, окалини, корозії, а також перевірку на правильність обробки торців, отворів і посадкових поверхонь. Особливу увагу приділяють якості обробки торців обичайок, штуцерів, днищ, оскільки від точності з'єднання залежить подальша якість зварного шва.

При збиранні обичайок і корпусів встановлюються допуски на зсув кромок, які не повинні перевищувати 10% товщини стінки, але **не більше 2 мм**. При складанні фланців або штуцерів важливо забезпечити співвісність їх отворів та відсутність перекосів, що можуть призвести до навантаження на зварний шов. Торці стикувальних елементів повинні бу-

ти строго перпендикулярними до осі збирання або мати нахил згідно з кресленням, з допустимим відхиленням не більше 1 мм на 100 мм діаметра.

Положення деталей при збиранні має відповідати проєктному кресленню. Штуцери та патрубки встановлюються з урахуванням допусків по координатах, зазвичай  $\pm 1-2$  мм. Допустиме зміщення отворів — **не більше 0,5** мм, а перекіс труб — не більше  $1^\circ$ .

Всі з'єднання мають бути попередньо прихоплені зварюванням, з мінімальними деформаціями. Прихватки повинні бути міцними, розміщуватись з інтервалом не більше 150–200 мм, а довжина кожної — **не менше 20** мм. Вони мають бути ретельно зачищені від шлаку і окалини, щоб не спричинити дефектів у зварному шві під час зварювання. Заборонено використання прихваток із порожнинами, тріщинами або обривами. Усі прихватки, що не увійдуть до складу шва, підлягають видаленню.

Температурний режим у приміщенні складання повинен відповідати вимогам технологічного процесу, зазвичай **не нижче  $+5^\circ\text{C}$**  для сталевих виробів. Вологість повітря контролюється, оскільки волога на поверхні може спричинити утворення пор у шві. Якщо збірка виконується на відкритому повітрі, необхідно забезпечити захист від дощу, снігу, конденсату, прямих сонячних променів, що можуть призвести до нерівномірного теплового розширення металу.

Усі параметри складання контролюються засобами вимірювання — лінійками, шаблонами, щупами, рівнями, індикаторами співвісності. В окремих випадках перед зварюванням проводиться контроль попереднього натягу, наприклад, у випадку установки труб у трубні решітки з розвальцюванням або натягом, для чого визначаються точні припуски на посадку.

Загалом процес складання котельного обладнання вимагає високої точності, узгодженості всіх операцій і суворого дотримання технічної докуме-

нтації. Його результат визначає якість, ресурс і безпечну експлуатацію обладнання під тиском.

### 1.3.5 Вимоги до якості виробу

Вимоги до якості теплообмінного устаткування, зокрема обладнання зі стінками товщиною 12 мм, визначаються його експлуатаційними умовами — роботою під тиском, при підвищених температурах, у контакті з водою або парою, а також вимогами безпеки. Основна мета контролю — виявлення дефектів виготовлення, які можуть призвести до витоків, руйнування або зниження ресурсу під час роботи. Устаткування з такою товщиною стінок належить до групи середньотонких корпусів, і до нього застосовуються методи неруйнівного контролю з урахуванням обмеженої глибини виявлення.

Для обладнання зі стінкою 12 мм застосовуються такі методи контролю: візуально-оптичний контроль (VT), ультразвуковий контроль (UT), капілярний метод (РТ), герметичність (гідравлічне випробування), а в окремих випадках — магнітопорошковий контроль (МТ).

Візуальний та вимірювальний контроль є базовим і проводиться на всіх етапах: після механічної обробки, складання, зварювання та очищення поверхні. При цьому перевіряється форма, лінійні розміри, правильність збирання, відсутність вм'ятин, тріщин, підрізів, напливів, неправильного розташування зварних швів. Застосовуються щупи, калібри, лінійки, лупи ( $\times 5$ – $\times 10$ ), лазерні рулетки та цифрові шаблони швів. Візуальний контроль обов'язково супроводжується перевіркою шорсткості зварних з'єднань у зонах, де це передбачено нормативами — шорсткість  $R_a$  **для внутрішніх поверхонь не повинна** перевищувати 20–40 мкм.

Для виявлення тріщин, пор, непровару або шлакових включень у зварних швах товщиною 12 мм найефективнішим є капілярний контроль. Він застосовується переважно для виявлення дефектів, що виходять на поверхню, або мають мікротріщини на межі основного металу та шва. Процес включає

нанесення проникаючої рідини, очищення та проявлення індикатором. Метод зручний тим, що не потребує складного обладнання і добре підходить для тонкостінних виробів.

Ультразвуковий контроль може застосовуватись за товщини 12 мм, однак вимагає застосування спеціальних щупів із короткою фокусною відстанню. Він дає змогу виявляти внутрішні дефекти — несплавлення, шлакові вclusions, великі порожнини — але його ефективність для такої товщини обмежена. Зазвичай він застосовується точково або на ділянках, де зварний шов має підвищене значення для міцності всієї конструкції (наприклад, стики днища та обичайки).

Магнітопорошковий контроль застосовується лише для феромагнітних сталей, і є ефективним при товщині від 3 мм і вище. Він дозволяє виявити тріщини або зосередження напруги біля зони шва, що не проявляються візуально. Однак при складній формі поверхні або на ділянках з нестабільним намагнічуванням результат може бути неоднозначним.

Гідравлічне випробування — обов'язковий етап контролю якості після зварювання й термообробки. Для теплообмінного устаткування зі стінкою 4 мм тиск випробування, як правило, становить 1,3–1,5 від робочого, тривалістю **не менше 10 хв**. Обладнання вважається придатним, якщо відсутні витіки, падіння тиску та видимі деформації. При виявленні зволоження на швах проводиться локалізація витіку, виправлення і повторне випробування.

Усі результати контролю фіксуються в технічному паспорті виробу. Якщо обладнання підлягає реєстрації в органах технічного нагляду, до нього додається акт про відповідність, де зазначені методи і обсяг контролю.

#### **1.4 Методи виготовлення та складання обичайок**

При виборі методів виготовлення та складання обичайок враховують товщину зварюваного металу. Розрізняють тонколистові, середньо та товстолістові обичайки циліндричних посудин.

Обичайки циліндричних посудин класифікують за товщиною стінки на тонколистові, середньolistові та товстolistові. До тонколистових належать обичайки товщиною до 4–6 мм, які легко гнуться та зварюються без значних підготовчих операцій; їх зазвичай використовують у баках низького тиску або харчовому обладнанні. Середньolistовими вважають обичайки з товщиною 6–40 мм — вони потребують жорсткішої фіксації під час збирання, потужніших вальців, а також точного дотримання параметрів стикування. Такі обичайки широко застосовують у резервуарах, автоклавах, апаратах середнього тиску. Товстolistові обичайки (понад 40 мм) формують на спеціалізованих вальцях, іноді з підігрівом; при зварюванні використовують складні багатопрохідні технології, додаткову механічну обробку крайок та суворий контроль за зазорами. Вони призначені для посудин, що працюють під високим тиском, наприклад у хімічній, енергетичній чи нафтогазовій галузях.

Для виготовлення обичайки з листа товщиною 12 мм застосовують три- або чотиривалкові вальцювальні машини. Перед згинанням кромку листа обробляють для зварювання, після чого лист встановлюють на вальці. Один з валків (зазвичай центральний нижній) приводиться в обертання і затягує лист між собою та верхнім валком. Верхній валок регулює ступінь прогину аркуша, а бічні (на три- або чотиривалкових машинах) сприяють формуванню рівномірного радіуса згину.

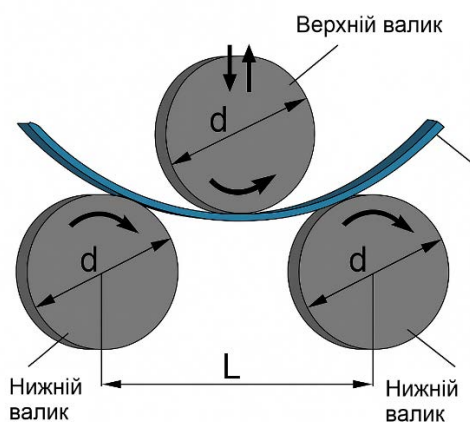
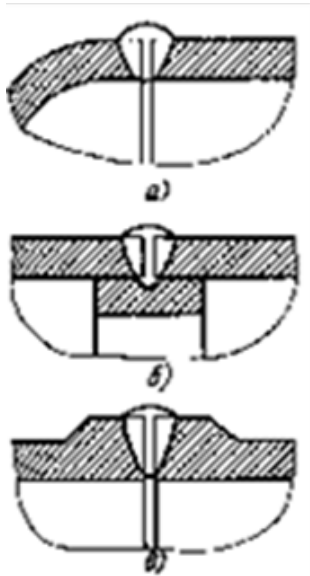


Рисунок 1.2 - Формування обичайки на вальцях

Згинання виконують поступово, з кількома проходами, щоб уникнути надмірного внутрішнього напруження або розтріскування. Після формування обичайки торці вирівнюють і з'єднують у замкнений циліндр. Для точного стикування крайок застосовують спеціальні пристрої, наприклад, центратори, струбцини, гвинтові стяжки або прихватки.



такому шві, і може високим вмістом основного металу зварюваного з'єд- шва (рис. 1.3, в), що виготовлення.

Стикові зварні з'єднання є характерними для таких зварних циліндричних конструкцій. Для з'єднання деталей корпусу реактори для підготовки рідкого скла використовуються поздовжні та кільцеві шви.

Повного проплавлення складно досягти у з'єднаннях без підкладки (рис. 1.3, а). Використання підкладки, що залишається, є виходом для проплавлення, але при певній простоті є концентратором напружень у

Рисунок 1.3 –

Стикові з'єднання обичайок

бути використане у сталях з не- вуглецю (рис. 1.3, б). Розміцнен- лу компенсують потовщенням нання у певному місці зварного певним чином ускладнює процес

Під час зварювання подовжніх швів обичайок циліндричних посудин унаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження металу виникають зварювальні деформації — це викривлення, овальність або звуження циліндричної форми. Для їх усунення або зменшення застосовують кілька методів. Найчастіше використовують механічне правлення — обкатування на вальцях або розширення внутрішнім розпором. Обкатування дозволяє відновити геометрію обичайки, вирівнюючи зовнішню поверхню після зварювання. Розпирання здійснюється шляхом установлення всередину обичайки гвинтово-

го, гідравлічного або клинового пристрою, який рівномірно тисне на внутрішню поверхню й відновлює круглу форму. Також використовують прокатування роликом кромки саме перед дугою.

У разі значних деформацій застосовують нагрів із наступним правленням або часткове фрезерування/обрізку стиків із подальшим повторним збиранням. Також для зменшення деформацій попередньо застосовують симетричне зварювання з протилежних боків у кілька проходів або використовують технологічні обмежувачі (наприклад, шаблони, оправки, розпірки) під час збирання.

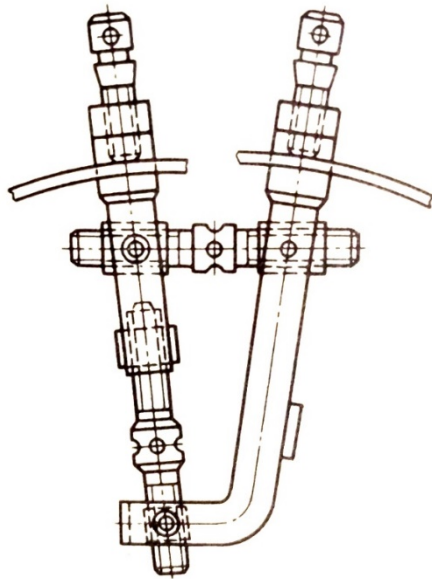


Рисунок 1.4 – Гвинтова стягуюча струбцина

При збиранні в замкнене кільце обичайку фіксують у потрібному положенні, а потім поступово притягують кромки, починаючи з центру шва й рухаючись до країв. Якщо обичайка вже має початкове викривлення після згинання, її тимчасово розпирають зсередини дерев'яними або металевими розпірками, а потім виконують стягування. Для надійності часто застосовують прихватки — короткі зварні точки з кроком 150–300 мм, які фіксують кромки до основного зварювання. Усі дії проводяться з контролем зазору, симетрії та геометрії стику.

Для середньолистових обичайок із товщиною стінки 6–16 мм, які мають достатню жорсткість, стягування кромки перед зварюванням виконується з метою забезпечення точного стику та мінімального зазору між крайками. Ця операція дозволяє уникнути дефектів у зварному шві та зменшити деформації після зварювання.

Найчастіше стягування здійснюється за допомогою: гвинтових або ексцентрикових стяжок, які встановлюють по всій довжині стику на певному кроці (наприклад, 300–500 мм); струбцин (рис. 1.4) або затискних хомутів,

що забезпечують локальне зусилля притискання кромek; внутрішніх чи зовнішніх центраторів — пристроїв, що водночас центрують обичайку по осі та забезпечують стягування стику.

### **1.5 Аналіз базового технологічного процесу**

У базовому базовому варіанті технології використовувалося механізоване зварювання у середовищі вуглекисного газу. Але цей спосіб ефективний у випадках дрібносерійного виробництва і досить трудомісткий та має значні відходи на розбризкування електродного металу. Аналіз такого процесу виявив невисоку продуктивність, велику трудомісткість та високу безпеку для праці працівників, необхідність застосування зварників та монтажників з високою кваліфікацією, значний об'єм роботи із зачистки поверхні та виправлення дефектів.

Для високоефективного сучасного виробництва доцільно використовувати вищий рівень автоматизації базових процесів зварювання та монтажу. Найкраще це проводити на установках на одному місці з метою уникнення переміщень великогабаритних деталей теплообмінного устаткування. Тому доцільно використовувати автоматичне зварювання в активних газових сумішах аргону та вуглекисного газу, що дозволить підвищити стабільність якості самого процесу зварювання та забезпечить необхідні якісні параметри зварного шва.

Тому задачами даної роботи для впровадження серійного виробництва автоклавних реакторів буде необхідність обґрунтування механізованого способу зварювання, підбір зварювальних матеріалів та газів, розрахунок режимів зварювання, розроблення технологічних операцій виготовлення автоклавного реактора із зварювання та складання, пропонування необхідних методів контролю.



## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Вибір та обґрунтування способу зварювання

Серед розповсюджених способів дугового зварювання сталі Р265GH, яка є конструкційною, вуглецевою, котельною сталлю з добрими зварювальними властивостями, розглядаються ручне дугове зварювання покритими електродами (РДЗ), зварювання під флюсом (ЗПФ), напівавтоматичне зварювання у середовищі вуглекислого газу (MAG-CO<sub>2</sub>), а також зварювання у середовищі активної суміші вуглекислого газу та аргону (MAG-Ar+CO<sub>2</sub>). Кожен з цих способів має свої переваги і обмеження залежно від умов виконання, просторового положення шва, товщини металу та вимог до якості зварного з'єднання.

Ручне електродугове зварювання (РДЗ) є досить універсальним способом зварювання. Його головна перевага полягає в можливості виконання зварювання у будь-якому просторовому положенні, що особливо важливо при збиранні конструкцій та проведенні ремонтних робіт, (рис.2.1). Проте метод має обмежену продуктивність, значні втрати електродного металу через огарки та розбризкування, а також вимагає значних трудозатрат. Якість шва при РДЗ сильно залежить від кваліфікації зварника. Цей спосіб доцільно застосовувати для прихваток під час складання, або у важкодоступних місцях, де інші методи зварювання недоступні.

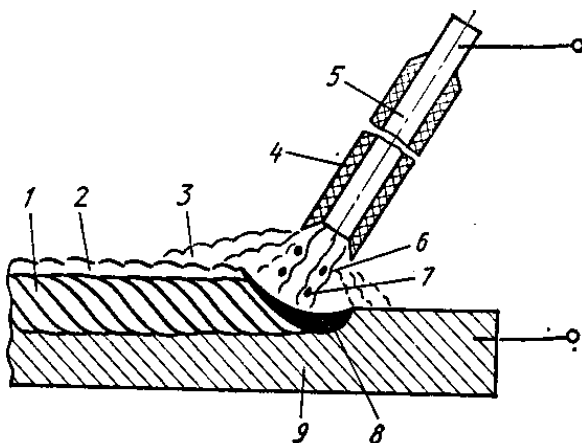


Рисунок 2.1 - Схема ручного дугового зварювання металевим покритим електродом: 1 – шов; 2 – шлак; 3 – захисна газова атмосфера; 4 – електродне покриття; 5 – електрод; 6 – електрична дуга; 7 – краплі електродного металу; 8 – зварювальна ванна; 9 – заготовка

Електродугове варювання під флюсом (З ПФ) забезпечує найвищу продуктивність з усіх розглянутих способів, що зумовлено високим рівнем механізації, глибоким проплавленням і мінімальними втратами присадного металу, рисунок 2.2. Важливою перевагою є також надійний захист зони зварювання розплавленим шлаком, що забезпечує стабільну якість шва та знижує чутливість до впливу атмосферного кисню та азоту. Однак цей метод обмежений по просторовому положенню: якісне зварювання можливе лише в нижньому або наближеному до нього положеннях. Також він потребує ретельної підготовки кромки і автоматизованого обладнання.

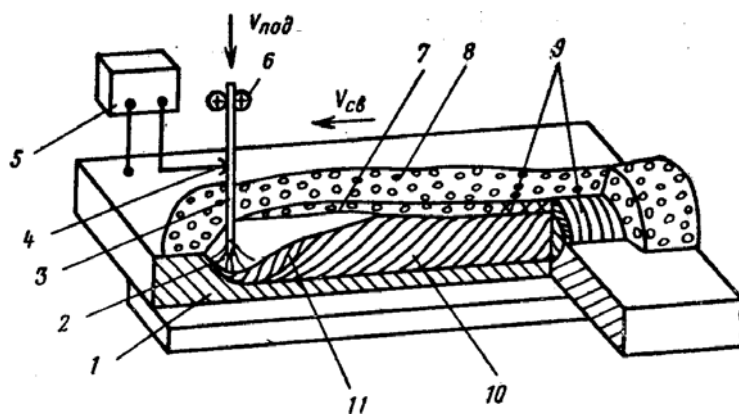


Рисунок 2.2 - Схема зварювання під флюсом:

1 - метал, що зварюється; 2 - дуга; 3 - електродний дріт; 4 – струмопід-вод; 5 - джерело струму; 6 - ролик, що подає; 7 – розплавлений шлак; 8 - флюс; 9 – шлак; 10 - метал шва; 11 - метал зварювальної ванни

Електродугове зварювання у активному вуглекислому газі (MAG-CO<sub>2</sub>) є проміжним між ручним зварюванням і повною автоматизацією, рисунок 2.3. У середовищі CO<sub>2</sub> можна виконувати як напівавтоматичне, так і автоматичне зварювання плавким дротом. Даний метод має хорошу продуктивність, дає змогу знизити витрати металу за рахунок відсутності огарків, не вимагає частого перезапуску (як у РДЗ), а також забезпечує задовільну якість шва без шлакової кірки. Проте чистий CO<sub>2</sub> має високу окиснювальну активність, що може призводити до утворення пор, та надмірних витрат електрод-

ного дроту на розбризкування та збільшення зносу контактних наконечників.

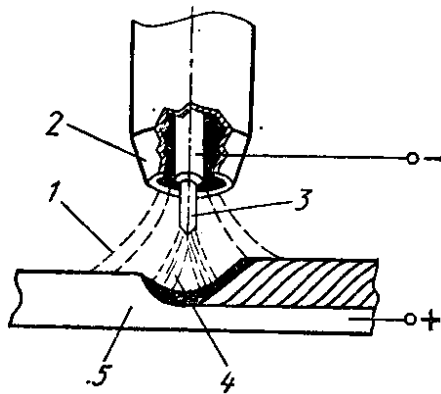


Рисунок 2.3 - Схема дугового зварювання в атмосфері захисних газів:  
1 – потік газу; 2 – сопло; 3 – електрод (дріт); 4 – зварювальна дуга; 5 – заготовка

Автоматичне зварювання у суміші вуглекислого газу з аргоном (MAG- $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ) є технологічно найбільш збалансованим і рекомендованим для зварювання сталі P265GH товщиною 12 мм. Зазвичай використовується суміш, що містить 80% аргону та 20%  $\text{CO}_2$ , хоча співвідношення може варіюватися залежно від завдань. Аргон, як інертний газ, знижує окислення зони шва, стабілізує дугу, зменшує затрати енергії, тоді як  $\text{CO}_2$  забезпечує достатнє проплавлення і знижує вартість захисного середовища. Завдяки цьому досягається якісний, рівний шов з низькою кількістю пор та розбризкування. Цей спосіб підходить для механізованого зварювання поздовжніх та кільцевих стиків, має високу продуктивність та ефективність, дає змогу зварювати у різних положеннях порівняно з ЗПФ, але потребує якісного обладнання з належним налаштуванням подачі дроту, струму та складу суміші.

Для оцінки формування властивостей зварного з'єднання важливо оцінити вплив кожного способу зварювання на геометрію шва, глибину проплавлення, рівень внутрішніх напружень, схильність до утворення тріщин, пористості та якість зони термічного впливу (ЗТВ).

РДЗ забезпечує задовільну якість шва, однак сильно залежить від кваліфікації зварника. Температурний режим змінний, що може призводити до

нерівномірної структури ЗТВ та локальних перегрівів. Метал шва зазвичай має підвищену кількість включень та порівняно більшу пористість, особливо при недотриманні режимів сушіння електродів. Через часте багатопрохідне зварювання утворюються високі залишкові напруження, які можуть вимагати подальшого термічного оброблення.

При ЗПФ формується шов з високою щільністю, низьким рівнем пористості, мінімальним вмістом неметалевих включень та добре сформованою ЗТВ. Проплавлення стабільне й глибоке, шов має плавний перехід у основний метал. Завдяки шлаковому захисту та високій температурі зварювальної ванни утворюється рівномірна структура металу шва. Ризик гарячих тріщин мінімальний. Проте через обмеженість положень зварювання з'являються обмеження для деяких типів з'єднань.

Зварювання у вуглекислому газі (MAG-CO<sub>2</sub>) дає задовільне проплавлення та хорошу продуктивність, однак при недостатньому налаштуванні параметрів дуги може спостерігатися підвищене розбризкування, пористість та перегрів металу шва. Через окиснювальну атмосферу CO<sub>2</sub> можливе утворення оксидних включень у шві, що дещо знижує пластичність і ударну в'язкість з'єднання. У ЗТВ інколи фіксується **грубіша структура порівняно зі** зварюванням під флюсом чи в суміші газів.

Зварювання у захисній суміші аргону (Ar) та вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) формує найбільш стабільну структуру металу шва серед розглянутих механізованих методів. Завдяки менш окислювальному середовищу, ніж у чистому CO<sub>2</sub>, зменшується кількість неметалевих включень та оксидів та тримає пластичність та тріщиностійкість з'єднання на високому рівні. Шов має меншу пористість, рівномірну структуру та більш плавні переходи до основного металу. ЗТВ залишається відносно вузькою, що знижує ймовірність виникнення значних залишкових напружень. У сукупності це забезпечує необхідну якість з'єднання та високі механічні властивості.

У випадку автоклавного реактора доцільно використовувати саме механізоване зварювання у суміші  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ , зокрема для стикових та таврових з'єднань обичайок та днищ. Воно забезпечує оптимальний баланс між якістю, продуктивністю і вартості, а також краще підходить до умов серійного або дрібносерійного виробництва, де важлива стабільність процесу. Це зменшує трудомісткість зварювальних операцій, мінімізувати дефекти і забезпечити відповідність швів вимогам нормативних документів до ємностей під тиском.

## 2.2 Вибір зварювальних матеріалів

Для зварювання у середовищі активного вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) використовуються зварювальні матеріали з легуючими добавками кремнію та марганцю. При цьому зварювальна ванна перебуває в умовах активного кисневого середовища, яке утворюється внаслідок термічного розкладу  $\text{CO}_2$  в зоні дуги. Це середовище інтенсивно окиснює розплавлений метал, що може призводити до утворення пор, включень, зниження міцності та в'язкості зварного шва.

Марганець у складі дроту виконує розкислювальну функцію: зв'язує кисень, що потрапляє у зварювальну ванну, утворюючи стійкі неметалеві оксиди, які перетворюються у шлак. Також марганець зв'язує сірку, зменшуючи ймовірність гарячих тріщин, і підвищує міцність металу шва. Кремній, у свою чергу, також виконує функцію розкислювача, утворюючи оксид кремнію, який виводиться на поверхню шва у складі шлакових включень. Додатково кремній сприяє формуванню гладкої поверхні шва, покращує змочування країв і підвищує плинність металу в зварювальній ванні, що особливо важливо при струменевому перенесенні металу. Зварювальні дроти марок Св-08Г2С, Св-08ГС, Св-10Г2 рекомендуються для зварювання у середовищі з вуглекислим газом. Для механізованого зварювання рекомендують використовувати зварювальний дріт Св-08Г2С, таблиця 2.1.

Таблиця 2.1. Хімічний склад зварювального дроту Св-08Г2С у %.

| Марка дроту | C         | Si       | Cr  | Ni  | Mn      | S (не більше) | P (не більше) |
|-------------|-----------|----------|-----|-----|---------|---------------|---------------|
| Св-08Г2С    | 0,05-0,11 | 0,7-0,95 | <20 | <25 | 1,8-2,1 | 0,025         | 0,03          |

При застосуванні дроту Св-08Г2С, напроти Св-08, утворюється наплавлений метал із підвищеним вмістом марганцю (понад 1,4%) та кремнію (близько 0,8–1%), що забезпечує інтенсивне розкислення розплаву. Завдяки цьому зменшується кількість пор, уловлюються неметалеві включення, покращується структура зварного металу. Наплавлений шов має підвищену в'язкість, кращу стійкість до утворення гарячих і холодних тріщин, а також стабільні механічні властивості по всій довжині з'єднання. Крім того, дуга під час зварювання є стабільною а процес супроводжується меншим розбрикуванням, а шов має рівну поверхню з добрим змочуванням кромки.

Використання дроту марки Св-08Г2С у поєднанні з механізованим зварюванням у газовому середовищі  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  дозволяє підвищити продуктивність. Для механізованого зварювання сталі марки P265GH товщиною 12 мм у середовищі  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  розглядалися кілька варіантів захисних газів типу CORGON®, [7]. Комбінація дроту Св-08Г2С із сумішшю CORGON® 5S2 (93 %  $\text{Ar}$  + 5 %  $\text{CO}_2$  + 2 %  $\text{O}_2$ ) показує добрі результати, зокрема кращу змочуваність і зниження ризику пористості шва завдяки наявності кисню в складі. Водночас така суміш потребує чіткішого регулювання параметрів струму та швидкості подачі, оскільки додатково активізує окисні процеси в зоні дуги. Перевагу надано суміші CORGON® 18 (82 %  $\text{Ar}$  + 18 %  $\text{CO}_2$ ), типу ISO 14175 M21, яка дає глибше проплавлення.

## 2.3 Розрахунок режимів зварювання

Стикове зварне з'єднання для поздовжніх та кільцевих швів запропоновано виконувати з V-подібним обробленням. Товщина зварюваного металу 12 мм. Зварювання першого проходу виконуємо електродним дротом  $d_e = 1,6$  мм; щільність струму в електроді приймаємо  $i = 160$  А/мм<sup>2</sup>, враховуючи, що зварювання проводиться у суміші Ar+CO<sub>2</sub>.

Приведемо розрахунки параметрів режиму зварювання у встановлених літературою означеннями, [8-12].

$$I_{зв} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot i$$

$$I_{зв} = \frac{3,14 \cdot 1,6^2}{4} \cdot 160 = 322 \text{ А}$$

$$U_{\partial} = 20 + \frac{0,05 \cdot I_{зв}}{d_e^{0,5}} - 1$$

$$U_{\partial} = 20 + \frac{0,05 \cdot 322}{1,6^{0,5}} - 1 = 33 \text{ В}$$

$$V_{зв} = \frac{A}{I_{зв}}$$

$$V_{зв} = \frac{9 \cdot 1000}{322 \cdot 36} = 0,78 \text{ см/с}$$

$$A \cdot 10^3 = 9 \text{ м/год}$$

$q_n$ : - погонна енергія електричної дуги,

$$q_n = \frac{0,24 \cdot I_{зв} \cdot U_{\partial} \cdot \eta_i}{V_{зв}}$$

$\eta_i = 0,72$  к.к.д. для зварювання в Ar+CO<sub>2</sub>

$$q_n = \frac{0,24 \cdot 322 \cdot 33 \cdot 0,72}{0,78} = 2354 \text{ кал/см}$$

Глибина провару  $H$ :

$$H = A \sqrt{\frac{q_n}{\psi}}$$

$A = 0,0165$  для зварювання в  $\text{Ar}+\text{CO}_2$

$\psi$  - коефіцієнт форми провару, обумовлений по формулі:

$$\psi = k_2(19 - 0,01 \cdot I_{36}) \cdot \frac{d_e \cdot U_d}{I_{36}}$$

$k_2 = 0,92$  для постійного струму **зворотньої полярності**), [12].

$$\psi = 0,92(19 - 0,01 \cdot 322) \cdot \frac{1,6 \cdot 33}{322} = 1,5$$

$$H = 0,0165 \sqrt{\frac{2354}{1,5}} = 0,53 \text{ см}$$

Ширина шва:

$$e = H \cdot \psi = 0,53 \cdot 1,5 = 0,795 \text{ см}$$

Площа напл. металу за один прохід:

$$F_{H_1} = \frac{\alpha_n \cdot I_{36}}{3600 \cdot \gamma \cdot V_{36}}$$

$\alpha_n = 10 \text{ г/(А·год)}$ , [12].

$$F_{H_1} = \frac{10 \cdot 322}{3600 \cdot 0,78} = 1,15 \text{ см}^2$$

Висоту валика  $g$ :

$$g = \sqrt{\frac{F_{H_1}}{0,73 \cdot \psi}} = \sqrt{\frac{1,15}{0,73 \cdot 1,5}} = 1,02 \text{ см}$$

**Загальна висота валика  $c$ :**

$$c = H + g$$

$$c = 0,53 + 1,02 = 1,55 \text{ см}$$

Висоту заповнення оброблення наплавленим металом:

$$g'' = \sqrt{\frac{F_{H_1} - c \cdot b}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}}$$



$$g'' = \sqrt{\frac{1,15 - 1,55 \cdot 0}{\operatorname{tg} \frac{50}{2}}} = 1,57 \text{ см}$$

**Площа поперечного перерізу шва:**

$$F_H = (\delta - a)^2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + (\delta - b)$$

де  $\delta$  – товщина зварювальних кромок, мм;

$a$  – притуплення зварного шву, мм;

$b$  – зазор з'єднання, мм.

$$F_H = (12 - 2)^2 \cdot 0,4663 + (12 - 3) = 55,6 \text{ мм}^2$$

**Остаточна ширина шва:**

$$e_{mp} = b + 2 \cdot (\delta - a) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot 2,5$$

$$e_{mp} = 0 + 2 \cdot (12 - 2) \cdot \operatorname{tg} \frac{50}{2} + 2 \cdot 2,5 = 14,3 \text{ мм}$$

**Площа поперечного перерізу валика посилення шва:**

$$F_{в.мр} = 0,73 \frac{e_{mp}^2}{\psi_y}$$

$$F_{в.мр} = 0,73 \cdot \frac{14,3^2}{10} = 14,9 \text{ мм}^2$$

**Загальна площа наплавленого металу**

$$F_H = 55,6 + 14,9 = 70,5 \text{ мм}^2$$

**Площа поперечного перерізу металу яка мала би бути наплавлена наступним проходами:**

$$F'_H = F_H - F_{H1} = 70,5 - 11,5 - 88,0 = 59 \text{ мм}^2$$

При автоматичному зварюванні в захисних газах площа поперечного перерізу наплавленого металу за один прохід звичайно складає 70...80 мм<sup>2</sup>, але може досягати і 100 мм<sup>2</sup>. Тому мається можливість заварити оброблення, що залишилося після першого проходу, за один прохід.

**Приймаємо для другого проходу**  $d_e = 1,6 \text{ мм}$  та  $i = 180 \text{ А/мм}^2$ .

$$I_{36} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot i$$

$$I_{36} = \frac{3,14 \cdot 1,6^2}{4} \cdot 180 = 360 \text{ A}$$

**Необхідна площа наплавленого металу**  $F'_H = 59 \text{ мм}^2$

$$V_{36} = \frac{\alpha_H \cdot I_{36}}{3600 \cdot \gamma \cdot F'_H}$$

$$\alpha_H = 10 \text{ г/(А год)}$$

$$V_{36} = \frac{10 \cdot 362}{3600 \cdot 7,8 \cdot 83,72} = 1,54 \text{ см/с}$$

$$U_\partial = 20 + \frac{0,05 \cdot I_{36}}{d_e^{0,5}} \pm 1$$

$$U_\partial = 20 + \frac{0,05 \cdot 362}{1,6^{0,5}} \pm 1 = 33 \text{ В}$$

$$q = 0,24 \cdot I_{36} \cdot U_\partial \cdot \eta_u$$

$$q = 0,24 \cdot 362 \cdot 33 \cdot 0,65 = 2314 \text{ кал/с}$$

**Глибина провару безкосого стикового з'єднання**

$$H = 0,0156 \sqrt{\frac{q}{\psi \cdot V_{36}}}$$

$$H = 0,0156 \sqrt{\frac{2314}{2,3 \cdot 1,54}} = 0,43 \text{ см}$$

$$\psi = k_2 (19 - 0,01 \cdot I_{36}) \cdot \frac{d_e \cdot U_\partial}{I_{36}} = 2,3$$

**Ширина шва** другого проходу більша, ніж першого

$$e = H \cdot \psi = 0,43 \cdot 2,3 = 1,0 \text{ см}$$

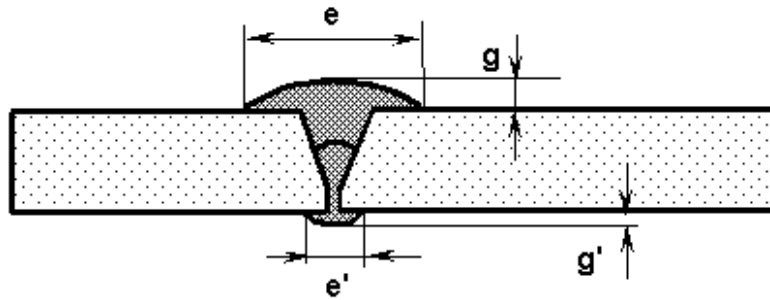


Рисунок 2.4 - Геометричні параметри стикового з'єднання

Таблиця 0.2 Режими зварювання стикового з'єднання

| Вид шва                                                | Режим зварювання |              |             |                    | Основні розміри перетину шва |                      |            |          |                     |             |             |
|--------------------------------------------------------|------------------|--------------|-------------|--------------------|------------------------------|----------------------|------------|----------|---------------------|-------------|-------------|
|                                                        | $I_{зв},$<br>А   | $d_e,$<br>мм | $U_d,$<br>В | $V_{зв},$<br>м/год | $F_n,$<br>мм <sup>2</sup>    | лицьова сто-<br>рона |            |          | зворотна<br>сторона |             |             |
|                                                        |                  |              |             |                    |                              | $e,$<br>мм           | $g,$<br>мм | $\Psi_l$ | $e',$<br>мм         | $g',$<br>мм | $\Psi_{об}$ |
| Перший прохід (авто-<br>матична в Ar+CO <sub>2</sub> ) | 332              | 1,6          | 33          | 28,1               | 70,5                         | --                   | --         | --       | 7,9                 | 1,0         | 1,5         |
| Другий прохід (авто-<br>матична в Ar+CO <sub>2</sub> ) | 362              | 1,6          | 33          | 55,4               | 84                           | 10                   | 1,57       | 10       | --                  | --          | --          |

Отже, корінь шва зварюється автоматичним зварюванням у Ar+CO<sub>2</sub> та другий прохід автоматом в Ar+CO<sub>2</sub> формує стиковий шов з V-подібними кромками.

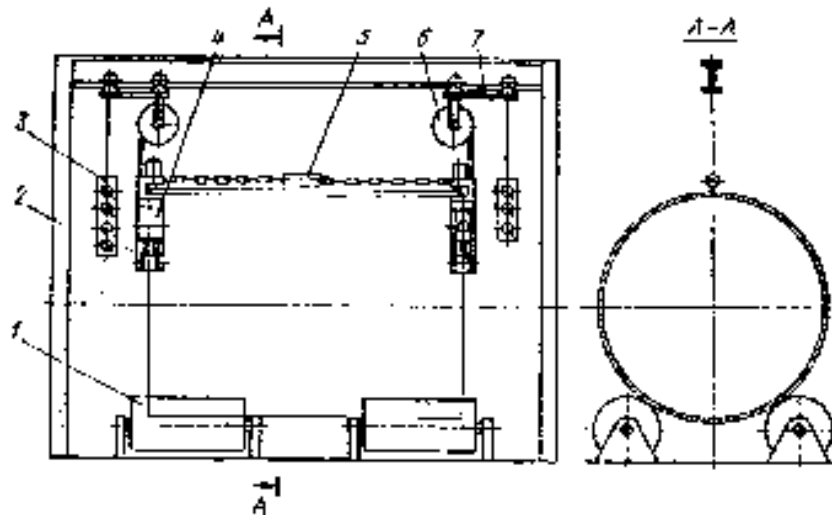
## 2.4 Вибір і обґрунтування зварювального устаткування

Згідно з традиційною технологією одиничного виробництва, подовжній стик обичайки збирають вручну, що ускладнює точне вирівнювання кромки і впливає на якість зварювання. Відсутність спеціалізованих пристроїв призводить до нерівномірного зазору та підвищеної трудомісткості.

Для підвищення продуктивності та точності доцільно застосовувати складальні стенди, які забезпечують правильне суміщення кромки з заданим зазором і вирівнювання торців, [17]. Така установка з складання подовж-

нього стику обичайки автоклавного реактора наведено на кресленні та рис.2.5.

На базі порталної рами для складання поздовжнього стику використовують гідравлічні стяжки та ланцюгові центратори. Стяжки на візках пересуваються рамою і мають у складі гідроциліндри з ланцюгами з гачками, які зачіпляються за стики обичайки. Після стягування кромки закріплюють прихватками від середини стику. Зусилля стягування біля 12 кН.



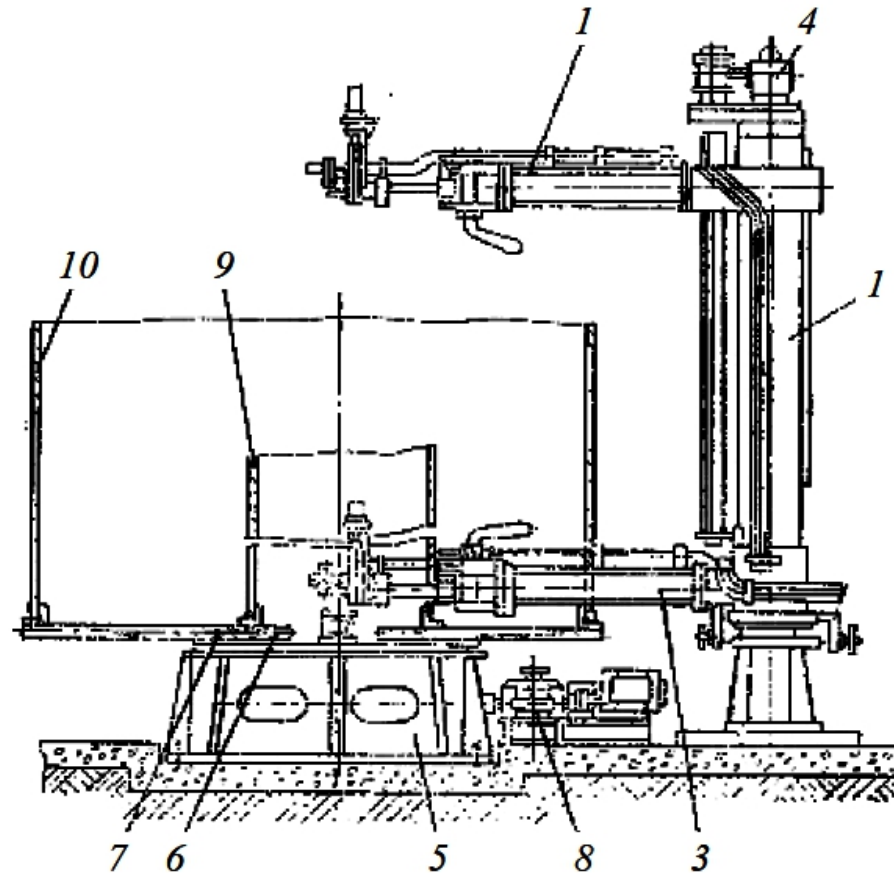
- 1 – роликів опора; 2 – портална рама; 3 – пульт керування;  
4 – гідравлічна стяжка; 5 – гідроциліндр; 6 – підвіска; 7 – візок.

Рисунок 2.5 - Стенд для складання подовжнього стику обичайки

При складанні корпусу автоклавного реактора нерівність крайок приводить до різного зазору, що погіршує потім якість зварного з'єднання. Щоб забезпечити точність стиків необхідна обрізка торців, яку виконують вручну, на верстатах або за допомогою установок газової чи плазмової різки. Ручна обрізка малопродуктивна, тому доцільно застосовувати механізовані установки. Установки термічної обрізки мають переваги над верстатами: меншу масу, нижчу вартість, компактність і простоту обслуговування.

На кресленні та рисунку 2.6 приведена установка для підготовки кромки обичайки шляхом термічного різання. Різаки встановлені на головках та

кронсолях. Для регулювання зазору використано копіювальний ролик та рухливий супорт. Використання двох консолей дозволяє проводити підготовки кромки на обох сторонах обичайки. Для регулювання частоти обертання планшайби та швидкості різання використовується двигун постійного струму та коробка передач.



1- поворотна колона; 2, 3 верхня і нижня консолі з різакми, 4 – урухомник вертикального переміщення верхньої консолі, 5 – станина, 6 – поворотний пристрій, 7 - планшайба, 8 – урухомник планшайби, 9,10 – обичайки різних розмірів

Рисунок 2.6 - Установка для підготовки торців обичайок

Для виготовлення корпусу автоклавного реактора буде використано устаткування для напівавтоматичного та автоматичного зварювання у середовищі захисної суміші газів  $Ar+CO_2$ .

Напівавтоматичне устаткування Фроніус моделі TransSteel 5000 [13], рисунок 2.7, створене для якісного отримання зварних швів із різними видами масоперенесення, струменевого зокрема. Апарат має просте, цифрове ке-

рування на основі мікропроцесору. Даним апаратом завдяки клапану перемикання газів, можна проводити зварювання і в суміші газів  $Ar+CO_2$ , і в вуглекисному газі. Це важливо для виконання прихоплювальних точок і для проведення двох швів. Режими точкового та інтервального зварювання дозволяють зварнику не витрачати час на переналаштування устаткування. Існує можливість цифрового налаштування зварювання у стандартних умовах, для кореневого шва та для підвищеної швидкості зварювання. Зварювальний струм можна регулювати у широкому діапазоні до 500 А. Напруга на дузі змінюється від 14,5 В до 40,0 В. На холостому ході напруга рівна 65 В. Маса апарату становить близько 30 кг. Апарат обладнаний також пальником Фроніус AW5000 [14], рисунок 2.7, який може зварювати дротом до 1,6 мм із газовим захистом. Довжина рукавів становить до 3,5 метра.

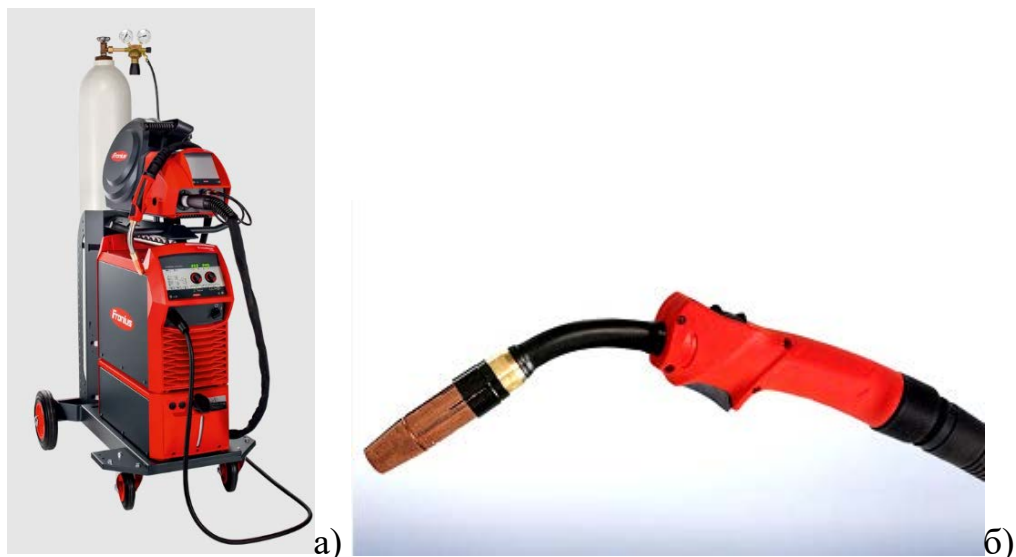
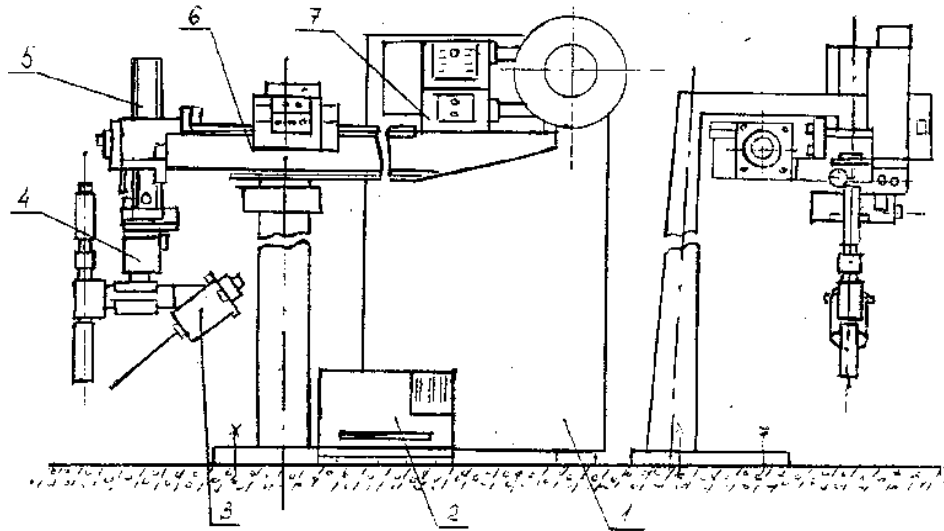


Рисунок 2.7 – Зварювальне устаткування Фроніус: а) напівавтомат TransSteel 5000, б) пальник AW5000.

З метою отримання якісного зварного шва та заміни ручної праці зварника використовують автоматичне зварювання, яке виконує не лише механізовану частину процесу зварювання, як подачу електродного дроту, регулювання параметрів дуги, керування дугою на початку та в кінці зварного шва, але також і можуть коливати пальником у разі зміни зазору у стику. Такі автоматизовані дії можуть бути виконані зварювальною установкою АЗТ (ав-

томат для зварювання теплообмінного устаткування), [16]. На даній установці можна не лише витримувати однакову довжину дуги, але і змінювати амплітуду, а також частоту коливань для пальника, виконуючи процес у середовищі захисного газу.



1- шафа керування; 2- блок живлення; 3- система пошуку і система спостереження за швом; 4- зварювальна головка; 5- механізм вертикального переміщення; 6- механізм прямолінійного переміщення; 7- пристрій, що подає дріт.

Рисунок 2.8 Зварювальна установка АД-135

Крім системи управління установка вміщує і подвійні ряди роликоопор для зручного розміщення обичайок з днищами різних розмірів. Два візки з штангами дозволяють розмістити зварювальні головки х механізмами подачі дроту. Адаптивна система управління проводить організацію подачі захисних газів, керує їх переміщенням, амплітудою та коливаннями, контролює дугу та подачу дроту, вимикає установку при неполадках.

Подовжній шов обичайки бажано зварювати відразу після складання, без транспортування й кантування. Зварювальне обладнання при цьому повинно забезпечувати зручність роботи і не обмежувати доступ до зони зварювання.

Поздовжній шов пропонується зварювати автоматичним зварювання з системою, що має власний привід та систему спостереження. Для цієї залячі обираємо головку АД-135, рис.2.8, [10, 16].

#### **Технічні характеристики зварювальної головки АД-135**

|                                                                     |                  |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|
| Діаметр електродного дроту, мм                                      | 0,8 – 1,6        |
| Швидкість подачі електродного дроту, м/год                          | 90 – 800         |
| Швидкість зварювання (регулювання плавна), м/год                    | 12 – 120         |
| Коректування електродів, мм не менш:                                |                  |
| горизонтально                                                       | 46               |
| вертикально                                                         | 60               |
| Хід зварювальної головки, мм не менш                                | 1000             |
| Зварювальний струм при ПВ = 60%, А не більш                         | 700              |
| Напруга мережі , В                                                  | 380              |
| Габаритні розміри, мм:                                              |                  |
| зварювальної головки в зборі з модулем                              | 2170 x 500 x 600 |
| прямолинійного переміщення і пристроєм шафи,<br>що подає, керування | 600 x 600 x1000  |
| Маса головки, кг                                                    | 200.             |

Для живлення зварювальної головки АД-135 можна використати універсальний випрямляч КІУ 501 [10] з номінальним струмом 500 А, табл. 2.2. Даний випрямляч може працювати на прямій так і на зворотній полярності, також у середовищі захисних газів. Використаємо пальники КГ 005-01 та КГ 007, табл. 2.3.

**Таблиця 2.2 - Технічна характеристика зварювального випрямляча**

| Технічна характеристика               | КІУ 501 |
|---------------------------------------|---------|
| Номінальний зварювальний струм, А     | 500     |
| Межі регулювання зварювального струму |         |
| - падаюча                             | 50-500  |
| - жорстка                             | 60-500  |
| Споживана потужність, кВА             | 40      |



| Технічна характеристика   | КІУ 501 |
|---------------------------|---------|
| Напруга холостого ходу, В | 85      |
| Маса, кг                  | 260     |

Таблиця 2.3 – Технічна характеристика пальників, [9, 10]

| Технічна характеристика           | КГ 005-01 | КГ 007    |
|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Номінальний зварювальний струм, А | 500       | 160       |
| Діаметр електродного дроту, мм    | 1,2...2,0 | 0,6...1,2 |
| Довжина пальника, мм              | 3000      | 1800      |
| Інтервал робочих температур, °С   | -10...+40 | -10...+40 |
| Маса пальника, кг, не більш       | 5,4       | 1,5       |

## 2.5 Вибір методу контролю якості

Контролювання якості для складання та зварювання корпусу автоклавного реактора здійснюється через попередній, поопераційний та заключний етапи. На попередньому етапі перевіряють сертифікати на метал, стан зварювального обладнання, якість витратних матеріалів і кваліфікацію зварювальників. Під час поопераційного контролю оцінюють підготовку стиків, правильність складання, прихватки та дотримання технології.

Перед зварюванням виконують зовнішній огляд з'єднань, перевіряючи форму, чистоту й відсутність дефектів. Потім проводять вимірювання параметрів стиків: кут і глибину розділення, зазори, суміщення деталей, якість прихваток.

Між операціями зварювання та після них контролюють якість швів зовнішнім оглядом і виміром. Перевіряють ширину, катети, посилення шва, зсуви, подрізи, пори, тріщини, шлакові включення.

Для кільцевих швів вибірково застосовується рентгенографія (50% — двосторонніх, 100% — односторонніх на підкладках), а також ультразвуковий контроль. Поверхня швів перед оглядом очищується. Для контролю зварних швів ультразвуковим способом використано дефектоскоп моделі SiteScan 250 (рисунки 2.9), який може вести контроль саме зварних швів ко-

тельного обладнання з товщиною металу до 5 мм та до 10 мм для пошуку тріщини та внутрішніх дефектів, [15].

Зварні з'єднання не повинні мати пор, що перевищують 10% товщини металу, чи підрізів глибиною понад 1 мм і довжиною більше 15 мм.



Рисунок 2.9 - Ультразвуковий дефектоскоп Site Scan - 250

Для перевірки герметичності проводять також попередня випробування тиском: ємність наповнюють стисненим повітрям під тиском до 50 кПа і вкривають шви мильним запіненням, і дефекти проявляються пухирцями.

Заключним етапом є гідравлічні випробування під тиском 15 кгс/см<sup>2</sup> (в 1,3 раза більше робочого). Через 5–6 хвилин корпус обстукують і оглядають на наявність течії.

## **2.6 Опис вибраного технологічного процесу виготовлення виробу**

Процес розроблення та опису технології виготовлення обертового автоклавного реактора виконується відповідно до прийнятого комплексу обладнання з урахуванням того, що основні операції реалізуються на механічній дільниці.

Передбачена технологічна послідовність дій має забезпечити: високу якість готової продукції, зниження трудових та матеріальних витрат, а також покращення умов праці.

Крім того, надзвичайно важливо, аби технологія відповідала вимогам до ЗЗ, які, залежно від типу та умов експлуатації конструкції, повинні забезпечувати достатній рівень міцності та пластичності.

У стикових з'єднаннях необхідно досягти повного проплавлення по товщині елементів з плавним контуром посилення, що переходить від основного до звареного металу шва без концентрації напружень.

Плавний перехід позитивно впливає на опірність конструкції згину, а також на подальші обробки, зокрема вальцювання та вирівнювання. Значну загрозу якості зварного з'єднання становлять дефекти типу тріщин, непроварів, пористості тощо. Тому при розробленні технологічної карти необхідно ретельно обирати способи та режими зварювання, що мінімізують появу недоліків і викривлень, а також запобігають формуванню зон залишкових напружень, які можуть знижувати надійність конструкції в цілому.

Зварні шви повинні відповідати вимогам стандартів щодо геометрії та контролю, бути вільними від шлакових включень, подрізів, непроварів, напливів та інших недопустимих дефектів.

Технологічна послідовність складально-зварювальних операцій обертowego автоклавного реактора:

Попереднє **складання подовжнього стику обичайки;**

Зварювання **подовжнього стикового шва обичайки;**

**Обрізання торців обичайок та днищ;**

Складання основної обичайки реактора;

**Зварювання кільцевих швів обичайки;**

Монтаж елементів насичення та їх приварювання до обичайки;

Контроль якості та проведення випробувань;

Усунення можливих дефектів.

Опишемо послідовно окремі операції:

Підготовка обичайок **проводиться згідно з робочими кресленнями.**

Зварювання подовжніх швів виконується з використанням **керамічних підкладок у захисному середовищі**  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ .

Порядок складання подовжнього шва:

- **кромки шліфуються до металевого блиску;**
- стик формують за допомогою вальцювання з попереднім зведенням крайок;
- виконуються зовнішні прихватки (до 4 шт.) на рівномірній відстані;
- встановлюються вхідна й вихідна планки ( $100 \times 100$  мм), які приварюються **ручним дуговим зварюванням;**
- з внутрішнього боку стику здійснюється підварювання напівавтоматом у середовищі  $\text{CO}_2$ ;
- після монтажу керамічної підкладки зварювання основного шва виконується автоматизовано у середовищі  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ .

Після формування обичайки:

- зачищаються кільцеві стики з днищами та підкладними кільцями;
- здійснюється складання та прихватка зварюванням із певним кроком;
- після цього зварюються кільця до днищ згідно з кресленням.

Підготовлені днища з кільцями встановлюються горизонтально на планшайбу маніпулятора й проварюються з очищенням швів і перевіркою посадочних радіусів.

Циліндричну обичайку монтують на стенді термічного різання, здійснюється обрізання крайок, складання з переднім і заднім днищем, залишаючи відповідний зазор для кільцевих швів. Стик прихоплюється ручним дуговим способом з відстанню між прихватками близько 200 мм.

Комплект у зборі встановлюється на роликовий стенд, де автоматом виконуються внутрішнє та зовнішнє кільцеві з'єднання у середовищі  $\text{Ag}+\text{CO}_2$ . Для зварювання використовується каретка з підвісною головкою.

Завершальним етапом є гідравлічні випробування. Ректор встановлюється на випробувальний стенд, заповнюється водою й перевіряється на герметичність згідно з нормативами. Технологічний процес виготовлення корпусу автоклавного реактора приведено у доданих матеріалах, Додаток 2.

### **3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ**

#### **3.1 Вибір центруючого пристосування для обичайок**

Для встановлення обичайки у співвісне положення, зменшити зміщення кромки, зафіксувати її у необхідному положенні з потрібними зазорами під час виконання зварювальних робіт використовують спеціальні пристрої – центратори, [18].

Зовнішній механічний центратор, складається з дуг або секцій, що охоплюють заготовку ззовні. Ці дуги зв'язані між собою та обладнані регулювальним механізмом — зазвичай ексцентриковим валом або гвинтом, — який дозволяє створювати зусилля стиснення і центрування. Фіксація до поверхні виконується за допомогою рукоятки або важеля, [17].

Під час встановлення центратора він накладається на місце стику, після чого регулюється натяг для точного вирівнювання кромки. Це забезпечує мінімальне утворення зазорів і перекосів при зварюванні. Після суміщення кромки проводиться їх прихватка, що дозволяє зберегти точність збирання до завершення всіх зварювальних операцій.

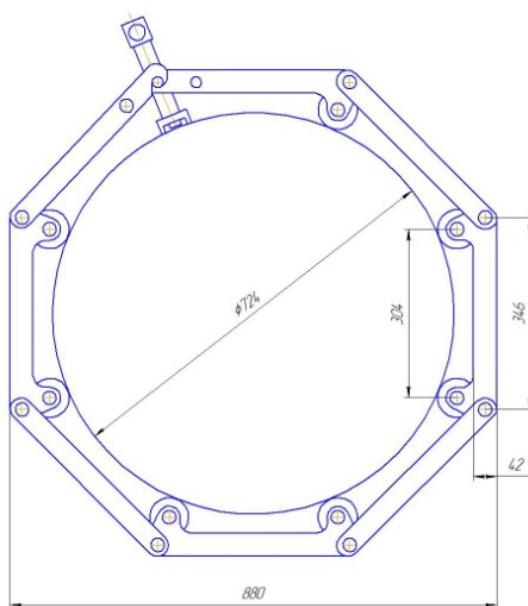
Такі центратори використовуються не лише у стаціонарних умовах, а й на монтажних майданчиках. Вони прості в експлуатації, мають достатню жорсткість і дозволяють працювати з виробами різного діаметра.

Ланцюговий центратор є різновидом зовнішніх центруючих пристроїв, що застосовуються при зварюванні циліндричних посудин, труб та обичайок. Його особливість — гнучка конструкція, яка дозволяє охоплювати заготовки різного діаметра та форми завдяки шарнірно з'єднаним ланкам, що утворюють ланцюг.

Такий центратор складається з набору металевих ланок, частина з яких має опорні ролики для плавного переміщення по поверхні заготовки. Для монтажу використовуються накидні гачки, а натягування ланцюга забезпечується спеціальним гвинтовим механізмом, який дозволяє точно встано-

вити і зафіксувати центратор у робочому положенні. Після вирівнювання кромek труб або обичайок проводиться їх прихватка, що забезпечує надійне утримання до завершення зварювання.

Ланцюгові центратори (рис. 3.1) зручні тим, що легко адаптуються до різних діаметрів без потреби зміни конструкції. Вони особливо корисні у польових умовах або при складанні великогабаритних конструкцій, де потрібна мобільність і простота у використанні. Такі пристрої забезпечують високу точність суміщення та значно зменшують похибки при зварюванні, [12, 17].



**Рисунок 3.1 – Зовнішній центратор для обичайок**

### **3.2 Розрахунок роликового стенду**

Складально-зварювальні операції для обичайок для циліндричних емностей проводяться як правило на роликових стендах. Такі обертові механізми, складаються з привідних та холостих роликових опор.

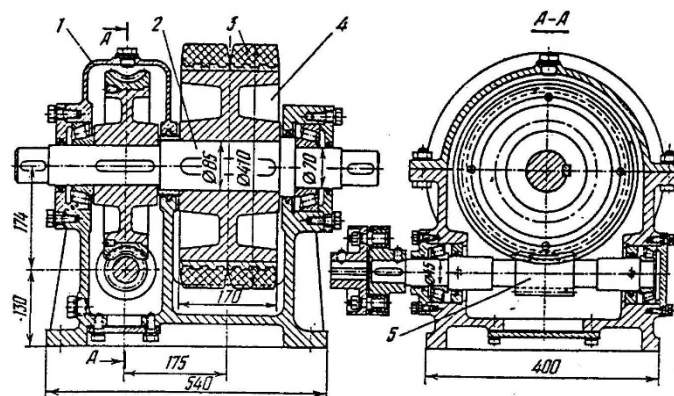
Оскільки центр ваги виробів збігається з їхньою подовжньою віссю, застосовується типова схема роликового стенду з одним рядом ведучих роликів і одним рядом холостих. Ведучі ролики змонтовані на спільному привідному

валу і оснащені гумовими грузошинами для підвищення сили зчеплення з обертовою заготовкою.

Стенд встановлюється на фундаментній рамі. Гумові грузошини на ведучих роликах забезпечують не лише краще зчеплення, а й більш плавне обертання, особливо при проходженні через ролики поздовжніх швів або виступаючі краї листів. Через це доцільно встановлювати гумові грузошини й на холостих роликоопорах.

Привід стенду включає двигун постійного струму для роботи на зварювальній швидкості та двигун змінного струму для простого обертового руху. Перемикання між режимами здійснюється муфтою з електромагнітом дистанційно.

Привідні роликові опори є уніфікованими (рис. 3.2). Обертання відбувається за допомогою черв'ячного редуктора. Вал привідної опори з'єднаний з головним приводом та іншими роликооперами. Для неведучих роликів (табл. 3.3) застосовані перекидні ролики, щоб швидко переналаштовувати стенд на інші діаметри виробів, [17].



1 – корпус редуктора; 2 – вал; 3 – грузошина; 4 – ролик; 5 – черв'як

Рисунок 3.2 - Привідна роликоопора



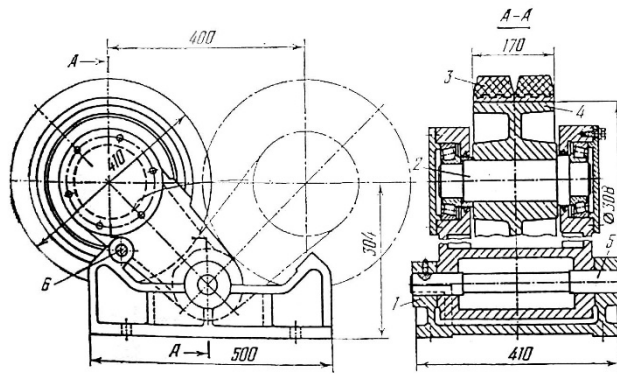


Рисунок 3.3 Холоста перекидна роликоопора

1 – основа; 2 – вісь ролика; 3 – гумова грузошина; 4 – ролик;  
5 – вісь шарніру; 6 – фіксатор

Розрахунок проводимо за методикою, приведеною в посібнику «Технологічна оснастка у зварювальному виробництві» автора Карпенко А.С. [17].

Приймаємо наступні умови для розрахунку.

1. Для запобігання від перекидання приймаємо що центральних кут  $\alpha$  буде в межах  $50 \div 120^\circ$ .
2. Діаметр роликів опор  $D_p = 410$  мм, хіл осі ролика 400 мм.
3. Діаметр циліндрочного корпусу реактора рівен 1000 мм.
4. Холості опори вибираємо перекидними, а привідні з гумовими грузошинами.
5. Враховуючи габарити виробу, число роликоопор в одному ряді - 3
6. Діаметр початкового околу черв'ячного колеса **28,8 см**.

Усі початкові умови для розрахунку у таблиці 3.1.

Розрахункові графічні схеми з результатами розрахунків приведено на рис. 3.4-3.5. Розрахунки проводимо у програмі електронних таблиць Excel. Розраховані параметри виведено у табличній формі, табл. 3.2.

Враховуючи навантаження, табл. 3.1, обираємо роликові опори для приводу РП – 0,5, та холосту РХП – 0,5, []. Перевірка запасу зчеплення привідних роликів з корпусом реактора показала, що зчеплення забезпечене.

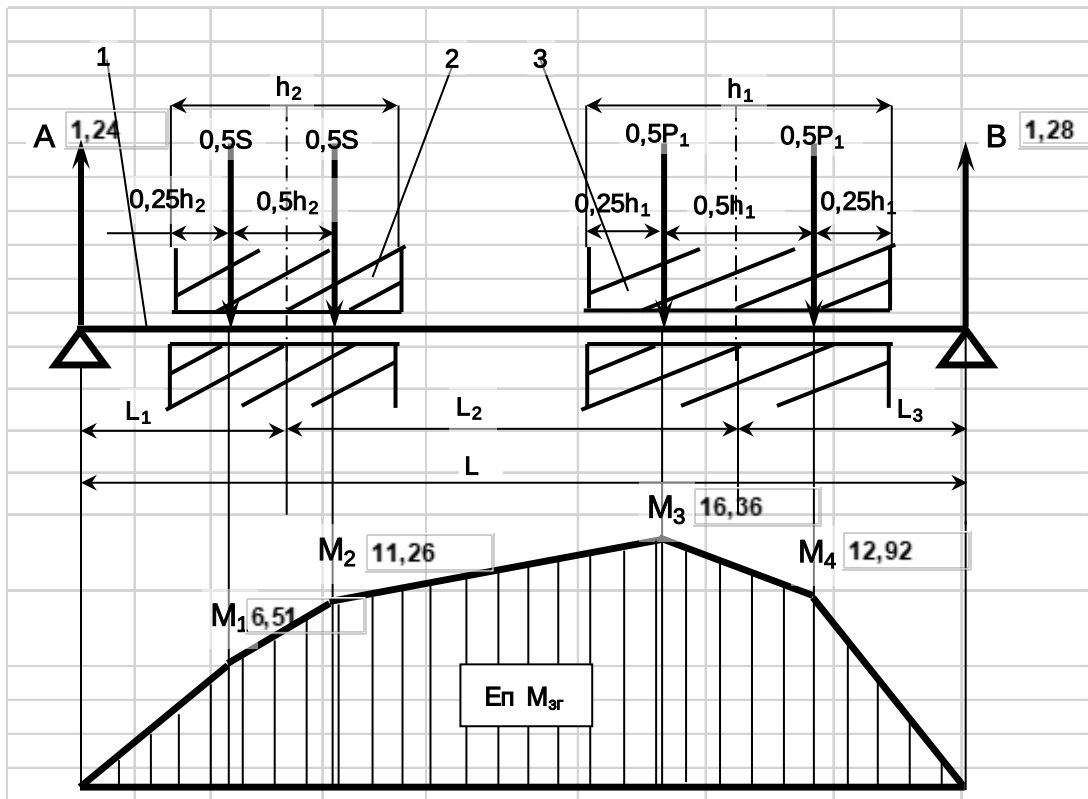


Рисунок 3.4 – Схема розрахунку привідного валу

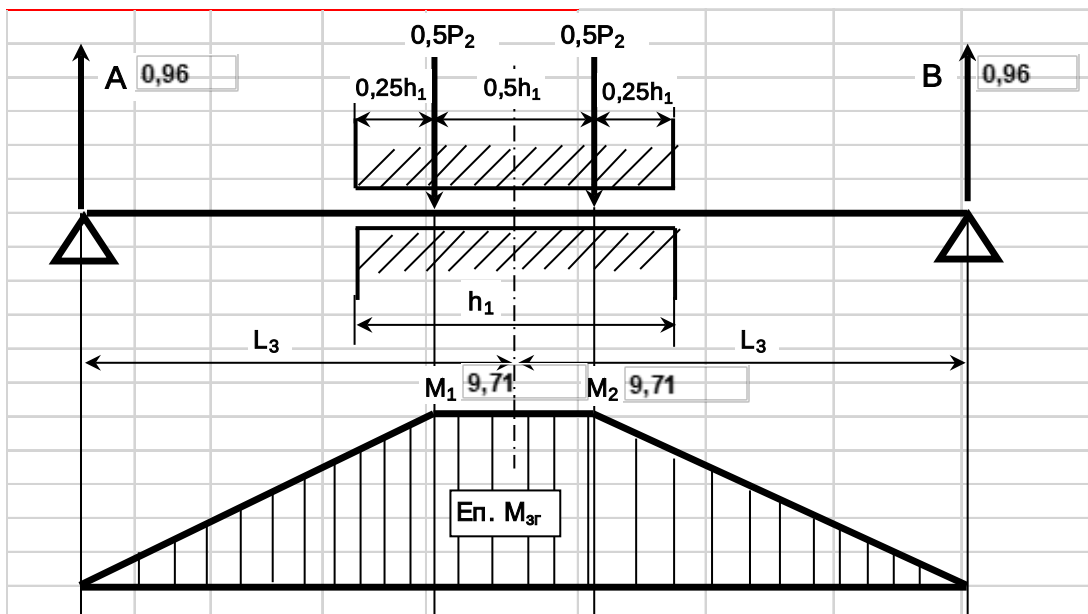


Рисунок 3.5 – Схема розрахунку холостого ролика

Таблиця 3.1 – Вихідні дані розрахунку конструкції роликового станду

| <b>Вихідні дані для розрахунку</b>                              |         |
|-----------------------------------------------------------------|---------|
| 1. Діаметр ємності, $D_{\min}$ мм                               | 1000,00 |
| Діаметр ємності, $D_{\max}$ мм                                  | 1000,00 |
| 2. Діаметр ролика, $D_r$ мм                                     | 410,00  |
| 3. Мінімальний центральний кут, град                            | 50,00   |
| 4. Максимальний центральний кут, град                           | 120,00  |
| 5. Ексцентриситет, $e$ мм                                       | 100,00  |
| 6. Вага цистерни, кг                                            | 860,00  |
| 7. Коеф.тертя в підшипниках роlikоопор, $f$                     | 0,02    |
| 8. Діаметр осі ролика у підшипнику, $d_p$ см                    | 7,00    |
| 9. Коеф.тертя кочення, $m$ см                                   | 0,25    |
| 10. Число роlikоопор в одному ряду, $i_p$                       | 3,00    |
| 11. Коеф. нерівномірності розподіл навантаження на ролик, $K_p$ | 1,25    |
| 12. Допустима напруга для валу, кг/см <sup>2</sup>              | 550,00  |
| 13. Частота обертання валу при маршової швидкості, об/хв        | 10,00   |
| 14. ККД приводного ел-двигуна                                   | 0,30    |
| 15. Коефіцієнт зчеплення ролика з виробом                       | 0,40    |

Згідно проведеного розрахунку роликового станду приймаємо:

1. Привідна роlikова опора РП0.5, перекидна та холоста роlikова опора РХП0.5, з навантаженням 1,8 кН та холоста з навантаженням 1,9 кН при номінальному допустимому навантаженні до 5,0 кН.

2. Розрахований **діаметр валу привідної роlikоопори** 33,5 мм, приймаємо 50 мм з врахуванням встановлення шпонок.

3. Необхідна **потужність привідного електродвигуна** 0,43 кВт, а на роlikовому станді встановлено 0,55 кВт.

4. Розрахунковий **діаметр валу холостої роlikоопори** 19,2 мм, приймаємо 50 мм з врахуванням встановлення шпонок.

Таблиця 3.2 – Розраховані конструктивні параметри роливого станду

|                                                                  |         |
|------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Розрахунок навантаження на роликоопори</b>                    |         |
| Відстань між роликоопорами, $L_{\min}$ мм                        | 595,89  |
| Відстань між роликоопорами, $L_{\max}$ мм                        | 1221,10 |
| Приймаємо відстань між роликоопорами, $L$ мм                     | 908,50  |
| З урахуванням перекидної роликоопори, $L_{\min}$                 | 508,50  |
| З урахуванням перекидної роликоопори, $L_{\max}$                 | 1308,50 |
| Мінімальний діаметр ємності, мм                                  | 177,17  |
| Максимальний діаметр ємності, мм                                 | 2686,17 |
| ісбаланс                                                         | 0,05    |
| Постійна величина, $b$                                           | 64,06   |
| Кут для цистерни, що розраховується, град                        | 80,23   |
| Окружне зусилля на приводних роликах, $T_1$ Н                    | 525,84  |
| Окружне зусилля для холостої роликоопори, $T_2$ Н                | 95,84   |
| Опорні реакції приводної роликоопори, $Q_1$ Н                    | 5629,46 |
| Опорні реакції холостої роликоопори, $Q_2$ Н                     | 6139,82 |
| Максимальне навантаження на одну роликоопору (провідну), $P_1$ Н | 1766,86 |
| Максимальне навантаження на одну роликоопору (холосту), $P_2$ Н  | 1918,93 |
| Привідна                                                         | РП-0,5  |
| Перекидна холоста                                                | РХП-0,5 |
| <b>Розрахунок валу приводної роликоопори</b>                     |         |
| Діаметр початкової кол. черв'ячного колеса, $d_ч$ (см)           | 28,80   |
| Найбільше зусилля у черв'ячному колесі, $S$ (Н)                  | 748,59  |
| Крутний момент на валу, $M_{кр}$ (кНсм)                          | 12,59   |
| Еквівалентний розрахунковий момент, $M_{екв}$ (кНсм)             | 20,64   |
| Розрахунковий діаметр валу, см                                   | 3,35    |
| Необхідна потужність на приводному валу, кВт                     | 0,13    |
| Необхідна потужність приводного електродвигуна, кВт              | 0,43    |
| Запас зчеплення приводного ролика з виробом                      | 4,28    |
| <b>Розрахунок валу холостої роликоопори</b>                      |         |
| Допустима напруга на вигин, кН/см <sup>2</sup>                   | 14,00   |
| Розрахунковий діаметр валу, см                                   | 1,92    |

## **4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Аналіз потенційних шкідливостей на зварювальній дільниці. Заходи щодо їх зниження**

Нормативні вимоги з безпеки при електрозварювальних роботах приведені у Правилах охорони праці під час зварювання металів (затверджені Наказом МНС України від 14.12.2012 № 1425, зареєстровані в Мін'юсті 04.01.2013 за № 63/22595), [18]. Документ містить комплекс вимог щодо безпечного виконання електродугового, плазмового, контактного, електрошлакового та інших видів зварювальних робіт, з особливою увагою до електричної безпеки.

При електродуговому зварюванні слід дотримуватися визначеного комплексу правил охорони праці, які відображаються в технологічному процесі. При проведенні зварювальних робіт можливість небезпечного впливу на зварника у зв'язку з наступними факторами: а) травми різного роду механічного характеру при підготовці важких виробів до зварювання і в процесі зварювання; б) опіки від крапель розплавленого металу і шлаку при зварюванні; в) отруєння шкідливими газами, які виділяються при зварюванні і при забрудненні приміщень пилом; г) ураження електричним струмом при дотиканні людини до струмопровідних частин електричного кола; д) ураження променями електричної дуги очей і відкритої поверхні шкіри, [18-20].

Фізичні та хімічні фактори промислової безпеки на зварювальній дільниці: шуми високого рівня, що виникають від працюючого зварювального обладнання; ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання великої інтенсивності; сліпуче світло у видимому спектрі від дуги та пальника; пари розплаву, що містять шкідливі для здоров'я свинець, цинк, кадмій, хром та інші компоненти, що входять до складу сплавів; за відсутності вентиляції ри-

зик ураження зростає; гаряча завись з мікрочастинками розплавленого металу над ванною розп-лаву; теплова дія пальника або електричної дуги.

Зварювання ємностей проводиться на зварювальній дільниці, в якому зна-ходиться багато електропроводів, кабелів, обладнання із струмо-провідними частинами, що знаходяться під напругою. Щоб знизити ризик шкоди здоров'ю, необхідно дотримуватися електробезпеки. Основні правила для зварників при цьому наступні: електроосвітлення можна запитувати тільки від струму 12 В; максимальна напруга холостого ходу зварювального апарату – 90 В; до включення обладнання перевіряється заземлення чи підключення до нуля; необхідно перевірити якість дроту – надійна ізоляція має на увазі відсутність тріщин, пропалів; електроживлення здійснюється через розподільний пристрій, осна-щений запобіжниками; довжина дроту понад 10 метрів не допускається; якщо був обрив кабелю або пошкоджена ізоляція, допустиме лише муфтове з'єднання двох шматків.

Щоб зменшити можливість ураження струмом людини в цеху під час зварювання рами слід дотримуватися наступних заходів: а) використовувати лише справні ізольовані провідники, які зв'язані з живленням джерела струму та заземленням корпусів зварювального обладнання; б) проводити роботу в сухому спецодязі та рукавицях; в) застосовувати надійну конструкцію пальника з доброю ізоляцією, яка дає можливість уникнення контакту струмопровідних чатин пальника із зварювальним виробом.

Поряд з електробезпекою не слід забувати про пожежну безпеку, оскільки під час зварювання існує ризик займання легкозаймистих матеріалів. Робоча зона повинна бути звільнена від таких матеріалів, обладнана вогнегасниками та мати ефективну систему пожежної сигналізації. Важливо також забезпечити наявність аптечки першої допомоги і навчити персонал діям при ураженні струмом або отриманні опіків, що дозволить оперативно реагувати у разі аварійних ситуацій.

В умовах підприємств з зварювальним обладнанням в повітрі знахо-

дяться аерозолі різного походження, розмірів, форми і концентрації. На зварювальній ділянці — це конденсаційні аерозолі, що утворилися при зварюванні, прибиранні приміщень, переміщенні внутрішнього обладнання.

Витяжна вентиляція при зварювальних роботах має локалізувати забруднене повітря максимально близько до джерела — через гнучкі рукави або пересувні витяжки, забезпечуючи обсяг повітря 40–60 м<sup>3</sup>/год на одного зварювальника, рисунок 5.1. Загальний повітрообмін приміщення повинен становити 3–5 крат на годину, а швидкість повітря в зоні захоплення — не менше 0,5 м/с. Відпрацьоване повітря слід виводити за межі приміщення, уникаючи застою газів і пилу, при цьому вентиляційні канали мають бути стійкими до температур і корозії для надійної роботи системи. Вентиляційна витяжка повинна розташовуватися так, щоб газів, що виділяються при зварюванні, проходили осторонь від зварювальника. Для захисту органів дихання, при зварюванні ємностей використовують респіратори великої пилеємності та вентиляційні системи. У процесі роботи в замкнутах обсягах у зону роботи зварювальника необхідно подавати чистий атмосферне повітря за допомогою повітродувки або забезпечити працюючого шланговим протигазом марки ПШ-2, ПШ-1 та рятувальним поясом з прикріпленою до нього міцною мотузкою.

Особливу увагу приділяють засобам індивідуального захисту. Зварювальник має використовувати не лише маску або щиток зі світлофільтрами та респіратор, а й спецодяг, рукавички та взуття, які захищають від термічних, хімічних та механічних впливів. Крім того, робоче місце повинно бути добре освітлене без сліпучих відблисків, що забезпечує комфорт і безпеку виконання робіт. Періодичне навчання і підвищення кваліфікації працівників доповнюють комплекс заходів для збереження здоров'я і життя.

Для захисту очей і обличчя зварювальників від шкідливої дії ультрафіолетового, інфрачервоного випромінювання та яскравого світла зварювальної дуги використовують спеціальні щитки або маски зі світлофіль-

трами різного ступеня затемнення. Розподіл світлофільтрів за номерами (наприклад, Е-1, Е-2, Е-3) і відповідною силою зварювального струму (до 75 А, 75–200 А, 200–400 А) є типовим, але цифри можуть дещо відрізнятися залежно від стандартів і типу обладнання. Світлофільтри ЕС-100, ЕС-300, ЕС-500 — це, як правило, маркування певних типів фільтрів чи їх комплектів, що забезпечують різні рівні захисту. Важливо, що зовнішній безбарвний захисний шар (скло) використовується для запобігання механічним пошкодженням і забрудненням світлофільтра; його слід регулярно замінювати при сильному забрудненні або пошкодженні.

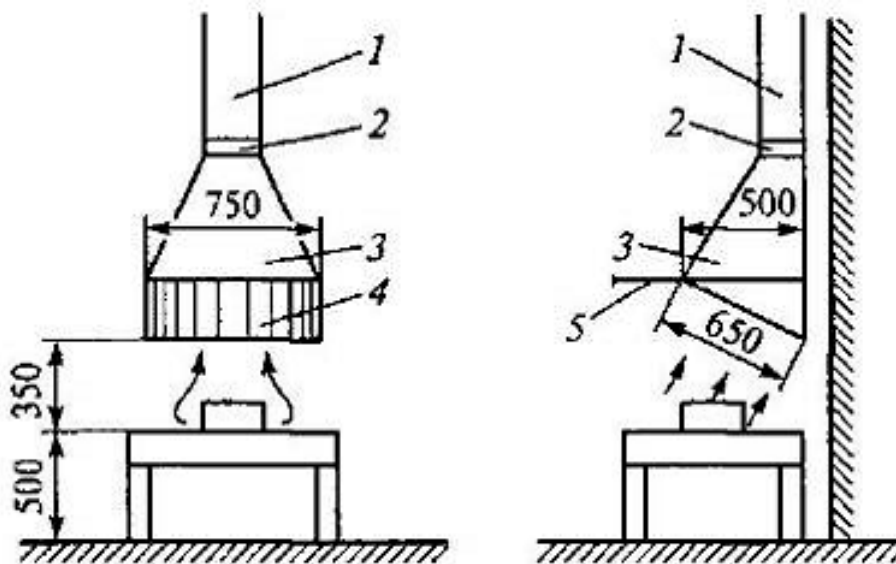


Рисунок 4.1 - Схема витяжної вентиляції газів, що виділяються при зварюванні від зварювального посту: 1 - повітропровід; 2 – шибер; 3 - повітроприймач; 4 - штамповані ґрати; 5 – козирок

Допоміжний персонал, який перебуває поруч, повинен бути забезпечений захисними окулярами або масками зі світлофільтрами типу В-2 або В-3, що мають менший ступінь затемнення, достатній для захисту від розлітаючих іскр і розсіяного світла. Для операцій із зачистки зварювальних швів використовують захисні окуляри, які захищають від механічних ушкоджень і пилу.



Окрім основних вимог електробезпеки, пожежобезпеки та захисту від випромінювань, важливо правильно організувати робоче місце зварювальника. Це передбачає розміщення обладнання та кабелів таким чином, щоб уникнути їх заплутування і створення перешкод для руху, а також забезпечення вільного доступу до аварійних виходів і засобів пожежогасіння. Регулярний контроль технічного стану зварювального обладнання, своєчасне обслуговування та усунення несправностей є обов'язковими для підтримання безпечних умов праці.

#### **4.2 Вимоги до виробничого освітлення та його нормування**

Виробниче освітлення, вірно спроектоване та виконане, призначене для розв'язання наступних питань: покращення умов тривалої праці, зниження стомлюваності, підвищення продуктивності праці та якості продукції, що випускається; сприятливого впливу на виробниче середовище, здійснюючи позитивний психологічний вплив на працівника; підвищення безпеки праці та зниження травматизму на виробництві.

До сучасного промислового освітлення висуваються високі вимоги не лише гігієнічного, але й техніко-економічного характеру.

Створення сприятливих умов праці, що виключають швидке стомлювання зору, виникнення нещасних випадків та сприяють підвищенню продуктивності праці, можливе освітлювальною установкою, що відповідає наступним вимогам, [20-21]:

- освітлення на робочому місці повинно відповідати зоровим умовам праці згідно гігієнічних норм;
- необхідно забезпечити достатньо рівномірний розподіл блискучості на робочій поверхні, а також в межах навколишнього простору;
- на робочій поверхні повинні бути відсутні низькі тіні, особливо шкідливі тіні, що рухаються та сприяють підвищенню травматизму, при природ-

ному освітленні повинні передбачатися сонцезахисні пристрої (жалюзі, козирки, світлорозсіювачі склоблоки та склопластики), які попереджують проникнення в приміщення прямих сонячних променів, які створюють різні тіні;

- в полі зору повинна бути відсутня пряма відображена блискучість;
- величини освітлення повинна бути постійною в часі;
- повинна дотримуватися оптимальна направленість світлового потоку;
- слід обирати необхідний спектральний склад світла для забезпечення правильної кольорової передачі, що забезпечується природним освітленням або штучними джерелами світла зі спектральною характеристикою, близькою до сонячної.

Для освітлення виробничих приміщень сьогодні рекомендується використовувати сучасні енергоефективні джерела світла, зокрема світлодіодні (LED) лампи та вдосконалені газорозрядні лампи (натрієві, металогалогенні), які забезпечують високу світловіддачу, тривалий термін служби та якісну кольорову передачу. Такі лампи дозволяють створити комфортні умови праці, знизити енергоспоживання і зменшити витрати на обслуговування освітлювальних систем. Вибір конкретного типу джерела світла залежить від технологічних вимог, умов експлуатації та економічної доцільності та стандартів ДСТУ EN 12464-1:2016 «Світло та освітлення. Освітлення робочих місць», [21].

Внутрішні поверхні закритих металевих ємностей під час зварювання, наплавлення і різання повинні освітлюватися за допомогою світильників, установлених зовні, або ручних переносних ламп напругою не більше 12 В.

Величина мінімального освітлення встановлюється згідно вимогам зорової роботи, які визначаються найменшим розміром об'єкту розпізнавання, контрастом об'єкту з фоном та характеристикою фону. Робота, що виконується робочим персоналом, який обслуговує розроблену установку, є роботою малої точності та відноситься до 5 розряду. Згідно діючих норм штучне освітлення повинно бути на менше 150 лк. Рекомендується підвищувати

освітленість до 180 – 200 лк. Для якісного освітлення робочих місць передбачені наступні заходи: коефіцієнт природного освітлення слід приймати не нижче 1,28 % при верхньому та комбінованому освітленні, та не нижче 1 % при боковому освітленні; використання газорозрядних джерел світла, що дає можливість підвищити рівень освітлення на місцях зварювальних робіт при загальному освітленні без додаткових витрат електроенергії; обмеження прямої блискучості за рахунок підбору конструкцій світильників; очищення світильників та вікон не рідше одного разу протягом місяця; фарбування стін титановими або цинковими білилами з високим коефіцієнтом відображення для видимого світла та з низьким коефіцієнтом відображення для ультрафіолетових променів.

Аварійне освітлення, що вмикається автоматично в разі аварійного вимкнення робочого освітлення, передбачається на робочих місцях, технологічних ділянках, де неможливо негайно припинити роботи, і на ділянках, де раптове припинення технологічного процесу пов'язане з небезпекою для життя людей або великими економічними втратами.

Евакуаційне освітлення (для евакуації працівників із приміщення цеху) в разі аварійного вимкнення робочого освітлення повинно забезпечувати освітленість підлоги основних проходів і сходів.

## ВИСНОВКИ

Удосконалено технологічний процес виготовлення автоклавного реактора, що використовується для підготовки матеріалів у виробництві покритих електродів. Аналіз існуючої технології показав низьку якість складальних робіт та підготовки кромки, значне розбризкування та втрати електродного дроту, низьку енергоефективність, значну частину ручної праці.

З метою підвищення якості циліндричної ємкості з стінками середньої товщини 12 мм із сталі P265HG доцільно застосувати автоматичне зварювання легованим дротом Св08Г2С у захисній суміші на основі аргону з добавками вуглекислого газу (82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>). Це дозволить підвищити щільність струму у зварювальній дузі, збільшить проплавлення, забезпечить стійке ведення струменевого масоперенесення, підвищить в результаті підвищить якість шва при високій продуктивності процесу зварювання. Крім покращення формування зварного шва, зменшиться його пористість та наводнення, а також витрати металу на розбризкування. В цілому підвищиться енергоефективність процесу зварювання. Застосування інноваційного зварювального апарату Фроніус TransSteel 5000 дозволить зменшити час на переналадку режимів зварювання при виконанні прихваток та зварювання елементів насичення корпусу, що в результаті зменшує час виготовлення конструкції та підвищує якість окремих операцій.

З метою якісної та швидкої підготовки кромки запропоновано використовувати установку термічного різання, а при складанні використати гідравлічні стягуючі стяжки, центратори. Для зварювання кільцевих швів розраховано конструкцію стенду на основі уніфікованих ролюкоопор. Розроблено методики контролю якості конструкції та запропоновано прилади контролю. У роботі проаналізовані небезпеки на зварювальній ділянці та рекомендовано заходи покращення безпеки праці та виробничого освітлення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сталь P265GH. [Електронний ресурс] / Метінвест-СМЦ. -Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-p265gh/>
2. Сталь 20K. [Електронний ресурс] / Метінвест-СМЦ. -Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-20k/>
3. ДСТУ-Н Б А.3.1-32:2015. Настанова щодо монтажу та зварювання посудин, що працюють під тиском, при будівництві будівель та споруд [Електронний ресурс]. – Київ: Мінрегіон України, 2015. – 56 с. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63745](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63745).
4. ДСТУ EN 10028-2:2018 «Вироби плоскі сталеві для посудин під тиском. Частина 2. Нелеговані та леговані сталі з підвищеними температурними властивостями» [Електронний ресурс] / Національний орган стандартизації України. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79903](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79903)
5. Про затвердження Технічного регламенту обладнання, що працює під тиском : Постанова Кабінету Міністрів України від 16.01.2019 № 27 [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України. – Офіційний вебпортал «Законодавство України». – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/27-2019-%D0%BF>
6. ГСТУ 3-036-2003 [Електронний ресурс] / Національний стандарт України «Посудини і апарати, що працюють під тиском. Вибір методів неруйнівного контролю швів зварних з'єднань». – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=65352](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65352)
7. Зварювальні газові суміші [Електронний ресурс] / Linde Ukraine. – Режим доступу: <https://www.linde.ua/What-We-Offer/Gases/Welding-mixtures>
8. Shanaida V., Skliarov R., Lazaryuk V. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and

welding operations // Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, 22–24 Nov. 2023. – CEUR Workshop Proceeding, 2023. V. 3628.

9. Коперсак, В.М. Теорія процесів зварювання [Текст]: Текст лекцій (в двох частинах) / В.М. Коперсак – 4-е вид., випр. і доп. –К.: НТУУ «КПІ».-228 с.

10. Биковський О.Г., Пінковський І.В. Довідник зварника. Київ: Техніка, 2002. 336 с.

11. Риков А.М. Розрахунок та вибір режиму дугового зварювання та параметрів швів зварних з'єднань. – Миколаїв. МКІ, 1980.-41 с.

12. Акулов А.І. Технологія та обладнання зварювання плавленням: Підр. Длі вишів [Текст] / А.І. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич; [Ред. вид. Т.Е. Черешнева]. - М.: Машинобудування, 1977. - 432 с.

13. Системи Transsteel. [Електронний ресурс] / Fronius. Режим доступу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnologiyi/produkty/%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B5-%D0%B7%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F/migmag/transsteel/transsteel/transsteel-5000>

14. Зварювальний пальник Fronius AW 5000. [Електронний ресурс] / pz.ua / Режим доступу: <https://pz.ua/migmag/palniki/aw5000wf-l-45m-4035605000-fronius.html>

15. Ультразвуковий дефектоскоп серії SiteScan 250 / Sonatest . – Режим доступу: [http://sonatest.com.ua/index.php?option=com\\_content&task=view&id=11&Itemid=39](http://sonatest.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=11&Itemid=39)

16. Ахметов А.Р. Автоматичне зварювання корпусів теплообмінних апаратів "Технологія суднобудування" №1, 1984 - 24-27с.

17. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві / 2-е видан-ня, перобл. та доповн.: Навч. посібник / А.С. Карпенко. – К.: Арістей, 2006. – 272 с.
18. Правила охорони праці під час зварювання металів [Електронний ресурс] / Міністерство надзвичайних ситуацій України. – Київ, 2012. – 85 с. – Затв. наказом МНС України від 14.12.2012 № 1425. – Зареєстровано в Мін'юсті України 04.01.2013 за № 63/22595. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0063-13#Text>.
19. Левченко О.Г. *Охорона праці у зварювальному виробництві*. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 181 с.
20. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві Навчальний посібник. [Текст] / О.Г. Левченко – К.: Основа, 2010. – 240 с.
21. ДСТУ EN 12464-1:2016 «Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (EN 12464-1:2011, IDT)» [Електронний ресурс] // Прийнято наказом ДП «УкрНДНЦ» від 28.12.2016 № 456; введено в дію з 01.12.2017. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 62 с. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=71838](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71838)