

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній рівень)

на тему: Вдосконалення технологічного процесу виготовлення
корпусу автоклаву для гідротермального синтезу оксидів

Виконав: студент (ка) 4 курсу, групи МП

Спеціальності “Прикладна механіка” 131

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

	<u>Лесьний В.І.</u>
(підпис)	(прізвище та ініціали)

Керівник	<u>Лазарюк В.В.</u>
	(підпис)
	(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль	<u>Дячун А.Є.</u>
	(підпис)
	(прізвище та ініціали)

Рецензент	<u></u>
	(підпис)
	(прізвище та ініціали)

Зав. каф.	<u>Окіпний І.Б.</u>

м. Тернопіль – 2026

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.

« ____ » _____ 2026__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”
(шифр і назва спеціальності)

студенту Лесьному Вадиму Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Вдосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу автоклаву для гідротермального синтезу оксидів

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

Затверджені наказом по університету від «21» січня 2025 року № 4/9-26

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 24 червня 2026 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. Аналітичний розділ. Технологічний розділ. Конструкторський розділ. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
*Установка для збирання і зварювання автоклаву. Зварювальний апарат.
Режими зварювання. Розрахунок роликового стенду.
Технологічний процес виготовлення корпусу автоклаву.*

7. Дата видачі завдання «23» _січня 2026 р.

[illegible]

Лазарюк Валерій Володимирович

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: «Вдосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу автоклаву для гідротермального синтезу оксидів» включає 4 частини пояснювальної записки з об'ємом 68 аркушів формату А4 та графічної частини об'єму 5 аркушів 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 та бездефектність зварних швів, стабілізувати параметри та підвищити продуктивність процесу зварювання під флюсом та забезпечити високі механічні властивості корпусу автоклаву для гідротермального синтезу оксидів.

Пояснювальна записка містить 22 рисунків, 10 таблиць, 8 сторінок додатків. У роботі використано 26 літературних джерел.

У даній роботі удосконалено технологічний процес зварювання корпусу автоклава для гідротермального синтезу оксидів, запропоновано технологію складання і зварювання обичайок з товщиною стінок 28 мм, дано обґрунтування способу зварювання під флюсом, зварювальних матеріалів, розраховано режими зварювальних операцій, підібрано раціональне зварювальне устаткування нового покоління з цифровим керуванням процесу масопереносу при зварюванні, розраховано роликовий стенд та запропоновано складально-зварювальне оснащення, запропоновано заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: КОРПУС АВТОКЛАВА, ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ, СКЛАДАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1 Опис конструкції зварного виробу.	10
1.2 Характеристика матеріалу виробу	11
1.3 Технічні умови на виготовлення зварної конструкції	13
1.3.1 Вимоги до матеріалів виробу та напівфабрикатів	13
1.3.2 Вимоги до вимоги до розмірів та якості поверхні	14
1.3.3 Вимоги до зварних з'єднань виробу	15
1.3.4 Вимоги до складання виробу	16
1.3.5 Вимоги до якості виробу	18
1.4 Аналіз базового технологічного процесу та постановка завдання на проектування	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Вибір та обґрунтування способу зварювання	23
2.2 Вибір зварювальних матеріалів	25
2.3 Розрахунок режимів зварювання	27
2.4 Вибір і обґрунтування зварювального устаткування	32
2.5 Вибір методу контролю якості	39
2.6 Опис вибраного технологічного процесу виготовлення виробу	43
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	48
3.1 Вибір та обґрунтування складально-зварювального оснащення	48
3.2 Розрахунок роликового стенду	52
4.БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	59
4.1 Оцінка шкідливих факторів у спроектованому цеху та заходи щодо зменшення їх впливу	59
4.2 Розрахунок штучного освітлення	62
ВИСНОВКИ	64

ВСТУП

Виготовлення обладнання, що працює під тиском, належить до найбільш відповідальних напрямів зварювального виробництва. Надійність таких конструкцій визначається не лише правильністю конструкторських рішень, а й якістю виконання зварних з'єднань, оскільки саме вони працюють в умовах складного напружено-деформованого стану, сприймають основні експлуатаційні навантаження та значною мірою визначають ресурс і безпечність експлуатації виробу. Тому до технології виготовлення корпусних елементів, вибору зварювальних матеріалів, обладнання та методів контролю висуваються підвищені вимоги, регламентовані чинними нормативними документами.

Характерною особливістю виготовлення циліндричних посудин є необхідність забезпечення високої точності складання обичайок, стабільної геометрії стикових з'єднань і мінімальних залишкових деформацій після зварювання. Значна довжина поздовжніх та кільцевих швів, багатопрохідне зварювання металу середніх і великих товщин, а також необхідність повного проплавлення стиків суттєво підвищують вимоги до точності технологічного процесу. Порушення режимів зварювання або недостатня жорсткість складально-зварювального оснащення можуть призвести до утворення непроварів, пористості, шлакових включень, холодних тріщин, підвищених залишкових напружень і погіршення експлуатаційних характеристик конструкції.

Суттєвий вплив на якість виробів має рівень технічного оснащення зварювального виробництва. Використання морально застарілих автоматів, обмежені можливості керування параметрами процесу, недостатня точність підтримання швидкості зварювання та напруги дуги, а також значна трудомісткість складальних операцій ускладнюють отримання стабільної якості зварних з'єднань. Одним із напрямів підвищення ефективності виробництва є застосування сучасного автоматичного зварювання під шаром флюсу, удо-

сконалення складально-зварювального оснащення, використання цифрових систем керування процесом і оптимізація технологічних режимів.

Автоматичне зварювання під шаром флюсу найбільш повно відповідає вимогам, що висуваються до виготовлення корпусних конструкцій, завдяки високій продуктивності, стабільності процесу, значній глибині проплавлення та можливості отримання зварних з'єднань із високими механічними властивостями. Разом із тим реалізація переваг цього способу можлива лише за умови комплексного підходу до вибору обладнання, зварювальних матеріалів, технологічного оснащення та методів контролю якості.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення удосконаленого технологічного процесу виготовлення корпусу автоклава для гідротермального синтезу оксидів із застосуванням автоматичного зварювання під шаром флюсу. Для досягнення поставленої мети виконано аналіз конструкції виробу, обґрунтовано вибір способу зварювання, зварювальних матеріалів та обладнання, розроблено складально-зварювальне оснащення, визначено режими зварювання, розглянуто питання контролю якості зварних з'єднань, охорони праці та економічної ефективності запропонованих технічних рішень.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис конструкції виробу

Зварюваний виріб є колбовим автоклавом періодичної дії, призначеним для низькотемпературного гідротермального синтезу оксидів заліза з водних розчинів солей заліза. Процес проводиться при температурі 100–200 °С і тиску до 2 МПа. У герметично закритій колбі автоклава реакційна суміш нагрівається до заданої температури, внаслідок чого відбувається гідроліз солей заліза, утворення проміжних гідроксидних сполук та їх подальша кристалізація з формуванням частинок магнетиту (Fe_3O_4) або гематиту (Fe_2O_3) залежно від складу реакційного середовища та технологічних параметрів процесу.

Корпус автоклаву складається з циліндричної обичайки, еліптичного днища та нижньої опорної частини. Корпус являє собою вертикальну циліндричну зварну конструкцію, що складається із чотирьох циліндричних обичайок, верхнього еліптичного днища та нижньої опорної частини. Обичайки виготовляються з листового прокату товщиною 28 мм шляхом вальцювання з подальшим автоматичним зварюванням поздовжніх стикових швів. Після виготовлення окремі обичайки збираються у єдиний корпус і з'єднуються між собою кільцевими стиковими швами. Така конструкція забезпечує технологічність виготовлення, зручність транспортування окремих секцій, високу точність складання та необхідну міцність корпусу при експлуатації під внутрішнім тиском до 2 МПа.

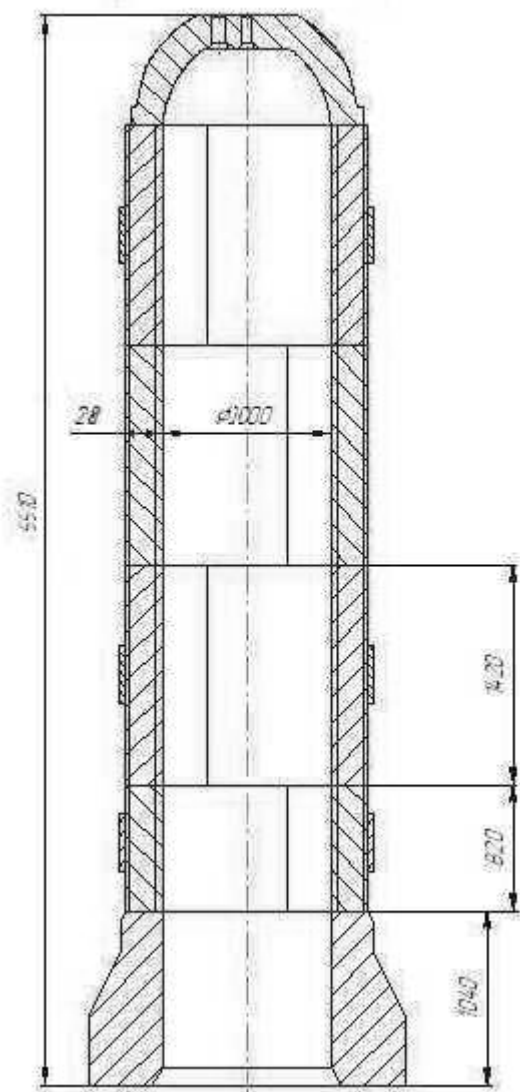


Рисунок 1.1 – Корпус автоклаву для синтезу оксидів

1.2 Характеристика матеріалу виробу

Для виготовлення великогабаритного корпусу автоклаву використовується листовий прокат. З урахуванням робочих параметрів апарата (100–200 °С, до 2 МПа) матеріалом корпусу прийнято дрібнозернисту нормалізовану сталь P355NH відповідно до EN 10028-3. Для виготовлення обичайок застосовується листовий прокат товщиною 28 мм.

Хімічний склад сталі P355NH характеризується низьким вмістом вуглецю (до 0,18 %), підвищеним вмістом марганцю (1,10–1,70 %), кремнію

(до 0,50 %), а також обмеженим вмістом фосфору, сірки та легувальних елементів (Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti, Cu), [1].

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сталі P355NH (EN 10028-3), %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	Ti	Cu
≤0,18	≤0,50	1,10-1,70	≤0,025	≤0,015	≤0,30	≤0,08	≤0,50	≤0,10	≤0,05	≤0,03	≤0,30

Таблиця 1.2 - Механічні властивості сталі P355NH (товщина 16-40 мм)

Товщина, мм	ReH, МПа	Rm, МПа	A, %	KV, Дж
16-40	≥345	490-630	≥22	≥27 при -20°C

Після нормалізації сталь має дрібнозернисту феритно-перлітну структуру, що забезпечує високу пластичність, ударну в'язкість та добру зварюваність.

Під зварювання в зоні термічного впливу відбувається локальне нагрівання та охолодження металу, формуються перегріта, нормалізована та рекристалізована ділянки. Завдяки низькому вмісту вуглецю сталь не схильна до утворення холодних тріщин.

Формула Міжнародного інституту зварювання для визначення еквіваленту вуглецю:

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Для максимального складу: C=0,18%; Mn=1,70%; Cr=0,30%; Mo=0,08%; V=0,10%; Ni=0,50%; Cu=0,30%.

$$C_e = 0,18 + 1,70/6 + (0,30+0,08+0,10)/5 + (0,50+0,30)/15$$

$$C_e = 0,18 + 0,283 + 0,096 + 0,053 = 0,612.$$

Наведене значення є теоретичним максимумом. Для промислового прокату українського виробника Metinvest паспортне значення CEV становить не більше 0,43, що підтверджує добру зварюваність сталі P355NH. Проте на виробництві кожна партія даної сталі підлягає аналізу для недопущення імовірності отримання високих значень еквіваленту вуглецю та можливого виникнення холодної тріщини.

1.3 Технічні умови на виготовлення зварної конструкції

1.3.1 Вимоги до матеріалів і напівфабрикатів

Матеріали, що застосовуються для виготовлення посудин, які працюють під тиском, повинні забезпечувати необхідний рівень міцності, пластичності, ударної в'язкості, герметичності та довговічності протягом усього нормативного строку експлуатації. Вибір конструкційного матеріалу здійснюють з урахуванням максимального робочого тиску, температури, характеру навантаження, властивостей робочого середовища, умов виготовлення та вимог до зварюваності. Основні вимоги до матеріалів встановлені ДСТУ EN 10028-2:2018, ДСТУ EN 13445-2:2022, Технічним регламентом обладнання, що працює під тиском, та НПАОП 0.00-1.81-18 та іншими нормативними актами, [2-13].

Для корпусу проєктованого автоклава прийнято дрібнозернисту нормалізовану сталь P355NH, яка спеціально призначена для виготовлення посудин, що працюють під внутрішнім тиском. Застосування цієї сталі забезпечує необхідне поєднання границі текучості, тимчасового опору розриву, пластичності та ударної в'язкості, що особливо важливо для великогабаритних зварних конструкцій із товщиною стінки 28 мм. Крім достатньої міцності, сталь характеризується доброю технологічною зварюваністю, що дозволяє виконувати автоматичне зварювання під шаром флюсу без істотного погіршення механічних властивостей основного металу та зони термічного впливу.

Для виготовлення обичайок корпусу використовується листовий гарячекатаний прокат стандартного сортаменту товщиною 28 мм. Матеріал повинен постачатися із сертифікатом заводу-виробника, який підтверджує відповідність вимогам стандарту щодо хімічного складу, механічних властивостей, результатів випробувань на ударну в'язкість та неруйнівного контролю. Не допускається застосування листового прокату, що має тріщини, роз-

шарування, закати, надмірну корозію, механічні пошкодження або інші дефекти, здатні знизити несучу здатність чи герметичність корпусу.

Під час виготовлення корпусу необхідно забезпечити збереження сертифікаційної простежуваності матеріалу. Маркування кожної заготовки повинно дозволяти однозначно встановити плавку, партію постачання та виробника металопрокату, що є обов'язковою вимогою при виготовленні відповідальних посудин, які працюють під тиском.

Оскільки корпус автоклава працює під дією внутрішнього тиску та циклічного температурного навантаження, матеріал повинен забезпечувати стабільність механічних властивостей після виконання всіх технологічних операцій, включаючи формування обичайок, складання, автоматичне зварювання під шаром флюсу та контроль якості готового виробу.

1.3.2 Вимоги до розмірів та якості поверхні

Геометричні параметри деталей корпусу повинні відповідати робочим кресленням і забезпечувати можливість точного складання конструкції та виконання автоматичного зварювання під шаром флюсу. Відхилення лінійних розмірів, форми обичайок, овальності, прямолінійності та взаємного розташування елементів не повинні перевищувати значень, установлених конструкторською документацією та вимогами ДСТУ EN 13445-4:2022.

Листовий прокат, що використовується для виготовлення обичайок корпусу, повинен мати рівну поверхню без тріщин, розшарувань, закатів, надривів, корозійних пошкоджень, вм'ятин та інших дефектів, які можуть впливати на міцність, герметичність або працездатність посудини. Допускаються лише незначні поверхневі дефекти, усунення яких не призводить до зменшення товщини металу нижче допустимого значення.

Перед складанням кромки деталей підлягають механічній обробці відповідно до прийнятої конструкції стикового з'єднання. Поверхні кромок і прилеглі до них ділянки шириною не менше 20 мм повинні бути очищені від

окалини, іржі, мастил, вологи, фарби та інших забруднень до металевого блиску. Наявність сторонніх включень у зоні зварювання не допускається, оскільки вони можуть стати причиною утворення пор, шлакових включень і непроварів.

Підготовка кромок повинна забезпечувати постійність кута розкриття, величини притуплення та складального зазору по всій довжині стику. Для корпусу автоклава із товщиною стінки 28 мм застосовується двостороннє Х-подібне розроблення кромок, що забезпечує повний провар металу при автоматичному зварюванні під шаром флюсу, зменшує об'єм наплавленого металу та сприяє зниженню залишкових зварювальних деформацій.

Після завершення зварювання поверхня швів повинна бути очищена від шлакової кірки, бризок металу та інших технологічних забруднень. Переходи від металу шва до основного металу повинні бути плавними, без підрізів, напливів, незаповнених кратерів та інших поверхневих недосконалостей. Якість поверхні готових зварних з'єднань повинна відповідати рівню якості, установленому ДСТУ EN ISO 5817:2022 для посудин, що працюють під тиском.

1.3.3 Вимоги до зварних з'єднань виробу

Зварні з'єднання корпусу автоклава є основними силовими елементами конструкції, тому їх механічні властивості, герметичність і довговічність повинні відповідати вимогам, що висуваються до посудин, які працюють під внутрішнім тиском. Конструкція стикових з'єднань повинна забезпечувати рівномірний розподіл напружень, повне проплавлення металу по всій товщині стінки та мінімальну концентрацію залишкових напружень після завершення зварювання.

Параметри режимів зварювання, зварювальні матеріали та технологічна послідовність виконання проходів повинні відповідати атестованій тех-

нології зварювання згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 15614-1:2019. Виконання зварювальних робіт дозволяється лише персоналу, який має чинну кваліфікацію відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 9606-1:2018.

У готових зварних з'єднаннях не допускаються тріщини, непровари, несплавлення, пропали, незаповнені кратери, шлакові включення, пористість понад установлені норми, а також інші недосконалості, що можуть зменшити міцність або герметичність корпусу. Переходи від металу шва до основного металу повинні бути плавними, без різких змін профілю, які можуть викликати концентрацію напружень під час роботи посудини.

Якість поздовжніх і кільцевих стикових з'єднань повинна відповідати вимогам рівня якості В за ДСТУ EN ISO 5817:2022, що рекомендується для відповідальних зварних конструкцій, які працюють під дією внутрішнього тиску. Після завершення зварювання всі стикові шви підлягають візуальному та вимірювальному контролю, а також неруйнівному контролю відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 17635:2018 і ДСТУ EN 13445-5:2022. Обсяг і методи контролю визначаються категорією посудини та вимогами конструкторської документації.

У разі виявлення недопустимих дефектів їх усунення здійснюється за затвердженою технологією ремонту із повторним проведенням неруйнівного контролю відремонтованої ділянки. До експлуатації допускаються лише ті зварні з'єднання, які після завершення всіх контрольних операцій відповідають установленим вимогам щодо міцності, герметичності та якості.

1.3.4 Вимоги до складання зварної конструкції

Складання корпусу автоклава є однією з найбільш відповідальних технологічних операцій, від точності виконання якої залежать геометричні параметри виробу, якість зварних з'єднань, величина залишкових деформацій та працездатність посудини під час експлуатації. Усі складальні роботи повинні виконуватися відповідно до вимог ДСТУ EN 13445-4:2022 із застосу-

ванням спеціалізованого складально-зварювального оснащення, що забезпечує необхідну точність взаємного розташування елементів конструкції.

Перед початком складання всі деталі корпусу підлягають вхідному контролю. Перевіряють відповідність геометричних розмірів кресленням, товщину листового прокату, якість підготовки кромки, відсутність механічних пошкоджень, а також наявність сертифікатів на основний метал і зварювальні матеріали. Підготовлені кромки та прилеглі до них поверхні очищають від окалини, мастила, іржі, вологи та інших забруднень на ширину не менше 20 мм від лінії майбутнього шва.

Корпус автоклава складається із чотирьох циліндричних обичайок, які після вальцювання послідовно збирають у єдину конструкцію. Спочатку виконують складання кожної обичайки з контролем співпадіння кромки по всій довжині поздовжнього стику. Після зварювання поздовжніх швів здійснюють складання обичайок між собою та приварювання верхнього днища і нижньої опорної частини з утворенням кільцевих стикових з'єднань. Під час складання необхідно забезпечити співвісність усіх секцій корпусу, мінімізувати зміщення кромки і виключити виникнення додаткових монтажних напружень.

Фіксацію деталей перед остаточним зварюванням виконують технологічними прихватками, матеріал яких повинен відповідати основному металу та прийнятій технології зварювання. Прихватки розташовують рівномірно по периметру стику, забезпечуючи незмінність складального зазору під час виконання автоматичного зварювання під шаром флюсу. Прихватки, що мають тріщини, пористість або інші дефекти, підлягають повному видаленню з наступним зачищенням поверхні.

Після завершення складання перевіряють геометричні параметри корпусу, співвісність обичайок, величину овальності, прямолінійність осі автоклава та відповідність складальних зазорів вимогам технологічної документації. До виконання зварювальних робіт допускаються лише ті складальні

одиниці, які відповідають встановленим вимогам щодо геометричної точності, якості підготовки кромок та взаємного розташування елементів конструкції.

1.3.5 Вимоги до якості виробу

Якість виготовлення автоклава визначається відповідністю конструкції вимогам конструкторської документації, технологічного процесу, нормативних документів та результатам контролю на всіх етапах виробництва. Під час виготовлення корпусу повинна забезпечуватися повна простежуваність матеріалів, зварювальних матеріалів, технологічних операцій і результатів контролю відповідно до вимог ДСТУ EN 13445-5:2022 та Технічного регламенту обладнання, що працює під тиском.

Контролю підлягають якість основного металу, правильність підготовки кромок, точність складання, відповідність режимів автоматичного зварювання під шаром флюсу атестованій технології, а також геометричні параметри готової конструкції. Особливу увагу приділяють якості поздовжніх і кільцевих стикових з'єднань, які є основними силовими елементами корпусу автоклава.

Після завершення зварювання всі зварні з'єднання підлягають візуальному та вимірювальному контролю. За необхідності виконують неруйнівний контроль ультразвуковим методом відповідно до ДСТУ EN ISO 17635:2018 та ДСТУ EN 13445-5:2022. Обсяг контролю визначається категорією посудини, відповідальністю конструкції та вимогами проєктної документації. Результати контролю повинні підтверджувати відсутність дефектів, які можуть вплинути на міцність, герметичність або довговічність виробу.

Якість зварних з'єднань повинна відповідати рівню **B** згідно з ДСТУ EN ISO 5817:2022. Не допускаються тріщини, непровари, несплавлення, пропали, незаповнені кратери, шлакові включення, пористість понад уста-

новлені норми та інші недосконалості, що можуть призвести до концентрації напружень або втрати герметичності корпусу.

Після завершення виготовлення автоклав підлягає перевірці геометричних розмірів, контролю овальності корпусу, співвісності обичайок, правильності взаємного розташування патрубків, фланців та інших конструктивних елементів. Відхилення геометричних параметрів не повинні перевищувати значень, установлених конструкторською документацією та вимогами ДСТУ EN 13445.

Заключним етапом контролю є випробування корпусу на міцність і герметичність. Гідравлічне випробування проводять після завершення всіх зварювальних робіт, неруйнівного контролю та усунення виявлених дефектів. Під час випробування не допускаються протікання, залишкові деформації, утворення тріщин або інші ознаки втрати працездатності конструкції. Після успішного завершення всіх контрольних операцій оформлюється комплект виконавчої документації, який підтверджує відповідність автоклава вимогам нормативних документів і допускає його до експлуатації.

1.4 Аналіз базового технологічного процесу та постановка завдання на проектування

У базовій технології для автоматичного зварювання під шаром флюсу застосовується зварювальне обладнання попереднього покоління, конструкція якого має обмежені можливості точного регулювання та стабілізації параметрів процесу. Для виготовлення корпусу автоклава зі сталі P355NH товщиною 28 мм це є суттєвим недоліком, оскільки якість стикових з'єднань значною мірою залежить від стабільності сили струму, напруги дуги, швидкості подачі електродного дроту, швидкості переміщення головки та сталості вильоту електрода.

Недостатня стабільність подачі електродного дроту призводить до коливань сили зварювального струму і, відповідно, до нерівномірної гли-

бини проплавлення по довжині шва. При зварюванні товстостінних обичайок це може спричиняти локальні ділянки непровару, несплавлення кромок або, навпаки, надмірне проплавлення з утворенням грубого кореня шва. Такі відхилення особливо небезпечні для поздовжніх і кільцевих стиків корпусу посудини, що працює під внутрішнім тиском.

Механічне регулювання положення зварювальної головки та обмеження точність її ведення відносно осі стику ускладнюють підтримання сталого положення електрода в розробленні кромок. Внаслідок цього можливе зміщення зони максимального проплавлення відносно центра стику, нерівномірне заповнення розробки, асиметрична форма шва та утворення підрізів або несплавлень біля однієї з кромок. Для Х-подібної розробки товщиною 28 мм така нестабільність безпосередньо впливає на несучу здатність з'єднання.

У зварювальному обладнанні попереднього покоління параметри процесу переважно встановлюються вручну і контролюються оператором за показами приладів. Відсутність цифрового збереження режимів і автоматичного контролю відхилень ускладнює повторення однакових умов зварювання для всіх однотипних швів корпусу. Через це поздовжні шви окремих обичайок і кільцеві шви між секціями можуть мати різну ширину, висоту підсилення, глибину проплавлення та різний рівень тепловкладення.

Нестабільність тепловкладення негативно впливає на структуру металу шва і зони термічного впливу. При недостатньому тепловкладенні зростає ризик непровару та несплавлення, а при надмірному — збільшується ширина зони термічного впливу, підвищується рівень залишкових напружень і деформацій, можливе укрупнення зерна в перегрітій ділянці. Для сталі P355NH, яка використовується у нормалізованому стані, надмірне локальне перегрівання небажане, оскільки може погіршувати ударну в'язкість металу в пришовній зоні.

Ще одним недоліком базового обладнання є обмежена можливість синхронізації роботи зварювальної головки з роликівим стендом або механізмом обертання корпусу. При виконанні кільцевих швів навіть незначна нерівномірність обертання виробу або запізнення регулювання швидкості переміщення призводить до зміни фактичної швидкості зварювання. Наслідком цього є нерівномірна висота валика, хвилястість шва, локальне збільшення або зменшення ширини шва, а також зміна глибини проплавлення по периметру з'єднання.

Через зношування механічних вузлів старих зварювальних головок можливі люфти в механізмах подачі дроту, переміщення каретки та регулювання положення мундштука. Такі люфти погіршують стабільність ведення електрода, збільшують розкид геометричних параметрів шва і потребують частого втручання оператора. У результаті зростає залежність якості зварного з'єднання від кваліфікації персоналу, а не від стабільності технологічного процесу.

Отже, недоліки базового зварювального обладнання безпосередньо впливають на якість корпусу автоклава: підвищують імовірність непроварів, несплавлень, підрізів, шлакових включень, нестабільного підсилення шва, збільшення залишкових напружень і зварювальних деформацій. Для посудини, що працює під внутрішнім тиском, такі відхилення є критичними, оскільки зварні шви є найбільш відповідальними зонами конструкції та повинні забезпечувати міцність, герметичність і довговічність виробу протягом усього строку експлуатації.

Суттєвим недоліком базової технології є виконання складальних і зварювальних операцій на різних виробничих позиціях. Багаторазове транспортування великогабаритних секцій між окремими робочими місцями збільшує тривалість виробничого циклу, потребує застосування вантажопідіймального обладнання та створює ризик порушення точності складання виробу.

Використання традиційної технології не забезпечує достатнього рівня механізації допоміжних операцій, зокрема встановлення, центрування, за- тискання та повороту обичайок. Значна частка ручної праці збільшує три- валість виготовлення виробу, підвищує фізичне навантаження на персонал і може негативно впливати на стабільність якості виконання окремих техно- логічних операцій.

З огляду на зазначені недоліки основним завданням дипломного проєкту є удосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу ав- токлава шляхом модернізації складально-зварювального виробництва. Пе- редбачається застосування сучасного автоматизованого зварювального об- ладнання, удосконалення конструкції складально-зварювального оснащен- ня, підвищення рівня механізації складальних операцій, скорочення кілько- сті внутрішньоцехових переміщень виробу та оптимізація технологічної послідовності виконання робіт.

Реалізація запропонованих технічних рішень повинна забезпечити підвищення стабільності режимів автоматичного зварювання під шаром флюсу, покращення точності складання обичайок корпусу, зменшення за- лишкових деформацій, скорочення тривалості виробничого циклу, підви- щення якості зварних з'єднань і конкурентоспроможності технологічного процесу виготовлення посудин, що працюють під тиском.

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір і обґрунтування способу зварювання

Вибір способу зварювання корпусу автоклава визначається конструкцією виробу, товщиною основного металу, вимогами до герметичності та механічних властивостей зварних з'єднань, а також рівнем механізації виробництва. Проектований корпус виготовляється із сталі P355NH товщиною 28 мм і складається з чотирьох циліндричних обичайок, з'єднаних поздовжніми та кільцевими стиковими швами. Значна протяжність зварних з'єднань і вимоги до надійності посудини, що працює під тиском, потребують застосування високопродуктивної технології, здатної забезпечити стабільну якість швів по всій їх довжині.

Ручне дугове зварювання покритими електродами є одним із найбільш універсальних способів зварювання, який широко застосовується під час виготовлення та ремонту металоконструкцій. До його переваг належать простота обладнання, можливість виконання робіт у будь-якому просторовому положенні, невисока вартість оснащення та можливість якісного формування кореневого шару зварного з'єднання у важкодоступних місцях.

Разом із тим використання ручного дугового зварювання для виконання всього об'єму поздовжніх і кільцевих швів корпусу автоклава є малоефективним. Значна товщина металу потребує виконання великої кількості проходів, що збільшує тривалість виготовлення, витрати електродів і трудомісткість процесу. Крім того, якість сформованого шва значною мірою залежить від кваліфікації зварника. З огляду на це ручне дугове зварювання доцільно використовувати лише для виконання кореневого проходу, коли ще існує доступ до внутрішньої поверхні двох складених обичайок. Доцільно підбір електродів здійснювати за класом вмісту дифузійного водню у наплавленому шарі.

Механізоване дугове зварювання плавким електродом у середовищі вуглекислого газу характеризується вищою продуктивністю порівняно з ручним способом та забезпечує достатньо високі механічні властивості зварного з'єднання. До його переваг належать безперервна подача електродного дроту, можливість механізації процесу, зменшення витрат часу на заміну електродів та порівняно невисока вартість обладнання.

Недоліком механізованого зварювання у вуглекислому газі є відкритий характер дуги, що підвищує чутливість процесу до порушення газового захисту, викликає інтенсивніше розбризкування металу та збільшує витрати часу на очищення поверхні після зварювання. Під час виконання довгомірних стикових швів товщиною 28 мм виникає необхідність у значній кількості проходів, що збільшує сумарний тепловклад і тривалість виконання робіт. Тому для виготовлення корпусів посудин під тиском цей спосіб поступається автоматичному зварюванню під шаром флюсу.

Автоматичне дугове зварювання під шаром флюсу належить до найбільш продуктивних способів виготовлення великогабаритних циліндричних конструкцій. Зварювальна дуга і розплавлений метал повністю ізольовані шаром гранульованого флюсу, який захищає метал шва від взаємодії з атмосферними газами. Одночасно флюс бере участь у металургійних процесах розкиснення та очищення металу, що сприяє підвищенню якості зварного з'єднання.

До основних переваг автоматичного зварювання під шаром флюсу належать високий коефіцієнт наплавлення, глибоке проплавлення основного металу, мінімальні втрати електродного дроту на розбризкування, стабільність режимів зварювання та висока повторюваність геометричних параметрів шва. Завдяки значній продуктивності скорочується тривалість виготовлення корпусу, зменшується витрата зварювальних матеріалів і знижується собівартість виробу при одночасному підвищенні якості зварних з'єднань.

Порівняння механізованого зварювання у середовищі вуглекислого газу та автоматичного зварювання під шаром флюсу показує, що для виготовлення товс-

тостінних обичайок автоматичний процес має суттєві переваги. Він забезпечує кращий захист металу шва, менший рівень розбризкування, більш стабільне проплавлення та вищу продуктивність при виконанні довгих кільцевих і поздовжніх стикових з'єднань. Саме ці переваги є визначальними під час виготовлення посудин, що працюють під внутрішнім тиском.

Разом із тим автоматичне зварювання під шаром флюсу не забезпечує достатньо зручного доступу для формування кореневого шару стикового з'єднання на початковій стадії складання обичайок. Тому найбільш раціональним є застосування комбінованої технології, за якої кореневий прохід виконується ручним дуговим зварюванням низьководневими електродами, а заповнення розробки кромок і формування облицювального шару здійснюються автоматичним зварюванням під шаром флюсу після встановлення вузла на роликовий стенд.

Таким чином, з урахуванням конструктивних особливостей корпусу автоклава, властивостей сталі P355NH, товщини стінки 28 мм, довжини поздовжніх і кільцевих стикових швів та вимог до якості посудини, що працює під тиском, найбільш доцільною є комбінована технологія зварювання. Виконання кореневого проходу ручним дуговим зварюванням забезпечує гарантоване формування кореня шва, а застосування автоматичного зварювання під шаром флюсу для основних проходів дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити стабільну якість зварних з'єднань та зменшити собівартість виготовлення виробу.

2.2 Вибір зварювальних матеріалів

Вибір зварювальних матеріалів для виготовлення корпусу автоклава здійснюється з урахуванням хімічного складу та механічних властивостей основного металу, вимог до рівномірності зварного з'єднання, ударної в'язкості, пластичності, герметичності та стійкості до утворення холодних тріщин. Оскільки корпус виготовляється зі сталі P355NH і належить до посудин, що працюють під внутрішнім тиском, особливу увагу необхідно приділити мінімізації вмісту дифузійного водню в металі шва.

Для виконання кореневого шару кільцевих стикових з'єднань приймаються електроди УОНІ 13/55 з основним покриттям. Електроди цього типу характеризуються низьким вмістом дифузійного водню (клас Н10 або Н5 залежно від виробника), високою пластичністю металу шва та стійкістю до утворення холодних тріщин. Основне покриття містить мінімальну кількість водневмісних компонентів, а після прожарювання забезпечує отримання наплавленого металу з низьким вмістом розчиненого водню. Саме тому електроди УОНІ 13/55 широко застосовуються під час виготовлення котлів, трубопроводів та посудин, що працюють під тиском.

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика електродів за класом насичення дифузійним воднем.

Характеристика	АНО-11	УОНІ 13/55 (ПАТОН)	УОНІ 13/55 Plasma H4R
Тип покриття	Рутилове	Основне	Основне
Призначення	Загальнобудівельні конструкції	Відповідальні конструкції, посудини під тиском	Відповідальні конструкції, трубопроводи, посудини під тиском
Класифікація EN ISO	Відсутня (ГОСТ)	(старий E 42 4 B22 H10 E 46 5 B 3 2 H5) (paton-welding.com)	(plasmatec-weld.com.ua)
Клас за дифузійним воднем	Не нормувався	H10 (≤ 10 мл/100 г) (Itech Standards)	H5 (≤ 5 мл/100 г) (Itech Standards)
Схильність до холодних тріщин	Вища	Низька	Дуже низька
Рекомендоване застосування для сталі Р355NH	Не рекомендується	Рекомендується	Найбільш доцільно

Для автоматичного зварювання під шаром флюсу обичайок корпусу автоклава приймається класична система зварювальних матеріалів: зварювальний дріт **Св-08А** і плавлений флюс **АН-348А**. Така комбінація широко застосовується для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей, забезпечує стабільне горіння дуги, добре формування шва та достатні механічні властивості металу зварного з'єднання.

Таблиця 2.2 – Характеристики флюсу АН – 348А, % [14]

Марка флюсу	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	S	P
АН-348А	40–41	34–38	6,5	5–7,5	4,5	4–5,5	2,0	0,15	0,12

2.3 Розрахунок режиму зварювання

Початкові дані для автоматичного зварювання під шаром флюсу приймають не довільно, а на основі розрахункових залежностей, оскільки від них залежить проплавлення основного металу, формування валика, ширина шва та відсутність характерних дефектів. Такий підхід дає змогу заздалегідь пов'язати технологічні умови процесу з необхідною геометрією зварного з'єднання.

Подальше визначення сили струму, напруги дуги, швидкості переміщення електрода та інших показників виконують за методикою В. П. Демянцевича [15].

Для зварювання поздовжніх і кільцевих стиків корпусу автоклава прийнято стикове зварне з'єднання з двобічною Х-подібною підготовкою кромek та округленим коренем розробки. Така конструкція зварного з'єднання забезпечує повне проплавлення металу по всій товщині стінки 28 мм, симетричний розподіл тепловкладення відносно площини стику, зменшення кутових деформацій та залишкових напружень під час автоматичного зварювання під шаром флюсу. Наявність округленого кореня розробки сприяє плавному формуванню кореневої

частини шва, зменшує концентрацію напружень у зоні стику та покращує умови заповнення розробки металом шва при виконанні багатопрохідного зварювання, [16, 17, 18].

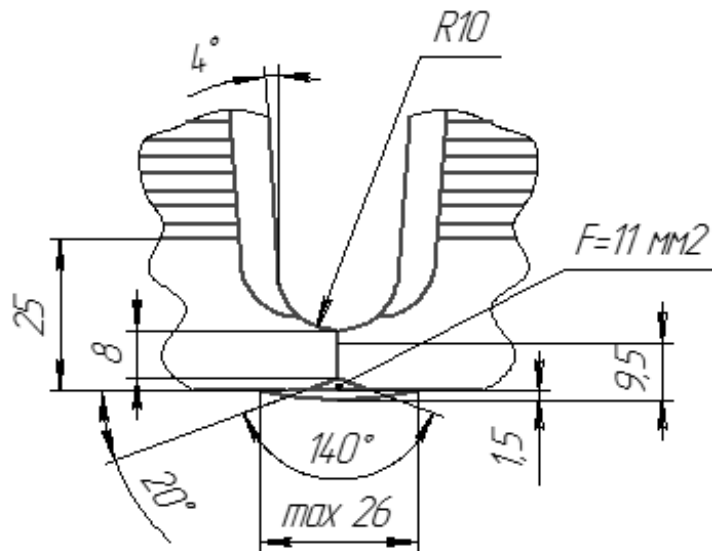


Рисунок 2.1 – Геометрія для кореневої ділянки шва

Проведемо розрахунок режиму зварювання виокристовуючи загально-прийняту систему позначень.

F_n — загальна площа наплавленого металу, мм^2 ; F_{Δ} — площа розроблення (розкриття) кромок, мм^2 ; e — ширина зварного шва, мм ; g — висота підсилення шва, мм ; e_n — вихідна (прийнята) ширина шва, мм ; H_n — вихідна (прийнята) висота шва, мм ; $h_{\text{пр}}$ — глибина проплавлення, мм ; $I_{\text{зв}}$ — сила зварювального струму, А ; U_d — напруга дуги, В ; d_e — діаметр електродного дроту, мм ; V_z — швидкість зварювання, м/год ; L — виліт електрода, мм ; q_e — ефективна погонна енергія зварювання, Дж/см ; η — ефективний коефіцієнт корисної дії процесу нагрівання; ϕ_p — коефіцієнт форми провару; $b_{\text{пр}}$ — ширина проплавлення, мм ; V_p — швидкість подачі електродного дроту, м/год ; j — густина струму, А/см^2 ; F_e — площа поперечного перерізу електродного дроту, мм^2 ; L_v — довжина вільного вильоту електрода, см ; ρ — питомий електричний опір електродного дроту, $\text{Ом}\cdot\text{см}$; γ — густина електродного металу, г/см^3 ; Δh — зміна ентальпії металу, Дж/г ; $F_{\text{пр}}$ — площа поперечного перерізу проплавлення, мм^2 ; h_v — висота підсилення шва, мм ; K_g

— коефіцієнт гостроти шва; $F_{осн}$ — площа проплавлення основного металу, $мм^2$; ψ — частка основного металу в металі шва, %.

$$F_{\kappa} = 0,73 \cdot e \cdot g + F_{\Delta}$$

$$F_H = 0,73 \cdot 26 \cdot 1,5 + 11,0 = 39,7 \text{ мм}^2$$

$$h_u = H_u - \frac{F_H}{0,73 \cdot e_u},$$

$$h_u = 9,5 - \frac{39,7}{0,73 \cdot 18} = 6,5 \text{ мм}.$$

$$I_{св} = (80 \div 100) \cdot h_u,$$

$$I_{св} = (80 \div 100) \cdot 6,5 = 520 \div 650 \text{ А}.$$

$$I_{3В} = 560 \text{ А}.$$

$$U_o = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_o}} \cdot I_{св},$$

$$U_o = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{4}} \cdot 560 = 34 \text{ В}$$

$$U_d = 36 \text{ В}.$$

$$j = \frac{4 \cdot I_{св}}{\pi \cdot d_o^2},$$

$$j = \frac{4 \cdot 560}{\pi \cdot 4^2} = 45 \text{ А/мм}^2$$

$$V_{св} = \frac{A}{I_{св}}$$

$$V_{3В} = 28,8 \text{ м/год} = 0,8 \text{ см/с}.$$

$$l_e = 10 \cdot d_e,$$

$$l_e = 10 \cdot 4 = 40 \text{ мм}.$$

$$q_n = \frac{I_{св} \cdot U_d \cdot \eta_H}{V_{св}},$$

$$q_n = \frac{560 \cdot 36 \cdot 0,8}{0,8} = 20160 \text{ Дж/см}$$

$$\varphi_{np} = k' \cdot (19 - 0,01 I_{CB}) \cdot \frac{d_{эл} \cdot U_{II}}{I_{CB}},$$

$$k' = 0,367 \cdot j^{0,1925} = 0,367 \cdot 45^{0,1925} = 0,762.$$

$$\varphi_{np} = 0,762 \cdot (19 - 0,01 \cdot 560) \cdot \frac{4 \cdot 36}{560} = 2,63.$$

$$h_p' = 0,0076 \cdot \sqrt{\frac{q_{II}}{\varphi_{np}}},$$

$$h_p' = 0,0076 \cdot \sqrt{\frac{20160}{2,63}} = 0,67 \text{ см} = 6,7 \text{ мм}.$$

$$\Delta h_{\delta} = \frac{6,7 - 6,5}{6,5} \cdot 100 = 2\%$$

$$e_p' = h_p \cdot \varphi_{np},$$

$$e_p' = 6,7 \cdot 2,63 = 1,75 \text{ см} = 17,5 \text{ мм}.$$

$$\Delta e_p' = \frac{17,5 - 18}{18} \cdot 100\% = -3\%.$$

$$V_{III} = \frac{I_{CB} \cdot U_{эл}^{\Phi} + I_{CB}^2 \cdot \rho_t \frac{l_{\gamma}}{F_{\gamma}}}{F_{эл} \cdot \gamma_{эл} \cdot \Delta h},$$

$$V_{III} = \frac{560 \cdot 8,86 + 560^2 \cdot 49 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4}{0,126}}{0,126 \cdot 7,83 \cdot 2000} = 2,53 \text{ см/с} = 91 \text{ м/ч}.$$

$$F_{н.р.} = \frac{V_{III} \cdot F_{эл}}{V_{CB}},$$

$$F_{н.р.} = \frac{91 \cdot 0,126}{28,8} = 39,6 \text{ мм}^2,$$

$$\Delta = \frac{F_{н.р.} - F_{н}}{F_{н}} \cdot 100 = \frac{39,6 - 39,7}{39,7} = 0\%.$$

$$g_p' \quad g_p'' = \frac{F_{н.р.} - F_{н}}{0,73 \cdot e_p},$$

$$g_p'' = \frac{39,6 - 39,7}{0,73 \cdot 17,5} = 0 \text{ мм}.$$

$$h_p'' = H - \frac{F_{н.р.} - F_n}{0,735 \cdot e_p'},$$

$$h_p'' = \left(9,5 + \frac{39,6}{0,73 \cdot 17,5} \right) + \frac{39,6 - 39,7}{0,73 \cdot 17,5} = 9,75 \text{ мм}.$$

$$k = \frac{4 \cdot (\ln h_p'' + 3,5)}{e_p'^2},$$

$$k = \frac{4 \cdot (\ln 0,975 + 3,5)}{1,75^2} = 4,54 \text{ см}^{-2}.$$

$$F_{np} = h_p' \cdot \sqrt{\frac{\pi}{k}} - F_n,$$

$$F_{np} = 6,7 \cdot \sqrt{\frac{3,14}{4,54}} - 0,396 = 0,4135 \text{ см}^2 = 41,35 \text{ мм}^2.$$

$$\gamma_0 = \frac{F_{np}}{F_{np} + F_{н.р.}} \cdot 100\%,$$

$$\gamma_0 = \frac{0,4135}{0,4135 + 0,396} \cdot 100 = 50 \%$$

Наводимо результати розрахунку в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Режими зварювання корпусу автоклаву

Параметри режиму	Внутрішній шов	Зовнішній шов (1)	Зовнішній шов (2)
Діаметр електроду, мм	4	3	5
Виліт електроду, мм	40±2	30±2	50±2
Зварювальний струм, А	560±10	500±10	625±10
Напруга, В	36±2	36±2	42±2
Швидкість зварювання, м/год	28,8	21,5	24,5
Вид струму	Постійний, зворотної полярності		

Геометричні параметри виконаних зварних швів наведені на рисунку 2.2.

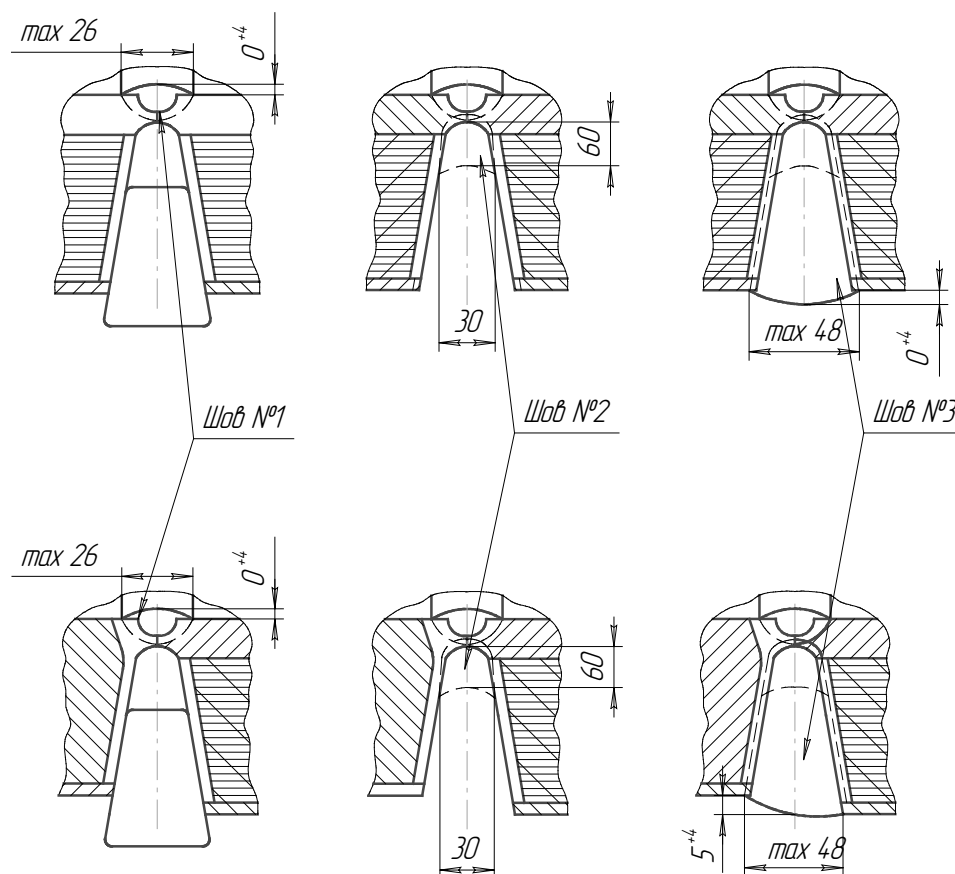


Рисунок 2.2 – Геометричні параметри зварних швів

2.4 Вибір і обґрунтування зварювального устаткування

Складання та автоматичне зварювання корпусу автоклава виконуються на комплексному роликовому стенді, який об'єднує в єдину технологічну систему обладнання для базування виробу, його обертання, центрування та автоматичного виконання зварювальних робіт. Загальний вигляд стенда наведено на рисунках 2.3 та 2.4, де показано дві проєкції одного й того самого комплексу.

Основою стенда є роликові опори, на яких установлюється корпус автоклава. Привідні та холості ролики забезпечують надійну підтримку виробу, його центрування і плавне обертання зі швидкістю, необхідною для виконання автоматичного зварювання. Регулювання взаємного розташування роликових опор дозволяє встановлювати автоклави різної довжини та діаметра.

Автоматизація процесу реалізована за допомогою порталної конструкції з вертикальними колонами, по яких переміщуються робочі майданчики зі зварювальними головками. Конструкція забезпечує вертикальне та горизонтальне позиціонування зварювального обладнання відносно виробу, що дозволяє виконувати як кільцеві, так і поздовжні шви без додаткового переставлення автоклава.

До складу комплексу входять робочі місця зварників, пульти керування, приводи переміщення, роликовий стенд, автоматичні зварювальні головки, а також допоміжні пристрої для подавання зварювальних матеріалів і виконання налагоджувальних операцій. Усі вузли працюють як єдина технологічна система, що забезпечує механізацію процесів складання, точне позиціонування виробу та стабільне виконання автоматичного зварювання.

Застосування такого комплексного стенда дозволяє скоротити тривалість складально-зварювальних робіт, підвищити точність взаємного встановлення обичайок, забезпечити сталість режимів автоматичного зварювання та покращити якість зварних з'єднань під час виготовлення корпусу автоклава.

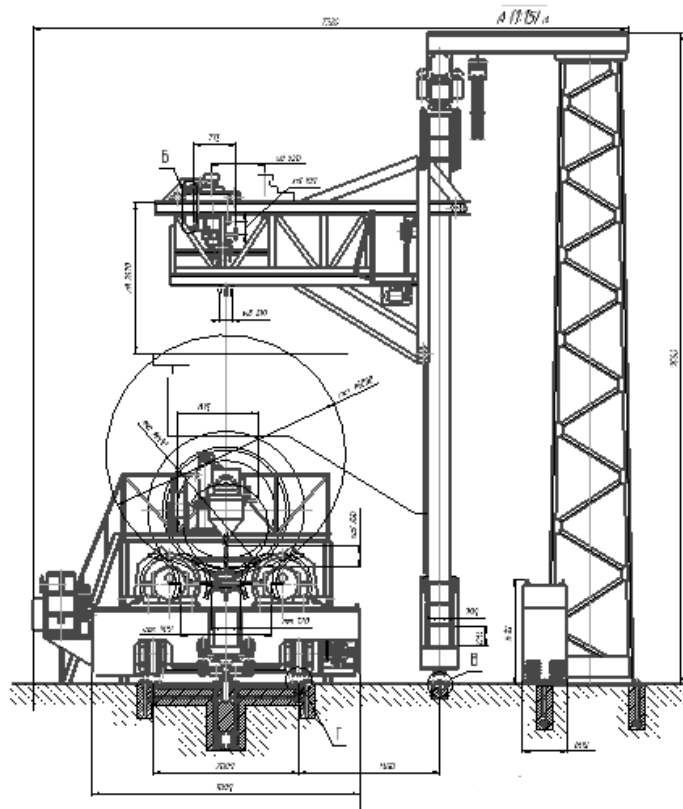


Рисунок 2.3 – Стенд для складання та зварювання автоклаву

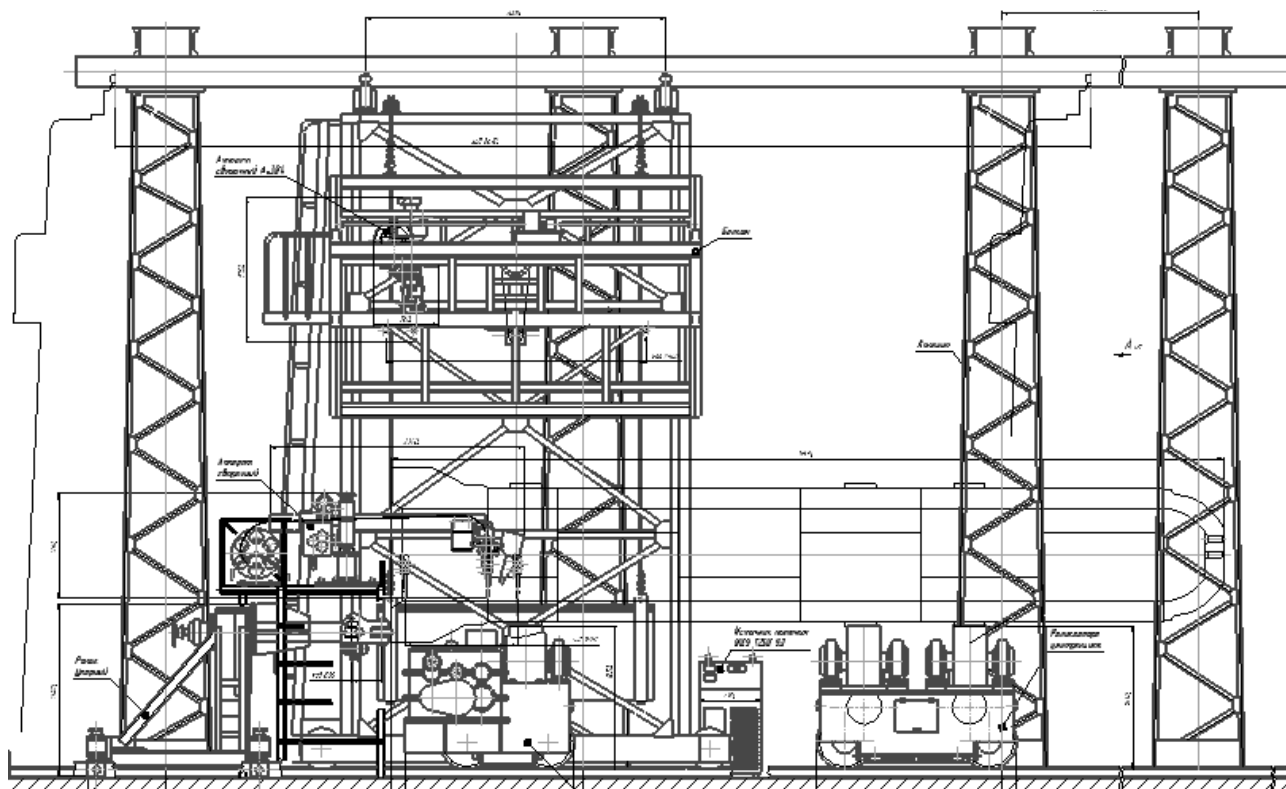


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд стану для виготовлення автоклаву

Для складання корпусу автоклава та його обертання під час автоматичного зварювання застосовується роликовий стенд, призначений для роботи з циліндричними виробами (рисунок 2.5). Обладнання використовується під час складання корпусу з окремих обичайок, виконання кільцевих та поздовжніх швів, а також для встановлення виробу в необхідне положення. Під час складання забезпечуються точне суміщення осей обичайок і підготовка стиків до зварювання. Конструкція стану дозволяє одночасно виконувати два кільцеві шви, що скорочує тривалість виготовлення автоклава (рисунок 2.4).

Центральні роликові опори мають незалежне регулювання положення, що дозволяє встановлювати обичайки різних діаметрів. Переміщення роликів здійснюється гвинтовим механізмом із черв'ячними редукторами, а контроль їх положення виконується за шкалою та діаграмою на пульті керування. Для запобігання поперечному зміщенню візків застосовуються рейкові фіксатори, які після регулювання жорстко закріплюються на рамі.

На велосипедних візках розміщені робочі місця зварників, органи керування та зварювальні головки. Балкони переміщуються по вертикалі приводом із рейковим зачепленням, урівноважуються контрвантажами та оснащуються індивідуальними підйомниками вантажопідйомністю 100 кг для подавання дроту й флюсу. Верхнє положення балконів обмежується кінцевими вимикачами [10].

Для утримання автоклава від осьового зміщення під час автоматичного зварювання кільцевих швів використовуються упорні ролики з можливістю регулювання по висоті та в осьовому напрямку. Їх положення налаштовується відповідно до геометричних розмірів виробу та фіксується болтовими з'єднаннями.

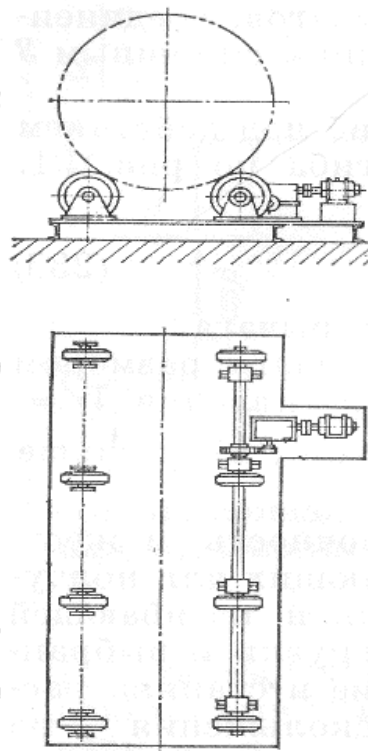


Рисунок 2.5— Принципова схема роликового стенду [6]

Для автоматичного зварювання кільцевих і поздовжніх швів корпусу автоклава прийнято автоматичний зварювальний комплекс **ESAB** для зварювання під шаром флюсу. Комплекс призначений для високопродуктивного виконання довгих прямолінійних і кільцевих швів під час виготовлення великогабаритних циліндричних конструкцій, посудин, резервуарів та іншого

технологічного обладнання. Його конструкція забезпечує точне позиціонування зварювального інструмента, автоматичне підтримання встановлених режимів зварювання та стабільну якість формування зварних з'єднань.

До складу автоматичного зварювального комплексу входять інверторне джерело живлення, блок керування, автоматична зварювальна головка A2SF J1, механізм подавання електродного дроту, система подавання та рекуперації флюсу, кабельно-шланговий пакет, а також механізм просторового позиціонування зварювальної головки, змонтований на складально-зварювальному стенді. Комплекс працює спільно з роликовим стендом, який забезпечує обертання корпусу автоклава, тоді як система переміщення зварювальної головки здійснює її точне встановлення відносно стику. Така конструкція забезпечує повністю автоматичне виконання зварювання без ручного ведення інструмента.

Виконавчим вузлом комплексу є автоматична зварювальна головка **A2SF J1**, яка забезпечує безперервне подавання електродного дроту до зони горіння дуги, підведення зварювального струму та взаємодіє із системою подавання флюсу. Конструкція головки дозволяє регулювати виліт електрода, його кут нахилу та положення відносно осі шва, що забезпечує стабільне проплавлення кромek і рівномірне формування зварного з'єднання. Подача дроту здійснюється приводним механізмом із плавним регулюванням швидкості, що забезпечує стійке горіння дуги протягом усього процесу зварювання.

Керування комплексом здійснюється з дистанційного пульта, який дозволяє встановлювати основні параметри процесу, контролювати швидкість зварювання, швидкість подавання електродного дроту та інші технологічні режими. Автоматичне підтримання заданих параметрів забезпечує високу повторюваність процесу, зменшує вплив людського фактора та сприяє отриманню зварних з'єднань зі стабільними геометричними розмірами й механічними властивостями.

Застосування автоматичного зварювального комплексу ESAB у поєднанні зі складально-зварювальним роликним станом дозволяє механізувати процес виготовлення корпусу автоклава, підвищити продуктивність праці, забезпечити високу якість формування кільцевих і поздовжніх швів, а також скоротити тривалість виробничого циклу завдяки стабільності режимів автоматичного зварювання.

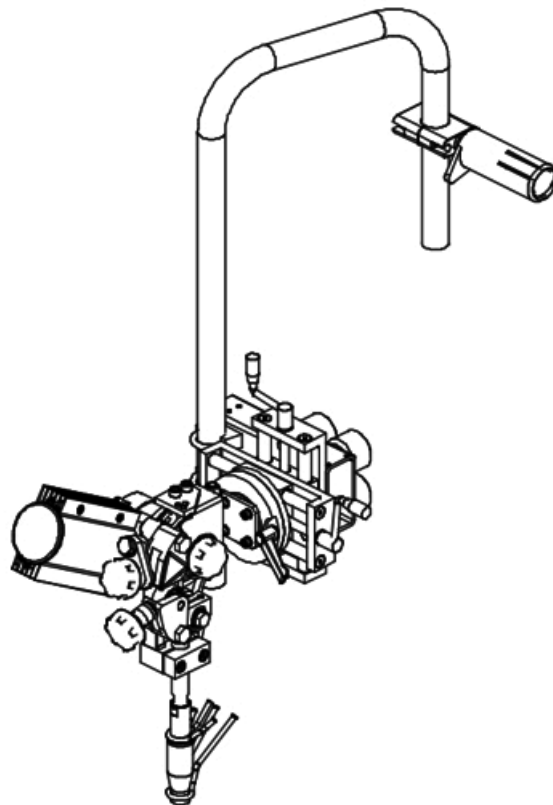


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд зварювальної головки A2SF J1

Автоматична зварювальна головка ESAB A2SG J1 4WD складається з чотирироликowego механізму подавання електродного дроту з електроприводом, вузла кріплення та переміщення по напрямній, механізмів регулювання просторового положення, контактної пристрою (MIG/MAG-пальника), тримача барабана з електродним дротом і кабельно-шлангового пакета для подавання зварювального дроту, захисного газу, електричного струму та керувальних сигналів.

Таблиця 2.3 - Технічна характеристика автомата A2SG J1, [19]

Параметр	Значення
Тип головки	ESAB A2SG J1 4WD (MIG/MAG)
Тип механізму подавання дроту	Чотирироликівий (4WD)
Максимальна швидкість подавання дроту	9,0 м/хв
Діаметр електродного дроту	1,6–4,0 мм
Максимальна маса катушки з дротом	30 кг
Хід механізму регулювання (слайдерів)	90 мм
Кут повороту головки	360°

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики випрямляча ESAB LAF 635, [20]

Параметр	Значення
Тип джерела живлення	Тиристорний зварювальний випрямляч
Призначення	Автоматичне зварювання під шаром флюсу (SAW)
Номінальний зварювальний струм	630 А
Діапазон регулювання струму	50–630 А
Робоча напруга дуги	22–44 В
Напруга холостого ходу	75 В
Номінальна потужність	44 кВА
Напруга живлення	3×400 В, 50 Гц
Коефіцієнт потужності	≥ 0,90

Параметр	Значення
Коефіцієнт корисної дії	$\approx 85 \%$
Спосіб охолодження	Примусове повітряне
Клас ізоляції	H
Клас захисту	IP23
Сумісні зварювальні головки	ESAB A2 SFE1, A2 SFE2, A6
Сумісна система керування	ESAB A2–A6 PEK
Маса	≈ 260 кг

2.5 Вибір методу контролю якості

Контроль якості зварних з'єднань призначений для встановлення відповідності готових швів вимогам конструкторської та нормативної документації. Під час перевірки визначають наявність дефектів, їх розташування, геометричні параметри та характер розвитку. Отримані результати використовують для прийняття рішення щодо можливості усунення виявлених недоліків, аналізу причин їх появи та розроблення заходів, спрямованих на запобігання повторному виникненню.

Під час зовнішнього огляду особливу увагу приділяють відповідності форми і геометричних розмірів зварного шва встановленим вимогам креслень та технічних умов.

Методи радіаційного неруйнівного контролю ґрунтуються на застосуванні іонізуючого випромінювання. Для цієї мети використовують рентгенівські або гамма-промені, які належать до електромагнітного випромінювання та мають високу проникну здатність.

Принцип радіографічної перевірки полягає у фіксації послаблення потоку випромінювання під час його проходження крізь метал. Ступінь ослаблення визначається товщиною виробу та густиною матеріалу, що дозволяє виявляти

внутрішні дефекти зварного з'єднання, такі як пори, непровари, шлакові вclusions та інші неоднорідності [14].

Магнітні способи контролю придатні лише для виробів, виготовлених із феромагнітних сталей, оскільки їх дія базується на особливостях розподілу магнітного поля в матеріалі [14].

Під час виготовлення зварних корпусних конструкцій, зокрема автоклавів і посудин, що працюють під тиском, забезпечення необхідного рівня якості можливе лише за умови виконання контролю на кожній стадії створення виробу — від підготовки виробництва до завершальних випробувань.

Важливою складовою системи забезпечення якості є контроль, який здійснюється безпосередньо під час підготовки виробництва та виконання зварювальних робіт. До його складу входить перевірка таких питань [5]:

- відповідність основного металу, електродних матеріалів, зварювального дроту та флюсів вимогам нормативної документації і сертифікатів виробника;
- дотримання правил підготовки та умов зберігання зварювальних матеріалів, включаючи сушіння електродів, очищення дроту та інші технологічні операції;
- справність технологічного обладнання, джерел живлення, вимірювальних приладів, систем подачі газу та засобів керування процесом;
- правильність виготовлення деталей, точність складання конструкції, виконання технологічних режимів зварювання, а також рівень професійної підготовки виконавців.

Руйнівні методи контролю мають певні обмеження, оскільки дослідження виконують переважно на спеціально виготовлених зразках або модельних виробах. Для отримання достовірних результатів необхідно випробувати достатню кількість зразків, що супроводжується додатковими витратами матеріалів, часу та трудових ресурсів, а також потребує їх механічної обробки.

Неруйнівний контроль виконують без пошкодження виробу, який після завершення перевірки може експлуатуватися за призначенням. Такі методи

забезпечують оцінювання технічного стану зварного з'єднання без зміни його експлуатаційних властивостей.

Основними перевагами неруйнівного контролю є можливість дослідження готових виробів без їх руйнування, проведення перевірки кожного елемента конструкції або всієї партії, виконання контролю безпосередньо у виробничих умовах, у тому числі під час експлуатації. Порівняно з руйнівними випробуваннями цей підхід потребує менших матеріальних витрат і є значно економічнішим.

Для контролю зварних швів корпусів автоклавів застосовують ультразвуковий дефектоскоп Harfang VEO від британської компанії Sonatest на фазованих решітках Harfang X-32 з інтерактивною системою сканування, [21].



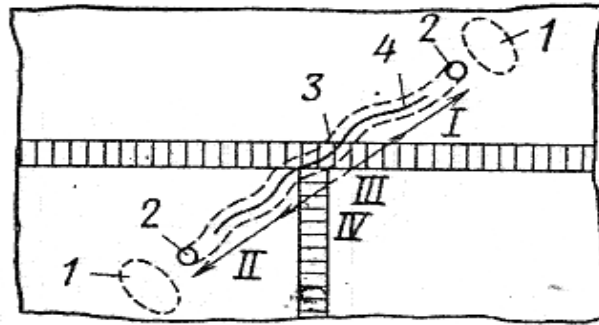
1 – шукач; 2 – екран; 3 – дефект; 4 – ультразвукові хвилі; 5 – зварний шов;
6 – основний метал; 7 – джерело ультразвукових хвиль

Рисунок 2.7 – Схема ультразвукового контролю

Перед початком перевірки поверхню шва очищають від окалини, бризок металу та інших забруднень, після чого її висушують і покривають контактною рідиною, яка забезпечує ефективне введення ультразвукових коливань у метал. Схему виконання ультразвукового контролю наведено на рисунку 2.7.

Значні тріщини у зварних швах ліквідують повторним зварюванням після відповідної підготовки пошкодженої ділянки. Для запобігання подальшому розвитку тріщини на її кінцях попередньо виконують наскрізні отвори, розташовані на відстані 40–50 мм від меж дефекту. Після цього тріщину розкривають, фор-

муючи V-подібну або Х-подібну розробку за допомогою пневматичного зубила, газового різака для поверхневого різання чи повітряно-дугового різання. Оброблені кромки ретельно очищають від залишків шлаку та інших забруднень, після чого виконують повторне зварювання із застосуванням зворотно-ступінчастої технології (рисунок 2.8).



1 – місця підігріву; 2 – засвердлення отвору; 3 – оброблення кромки тріщини;
4 – тріщина; I, II, III, IV – послідовність зварювання

Рисунок 2.8 – Схема виправлення зварного з'єднання з тріщиною

У деяких випадках перед початком ремонтного зварювання виконують попередній підігрів металу газовим пальником до температури 150–200 °С. Такий технологічний прийом забезпечує рівномірніше охолодження зварного шва разом із прилеглими зонами основного металу, що сприяє зниженню рівня залишкових напружень і запобігає утворенню нових тріщин у кінцевих ділянках шва.

За наявності внутрішніх дефектів, до яких належать дрібні тріщини, непровари, газові порожнини або шлакові включення, пошкоджену частину шва повністю видаляють механічним або термічним способом, після чого виконують повторне зварювання. Такий самий порядок ремонту застосовують і для ділянок металу, що зазнали перепалу.

Під час ремонту виробів із вуглецевих сталей дефектні шви допускається видаляти як механічною вирубкою, так і термічним виплавленням. Для конструкцій із легованих сталей використовують лише механічне видалення

металу, оскільки застосування термічного способу може призвести до небажаних структурних перетворень у зоні основного металу та погіршення його експлуатаційних властивостей.

2.6 Опис вибраного технологічного процесу виготовлення виробу

Технологічний процес виготовлення корпусу реактора складається з ряду технологічних операцій, серед них заготівельні, допоміжні, складально-зварювальні, та контролю якості.

Під час складання корпусу посудини окремі елементи необхідно встановити у взаємному положенні, яке відповідає їх проектному розташуванню в готовому виробі. Зібраний вузол повинен мати достатню жорсткість і механічну стійкість, що забезпечує збереження геометричних параметрів конструкції та мінімізує деформації, які можуть виникати в процесі зварювання.

На початковому етапі виконують переналагодження складального оснащення відповідно до діаметра обичайок, що підлягають з'єднанню. Після завершення налаштування за допомогою мостового крана одну з обичайок укладають на напрямні рейки. Перед її встановленням між поверхнею рейок і корпусною деталлю розміщують дві підкладки розміром 500×60×10 мм, виготовлені зі сталі 09Г2С.

Положення обичайки коригують таким чином, щоб її торцева поверхня була розташована під прямим кутом до осі напрямних, а площа стику займала вертикальне положення. Після остаточного вирівнювання деталей закріплюють клиновими упорами з обох боків, як показано на рисунку 2.9. На завершення до торця бандаж встановлюють технологічну планку розміром 100×250×10 мм, виготовлену з вуглецевої сталі, яка використовується під час виконання подальших зварювальних операцій.

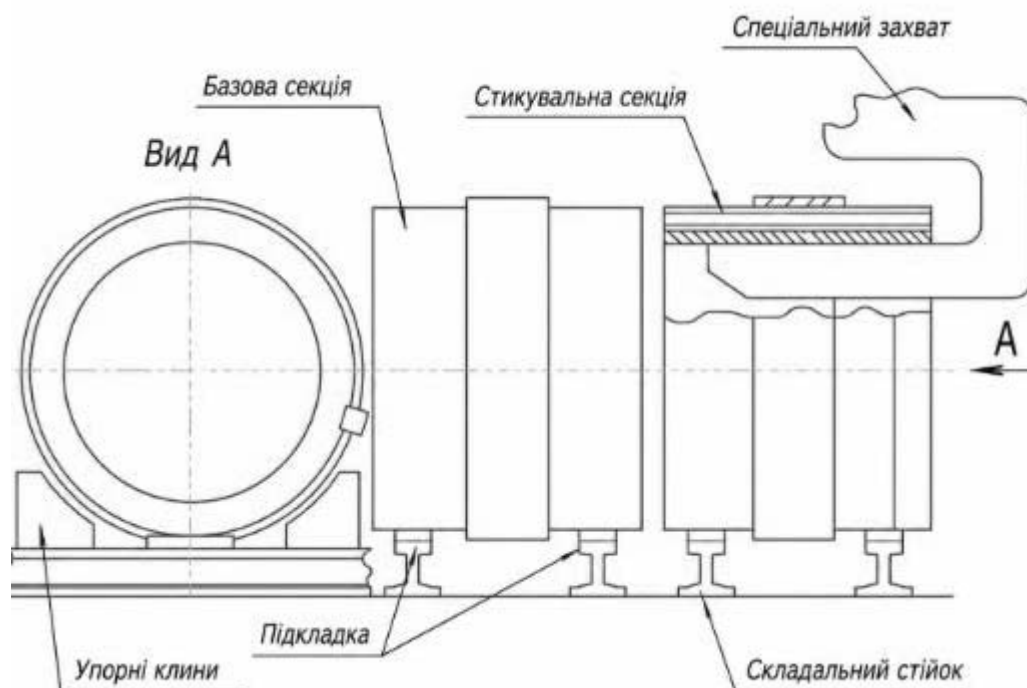


Рисунок 2.9 - Схема складання обичайки під зварювання

Після суміщення обичайок по периметру стикового з'єднання визначають три точки встановлення технологічних клинів, які рівномірно розташовують через 120° відносно одна одної. Спочатку у верхній частині стику, відповідно до нанесеної розмітки, монтують два клини, встановлюючи їх у підготовлену розробку кромки. Для надійної фіксації кожний клин приварюють до зовнішньої поверхні обичайок двосторонніми кутовими швами з катетом 6 мм і довжиною 80 мм. Зварювання виконують електродами УОНІ 13/55 Плазма Н4R діаметром 5 мм.

Після закріплення клинів з внутрішнього боку базової царги виконують прихватки, розташовуючи їх навпроти місць встановлення клинів. Розміри кожної прихватки становлять 200 мм завдовжки та 5 мм заввишки. Для виконання цієї операції застосовують ті самі електроди типу УОНІ 13/55 Плазма Н4R діаметром 5 мм.

Після завершення складальних операцій сформований вузол встановлюють на роликовий зварювальний стенд, підготовлений для виконання кільцевого шва. Перед розміщенням виробу на роликових опорах до торцевої частини двійника

монтують захисне кільце, призначене для контакту з опорним роликом. Його попередньо фіксують прихватками, після чого остаточно приварюють до бандажа через технологічні планки. На завершальному етапі регулюють положення опорного ролика та виконують його налаштування відповідно до габаритів складеного вузла, забезпечуючи стабільне обертання виробу під час автоматичного зварювання.

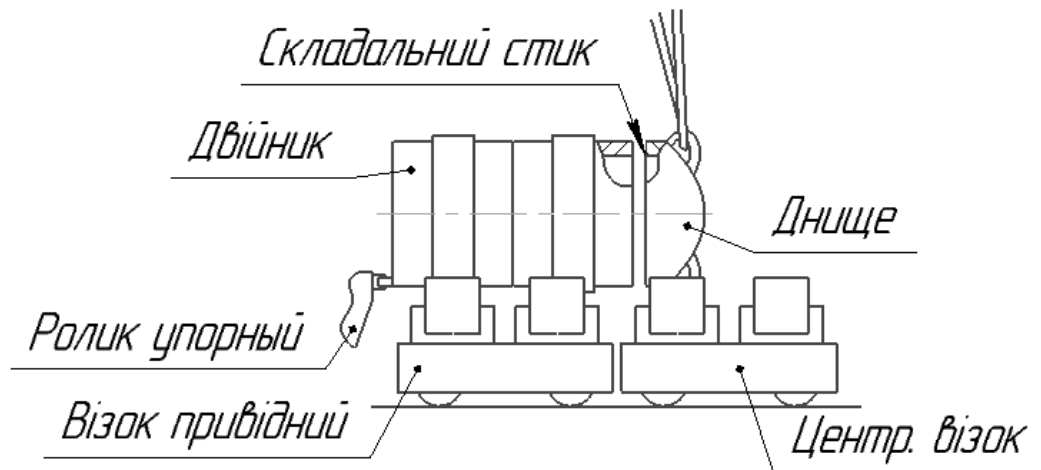


Рисунок 2.10 – Схема складання днища з обичайкою

Після завершення попереднього складання виконують переналагодження роликового стенда для монтажу та подальшого зварювання рулонної частини корпусу з його кінцевими елементами — днищем і фланцем. Насамперед сформований вузол встановлюють на роликові опори, після чого перевіряють геометричні параметри торцевих поверхонь деталей, що підлягають стикуванню, оцінюючи правильність їх взаємного розташування перед остаточною складанням.

Наступною операцією є транспортування кінцевого елемента за допомогою вантажопідіймального механізму до місця складання. Після стропування днище або фланець плавно переміщують до корпусної частини, а суміщення кромок здійснюють шляхом обертання рулонної частини на роликовому стенді до досягнення необхідного положення стику.

Перед остаточним приєднанням кінцевого елемента під нього встановлюють додаткову роликову опору, яка запобігає просіданню деталі під час складання та забезпечує її стійке положення. При цьому між поверхнею роликів і зовнішнім діаметром виробу залишають технологічний зазор близько 30 мм, що створює необхідні умови для точного суміщення елементів і безпечного виконання подальших зварювальних робіт.

У цілому складання та зварювання складальних одиниць корпуса автоклава виконують у визначеній технологічній послідовності. Після встановлення деталей у складальному пристосуванні їх остаточно фіксують за допомогою пневматичного притискача, що забезпечує незмінність взаємного положення елементів під час виконання зварювальних робіт. Після цього виконують зварювання у передбачених технологією місцях, формуючи початкове закріплення складальної одиниці.

Після завершення прихоплювального зварювання вузол звільняють від затискних елементів пристосування, знімають зі складального оснащення та передають на наступну операцію. Далі виконують остаточне зварювання всіх передбачених конструкцією з'єднань із дотриманням установлених режимів процесу.

Зварне з'єднання № 1 виконують відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.11. Спочатку накладають шов довжиною 100 мм з одного боку стику, після чого переходять до виконання наступних технологічних операцій згідно з прийнятою послідовністю складання та зварювання.

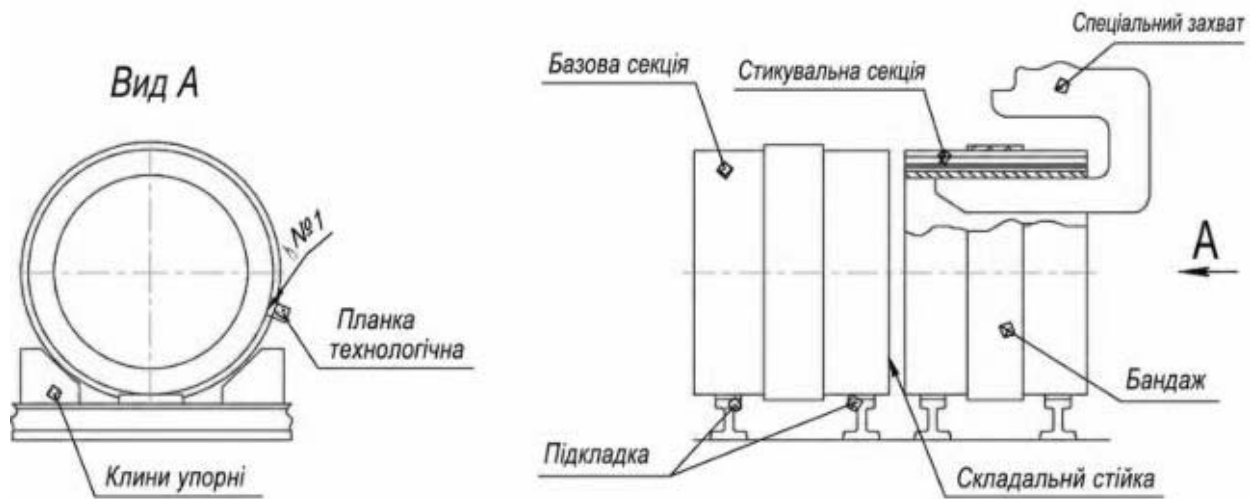


Рисунок 2.11 – Схема зварювання кільцевого шва

Система забезпечення якості охоплює контроль на всіх етапах виготовлення виробу. Перевірці підлягають основний метал, зварювальні матеріали, правильність виконання окремих технологічних операцій, якість сформованих зварних з'єднань, а також готовий корпус автоклава після завершення всіх виробничих процесів.

Під час складання корпусу виконують вимірювання внутрішніх діаметрів торцевих частин обичайок, визначаючи максимальні та мінімальні значення для оцінки відповідності їх геометрії встановленим допускам. Аналогічні вимірювання проводять для торців царг, одночасно перевіряючи правильність їх форми та взаємного розташування.

Окрему увагу приділяють виявленню можливих дефектів наплавленого металу. Під час контролю оцінюють відсутність кристалізаційних тріщин, пористості та інших внутрішніх і поверхневих несплошностей. Крім того, перевіряють геометричні характеристики зварного шва, порівнюючи їх із вимогами, наведеними на рисунку 2.12.

Після видалення технологічних клинів усі місця їх зрізання підлягають суцільному контролю методом кольорової капілярної дефектоскопії. Додатково виконують радіографічний контроль по всій довжині кільцевого шва, здійснюючи просвічування як із зовнішнього, так і з внутрішнього боку

конструкції, що дозволяє підтвердити відсутність внутрішніх дефектів і відповідність зварного з'єднання встановленим вимогам.

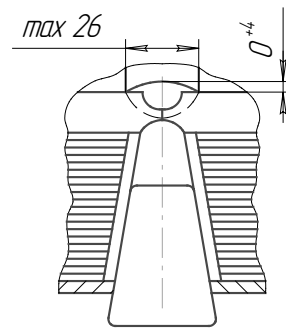


Рисунок 2.12 – Контроль геометричних параметрів зварного з'єднання

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір та обґрунтування складально-зварювального оснащення

Корпус проєктованого автоклава являє собою вертикальну циліндричну посудину, що складається із чотирьох обичайок діаметром 1000 мм із товщиною стінки 28 мм, верхнього еліптичного днища та нижньої опорної частини. Основними зварними з'єднаннями конструкції є поздовжні та кільцеві стикові шви, які після виготовлення працюють під дією внутрішнього тиску до 2 МПа. Саме тому до точності складання кромок перед автоматичним зварюванням під шаром флюсу висуваються підвищені вимоги.

Під час виготовлення обичайок найбільш відповідальною операцією є забезпечення співвісності двох суміжних секцій, витримування постійного складального зазору по всьому периметру стику та виключення взаємного зміщення кромок. Навіть незначне порушення положення деталей призводить до нерівномірної глибини проплавлення, зміни геометрії шва, виникнення додаткових залишкових напружень і збільшення обсягу виправних робіт після зварювання.

З урахуванням габаритів виробу, товщини металу та одиничного характеру виготовлення для складання кільцевих стиків обрано ручний приварний центратор у поєднанні з гвинтовими стяжками. Таке рішення забезпечує необхідну точність складання без застосування складних механізованих систем центрування та дозволяє використовувати одну й ту саму оснастку під час виготовлення всіх шести обичайок корпусу.

Ручний центратор складається з двох приварних опорних елементів, між якими встановлюється притискний гвинт. Після приварювання опор до зовнішньої поверхні обичайок обертанням гвинта забезпечують зближення кромок, їх суміщення та вирівнювання по висоті. Завдяки цьому досягається постійний складальний зазор і практично виключається зміщення кромок у процесі виконання прихваток.

Для рівномірного розподілу зусиль по периметру стику ручні центратори встановлюють у декількох місцях по колу обичайки. Між сусідніми центраторами додатково застосовують гвинтові стяжки, які усувають локальні розходження кромek, забезпечують щільне прилягання деталей та запобігають їх зміщенню під дією власної маси. Така схема дозволяє отримати рівномірну геометрію стику по всій довжині кільцевого з'єднання.

Після завершення центрування виконують прихватки, які остаточно фіксують взаємне положення обичайок перед автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Лише після перевірки співвісності секцій, величини складального зазору та відсутності зміщення кромek ручні центратори і гвинтові стяжки демонтують. Така послідовність операцій забезпечує стабільність геометричних параметрів стику та створює необхідні умови для формування якісного зварного з'єднання.

Застосування ручних центраторів і гвинтових стяжок є технічно доцільним саме для виготовлення проєктованого автоклава, оскільки дана оснастка має просту конструкцію, не потребує зовнішніх джерел енергії, легко монтується на обичайках великого діаметра, допускає багаторазове використання та забезпечує достатню точність складання для подальшого автоматичного зварювання під шаром флюсу.

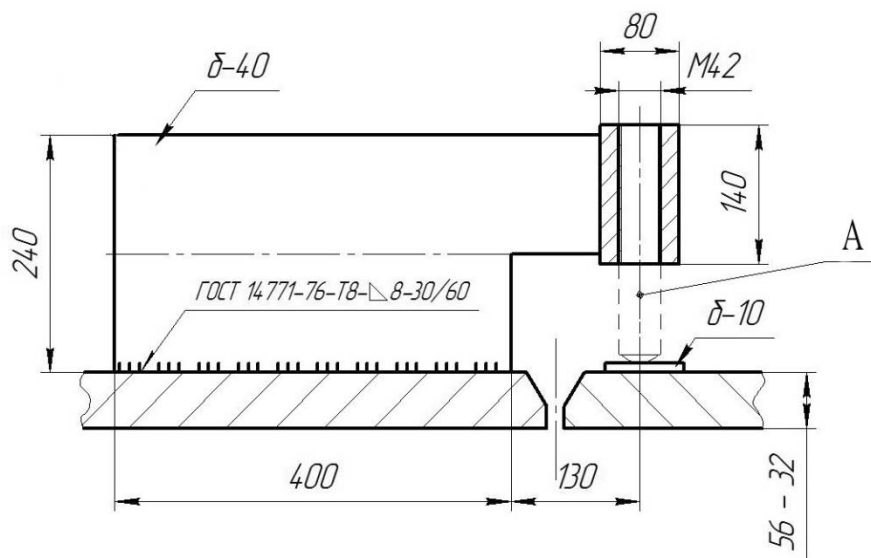


Рисунок 3.1 – Центратор

Корпус проектного автоклава являє собою вертикальну циліндричну посудину, що складається із шести обичайок діаметром 1000 мм із товщиною стінки 28 мм, верхнього еліптичного днища та нижньої опорної частини. Основними зварними з'єднаннями конструкції є поздовжні та кільцеві стикові шви, які після виготовлення працюють під дією внутрішнього тиску до 2 МПа. Саме тому до точності складання кромок перед автоматичним зварюванням під шаром флюсу висуваються підвищені вимоги.

Під час виготовлення обичайок найбільш відповідальною операцією є забезпечення співвісності двох суміжних секцій, витримування постійного складального зазору по всьому периметру стику та виключення взаємного зміщення кромок. Навіть незначне порушення положення деталей призводить до нерівномірної глибини проплавлення, зміни геометрії шва, виникнення додаткових залишкових напружень і збільшення обсягу виправних робіт після зварювання.

З урахуванням габаритів виробу, товщини металу та одиничного характеру виготовлення для складання кільцевих стиків обрано ручний приварний центратор у поєднанні з гвинтовими стяжками. Таке рішення забезпечує необхідну точність складання без застосування складних механізованих систем центрування та дозволяє використовувати одну й ту саму оснастку під час виготовлення всіх шести обичайок корпусу.

Ручний центратор складається з двох приварних опорних елементів, між якими встановлюється притискний гвинт. Після приварювання опор до зовнішньої поверхні обичайок обертанням гвинта забезпечують зближення кромок, їх суміщення та вирівнювання по висоті. Завдяки цьому досягається постійний складальний зазор і практично виключається зміщення кромок у процесі виконання прихваток.

Для рівномірного розподілу зусиль по периметру стику ручні центратори встановлюють у декількох місцях по колу обичайки. Між сусідніми центраторами додатково застосовують гвинтові стяжки, які усувають лока-

льні розходження кромок, забезпечують щільне прилягання деталей та запобігають їх зміщенню під дією власної маси. Така схема дозволяє отримати рівномірну геометрію стику по всій довжині кільцевого з'єднання.

Після завершення центрування виконують прихватки, які остаточно фіксують взаємне положення обичайок перед автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Лише після перевірки співвісності секцій, величини складального зазору та відсутності зміщення кромок ручні центратори і гвинтові стяжки демонтують. Така послідовність операцій забезпечує стабільність геометричних параметрів стику та створює необхідні умови для формування якісного зварного з'єднання.

Застосування ручних центраторів і гвинтових стяжок є технічно доцільним саме для виготовлення проєктованого автоклава, оскільки дана оснастка має просту конструкцію, не потребує зовнішніх джерел енергії, легко монтується на обичайках великого діаметра, допускає багаторазове використання та забезпечує достатню точність складання для подальшого автоматичного зварювання під шаром флюсу.

3.2 Розрахунок роликового стенду

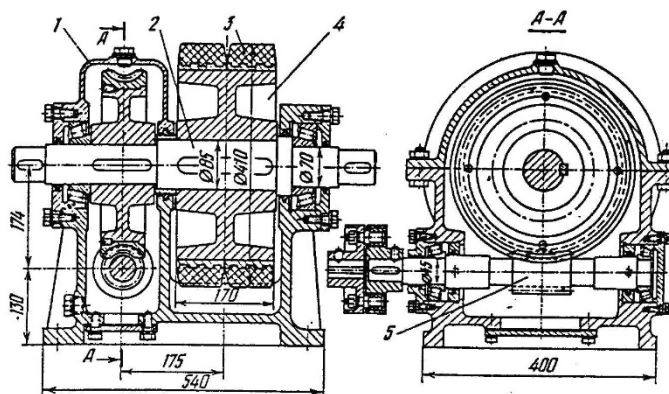
Одним із основних елементів складально-зварювального оснащення, що застосовується під час виготовлення корпусу автоклава, є роликовий стенд (обертач), наведений на рис. 3.2. Його основне призначення полягає у встановленні, підтримуванні та плавному обертанні корпусу автоклава під час виконання автоматичного зварювання кільцевих стикових швів під шаром флюсу. Обертання виробу із заданою кутовою швидкістю забезпечує сталість режимів зварювання, рівномірне формування зварного шва та створює сприятливі умови для отримання якісного проплавлення по всій довжині стику.

У проєкті прийнято роликовий стенд із приводною та перекидними холостими роликоопорами (рис. 3.5, 3.6). Використання перекидних роликоопор

пор дає можливість швидко переналагоджувати стенд для роботи з обичайками різного діаметра без заміни основних елементів конструкції. Така схема забезпечує універсальність оснащення, спрощує підготовку виробництва та скорочує тривалість складально-зварювальних операцій.

Конструкція роликового стенда забезпечує рівномірний розподіл навантаження між роликоопорами, стійке положення корпусу під час обертання та надійне зчеплення роликів із поверхнею виробу. Це зменшує імовірність прослизання, запобігає виникненню додаткових динамічних навантажень і сприяє стабільності процесу автоматичного зварювання.

Для вибору типорозміру роликового стенда виконують інженерний розрахунок, під час якого визначають відстань між роликоопорами, величину опорних реакцій, навантаження на приводні та холості ролики, необхідний діаметр валів роликоопор, потужність приводного електродвигуна та перевіряють запас зчеплення ролика з поверхнею виробу. Результати розрахунку використовують для обґрунтованого вибору стандартних роликоопор і приводу, що забезпечують надійну та безпечну роботу стенда під час виготовлення корпусу автоклава.



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

Рисунок 3.5 - Привідна роликоопора

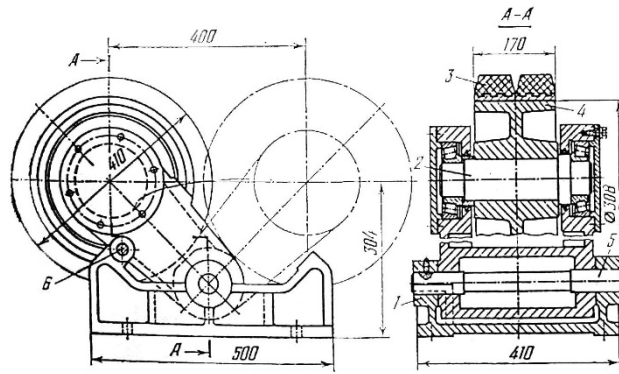


Рисунок 3.6 Холоста роlikоопора

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

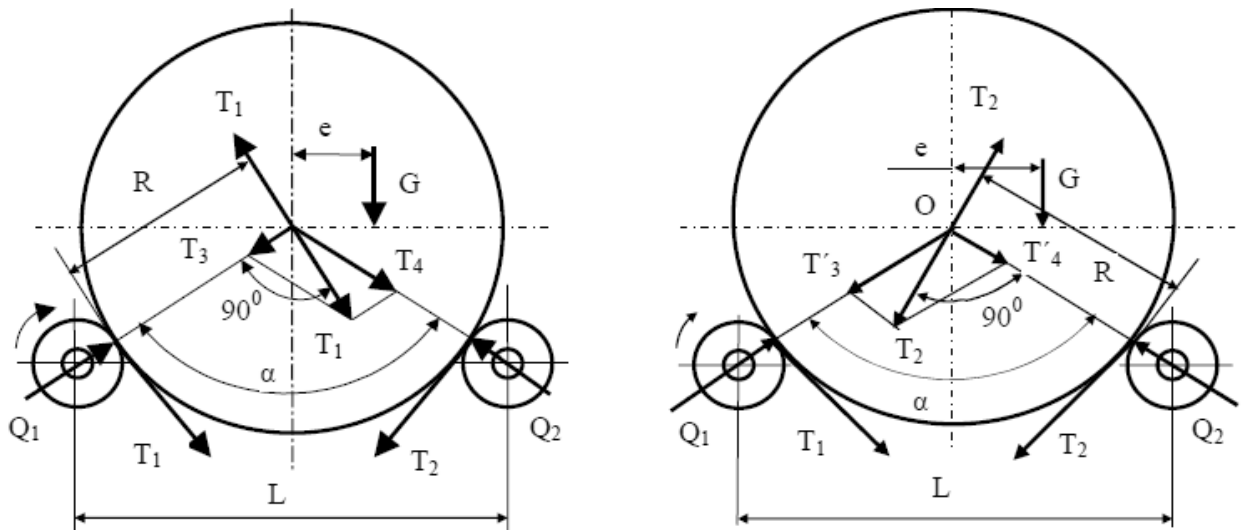


Рисунок 3.7 – Схема для розрахунку реакцій роlikових опор

Розрахуємо діаметр вала за книгою Карпенка [22]. Діаметр ролика приймемо 500 мм, вага виробу 8000 кг, три ряди роликів, діаметр вала під підшипник 80 мм; коефіцієнти тертя $f = 0,02$, для сталі $\mu = 0,08$, для гуми $\mu = 0,35$.

Використовуємо згідно методик основні залежності та схеми, рис. 3.5 [22]:

$$T_1 = G \left(E + \frac{E \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{b \sin \alpha + \cos \alpha - 1} \right), \quad b = \frac{D_p}{f d_p + 2\mu}$$

$$T_2 = G \frac{E + \sin \frac{\alpha}{2}}{b \sin \alpha + \cos \alpha - 1}, \quad Q_1 = \frac{G}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 - \frac{E \cdot \cos \alpha}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{E + \sin \frac{\alpha}{2}}{b \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2}} \right)$$

$$Q_2 = \frac{G}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 + \frac{E}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{E + \sin \frac{\alpha}{2}}{b \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2}} \right)$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{Q_1^2 + T_1^2}}{i_p} k_p, \quad P_2 = \frac{\sqrt{Q_2^2 + T_2^2}}{i_p} k_p,$$

На рисунках приведено графічні епюри навантажень. Результати розрахунків у програмі Ексель представлено у таблиці.

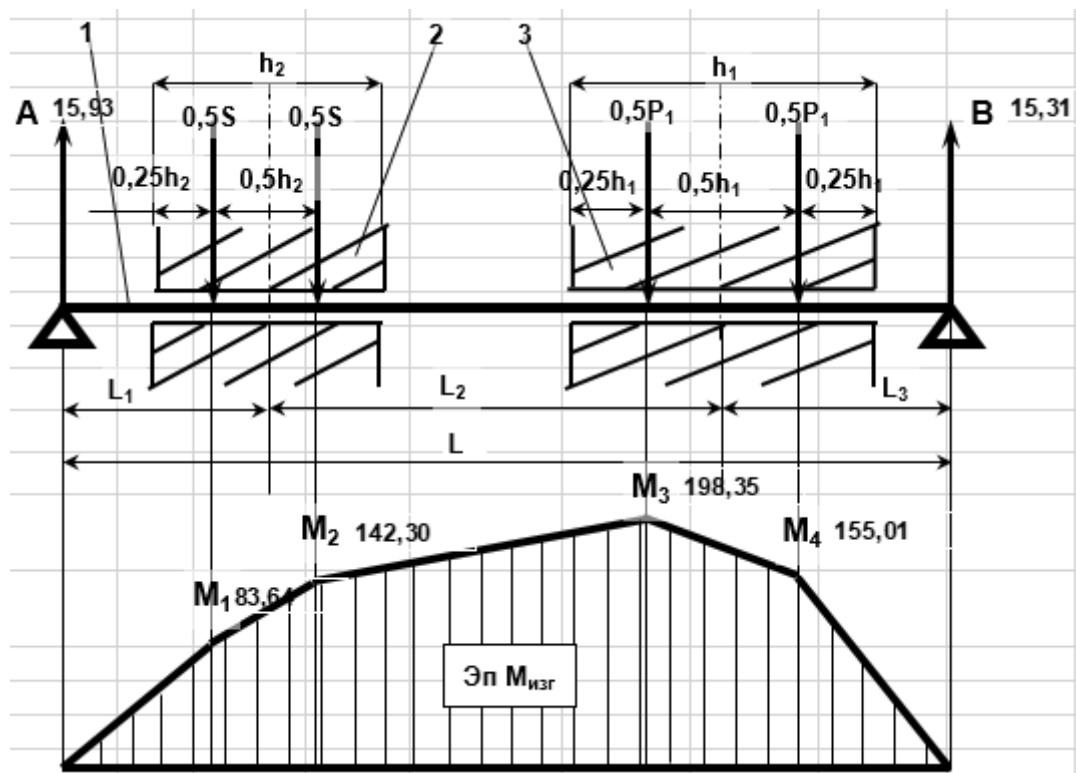


Рисунок 3.8 – Схема розрахунку привідного валу

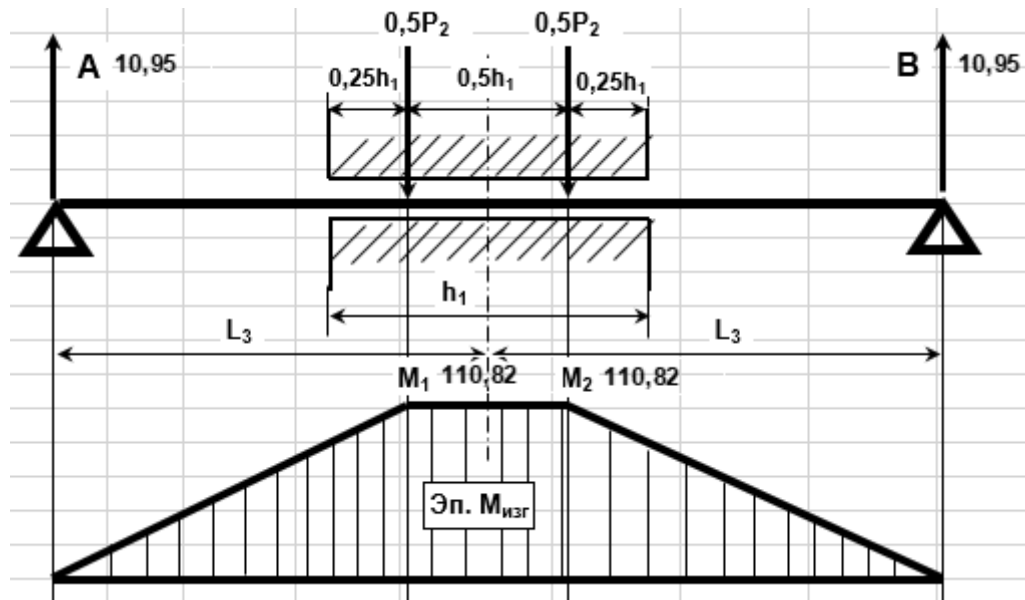


Рисунок 3.9 – Схема розрахунку холостого ролика

Таблиця 3.2 – Вихідні дані та результати розрахунку роликового стенду

Параметр	Значення
Діаметр ємності $D_{\min}$, мм	800
Діаметр ємності $D_{\max}$, мм	1200
Діаметр ролика D_r , мм	500
Мінімальний центральний кут, град	50
Максимальний центральний кут, град	120
Ексцентриситет e , мм	100
Маса автоклава, кг	8000
Коефіцієнт тертя в підшипниках роликоопор	0,02
Діаметр осі ролика d_r , см	8,00
Коефіцієнт тертя кочення m , см	0,30
Кількість роликоопор в одному ряду	4
Коефіцієнт нерівномірності навантаження K_p	1,3
Допустиме напруження для вала, кг/см^2	550,00
Частота обертання вала, об/хв	10,00
ККД приводного двигуна	0,40
Коефіцієнт зчеплення ролика з виробом	0,35
Розрахунок навантаження на роликоопори	
$L_{\min}$, мм	549
$L_{\max}$, мм	1472
Прийнята L , мм	1011
$L_{\min}$ з перекидною роликоопорою,	611

мм	
Lmax з перекидною роликоопорою, мм	1411
Мінімальний діаметр ємності, мм	205
Максимальний діаметр ємності, мм	2838
Дисбаланс	0,0625
Постійна b	65,8
Кут, град	102,1
T1, Н	6064,6
T2, Н	1064,6
Q1, Н	65998,7
Q2, Н	70042,2
P1, Н	20711,5
P2, Н	21890,7
Привідна роликоопора	РП-5
Перекидна холоста роликоопора	РХП-5
Розрахунок вала приводної роликоопори	
dч, см	28,8
S, Н	10529
Мкр, кН·см	176,80
Мекв, кН·см	265,71
Розрахунковий діаметр вала, см	7,85
Потужність на валу, кВт	1,81
Потужність двигуна, кВт	4,53
Запас зчеплення	3,81
Розрахунок вала холостої роликоопори	
Допустиме напруження на згин, кН/см ²	14
Розрахунковий діаметр вала, см	4,31

Згідно з проведеним розрахунком роликового стенда приймаємо привідну роликову опору РП-5 та перекидну холосту роликову опору РХП-5. Максимальне навантаження на одну привідну роликоопору становить 20,71 кН, а на одну холосту роликоопору — 21,89 кН, що не перевищує допустимого навантаження для обраного типорозміру роликоопор.

Розрахунковий діаметр вала приводної роликоопори становить 78,5 мм, тому конструктивно приймаємо стандартний діаметр 80 мм. Необхідна потужність приводного електродвигуна становить 4,53 кВт, тому для забезпечення надійної роботи стенда доцільно встановити стандартний електродвигун потужністю 5,5 кВт.

Розрахунковий діаметр вала холостої роликоопори становить 43,1 мм, тому конструктивно приймаємо стандартний діаметр 50 мм. Отриманий запас зчеплення приводного ролика з виробом 3,81 підтверджує відсутність прослизання роликів під час обертання корпусу автоклава та забезпечує стабільне виконання автоматичного зварювання кільцевих швів під шаром флюсу.

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Оцінка шкідливих факторів у спроектованому цеху та заходи щодо зменшення їх впливу

Виконання заготівельних, зварювальних та наплавлювальних робіт на машинобудівному підприємстві супроводжується дією небезпечних і шкідливих виробничих факторів. За недостатньої організації виробництва та недотримання вимог охорони праці вони можуть стати причиною виробничого травматизму, професійних захворювань та аварійних ситуацій.

Під час зварювання, наплавлення та термічного різання металів повітря робочої зони забруднюється зварювальним аерозолем, до складу якого входять дрібнодисперсний пил, оксиди металів, оксид вуглецю, оксиди азоту, озон, а також інші шкідливі гази та пари. Тривалий вплив таких речовин може призводити до розвитку професійних захворювань органів дихання, інтоксикацій, пневмоконіозів та інших патологічних змін в організмі працівників. Під час виконання зварювальних робіт працівники також зазнають впливу теплового, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, яке може спричиняти опіки шкіри, ушкодження органів зору та перегрівання організму. Негативний вплив на здоров'я чинять несприятливі параметри мікроклімату, підвищений рівень шуму і вібрації, а також електромагнітні поля, що виникають під час роботи електрозварювального обладнання, [23].

Особливу небезпеку становить можливість ураження електричним струмом унаслідок пошкодження ізоляції, несправності обладнання або порушення правил його експлуатації. Крім того, при виконанні наплавлювальних робіт існує ризик виникнення пожежі внаслідок розбризкування розплавленого металу, утворення іскор та контакту нагрітих деталей із горючими матеріалами. Для забезпечення електробезпеки всі корпуси зварювальних

джерел живлення, наплавлювальних установок, електродвигунів, шаф керування та іншого електрообладнання повинні бути надійно заземлені відповідно до вимог чинних нормативних документів НПАОП 40.1-1.32-01, НПАОП 40.1-1.21-98, НПАОП 0.00-1.71-13, ДСТУ EN ІЕС 60974-1:2022, ДСТУ EN ІЕС 60974-4:2023.. Опір захисного заземлення повинен відповідати встановленим нормам і періодично контролюватися.

Усе електрообладнання цеху повинно відповідати вимогам чинних правил улаштування електроустановок та правил їх безпечної експлуатації. Електричні установки мають бути забезпечені захисним заземленням, справною ізоляцією, пристроями автоматичного захисного відключення та засобами контролю технічного стану.

Підключення та відключення наплавлювального обладнання, його технічне обслуговування та ремонт повинні виконуватися лише електротехнічним персоналом, який має відповідну кваліфікацію. До виконання наплавлювальних робіт допускаються працівники, які пройшли навчання та інструктаж з охорони праці і мають групу з електробезпеки не нижче II.

Зварювальні кабелі повинні мати справну ізоляцію, бути захищеними від механічних пошкоджень, дії високих температур, бризок розплавленого металу та агресивних середовищ. Забороняється експлуатація кабелів із пошкодженою ізоляцією, а також виконання тимчасових з'єднань, що не відповідають вимогам безпеки.

У наплавлювальних цехах системи опалення, вентиляції та кондиціювання повинні забезпечувати нормативні параметри мікроклімату: температуру, відносну вологість, швидкість руху повітря та чистоту повітряного середовища. Найефективнішим способом захисту працівників від шкідливих виділень є застосування загальнообмінної та місцевої витяжної вентиляції безпосередньо в зоні утворення зварювального аерозолю. Для забезпечення ефективного видалення зварювального аерозолю місцева витяжна вентиляція приймається зі швидкістю відсмоктування повітря не менше 1,5 м/с відповід-

но до НПАОП 28.52-1.31-13 «Правила охорони праці під час зварювання металів».

Для зниження рівня шуму необхідно насамперед усувати причини його виникнення безпосередньо в джерелах шуму. Додатково застосовують звукопоглинальні та звукоізолювальні конструкції, захисні екрани, кожухи та інші інженерні засоби шумозахисту.

При роботі ручним механізованим інструментом рекомендується застосовувати віброзахисні рукавиці, спеціальні рукоятки та інші засоби індивідуального захисту. Для працівників, які контактують із джерелами вібрації, доцільно передбачати регламентовані 10–15-хвилинні перерви після кожної години роботи.

Для захисту працівників застосовують засоби індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт. Для захисту тіла використовують спеціальний одяг, куртки, комбінезони, рукавиці та спеціальне взуття з вогнестійких матеріалів. Захист органів дихання забезпечується респіраторами або системами подавання очищеного повітря під зварювальний щиток. Для захисту органів зору та шкіри обличчя від дії ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, сліпучої яскравості зварювальної дуги та бризок розплавленого металу використовують зварювальні маски або щитки зі світлофільтрами ступеня затемнення DIN 11–13.

Для захисту від виробничого шуму використовують протишумові вкладиші, навушники та шумозахисні шоломи. Для захисту від ураження електричним струмом застосовують діелектричні рукавиці, діелектричне взуття, ізольований інструмент, діелектричні килимки та інші електрозахисні засоби, які підлягають періодичним випробуванням і контролю.

У виробничих приміщеннях необхідно передбачати первинні засоби пожежогасіння, пожежні щити, вогнегасники відповідного типу та вільний доступ до шляхів евакуації. Робочі місця повинні утримуватися в чистоті, а

горючі матеріали необхідно розміщувати поза межами зон виконання зварювальних і наплавлювальних робіт.

4.2 Розрахунок штучного освітлення

Для роботи по виготовленню зварного з'єднання траверси з опорами при рівномірному розміщенні світильників загального освітлення і горизонтальної поверхні основним є, так званий, метод коефіцієнту використання світлового потоку.

Розрахунок проводиться за формулою:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot Z \cdot K_z}{N \cdot \eta}, \quad [24] \quad (4.1)$$

де Φ – світловий потік, потрібний для забезпечення заданої освітленості, ЛМ;

E_n – нормова освітленість, ЛК;

S – площа приміщення, м²;

Z (1,15) – коефіцієнт, що враховує відношення середньої освітленості;

K_z – коефіцієнт запасу, що приймається в залежності від забрудненості повітря в приміщенні, $K_z=1,5$;

N – кількість ламп;

η – коефіцієнт використання світлового потоку; Коефіцієнт використання світлового потоку η визначається за світлотехнічними таблицями. Для цього потрібно знайти індекс приміщення i та приблизно оцінити коефіцієнт відбивання поверхонь приміщення: I_c – стелі; I_{cm} – стін; I_p – робочої поверхні.

Індекс приміщення i знаходимо за формулою:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)}, \quad (4.2)$$

де S – площа ділянки цеху, м²;

h – розрахункова висота (відстань від світильника до робочої поверхні), м;

A і B – довжина і ширина приміщення, м;

$$i = \frac{80}{3,4 \cdot (8 + 10)} = 1,3$$

За таблицею знаходимо відповідні значення I : $I_c=70$ %; $I_{cm}=50$ %; $I_p=30$ %.

$$\Phi = \frac{300 \cdot 80 \cdot 1,15 \cdot 1,5}{0,65} = 63692,3 \text{ ЛМ.}$$

Необхідну кількість ламп визначаємо за формулою:

$$N = \frac{\Phi}{2 \cdot E_{\text{л}}}, \quad [25] \quad (4.3)$$

де $E_{\text{л}}$ – світловий потік лампи;

$$N = \frac{63692,3}{2 \cdot 2105} = 15 \text{ шт.}$$

Приймаємо 16 штук.

Для освітлення автомата використовуємо лампи ЛД-40-4, які мають наступні технічні характеристики:

- світловий потік – $E_{\text{л}}=2105$ ЛМ;
- довжина лампи – $L=1,213$ м;
- потужність – $P=40$ Вт;
- діаметр лампи – $d=0,04$.

Також використовуємо двохламповий світильник без перфорації з решіткою типу ЛДГ, що має такі характеристики: довжина – 1,3 м та ширина – 0,27 м.

Світильники розташовуємо в 2 ряди по вісім штук в кожному ряду. Відстань між рядами світильників розраховуємо за формулою:

$$L = \frac{8 - 2 \cdot 1,3}{2} = 2,7 \text{ м;}$$

$$L = \frac{10 - 8 \cdot 0,27}{8} = 0,98$$

ВИСНОВКИ

Проведено удосконалення технологічного процесу виготовлення автоклава для гідротермального синтезу оксидів. У базовій технології для автоматичного зварювання під шаром флюсу застосовується зварювальне обладнання попереднього покоління, конструкція якого має обмежені можливості точного регулювання та стабілізації параметрів процесу, що приводить до нерівномірного проплавлення, появу дефектів та зменшення ударної в'язкості зварного шва.

Для отримання вищих показників якості та бездефектності зварних з'єднань циліндричного корпусу автоклаву з товщиною стінки 28 мм було запропоновано використати марку сталі P355NH українського виробника Метінвест.

Впроваджено автоматичний дуговий спосіб зварювання під флюсом автоматичною зварювальною головкою ESAB A2SG J1 4WD з цифровим керуванням та з джерелом живлення ESAB LAF 635. Запропонована модернізація технологічного процесу забезпечила стабілізацію режимів зварювання, підвищення точності переміщення зварювальної головки та подачі електродного дроту, формування рівномірної геометрії шва і стабільної глибини проплавлення, зниження ймовірності утворення технологічних дефектів, підвищення продуктивності зварювального процесу та отримання зварних з'єднань із механічними властивостями, що відповідають вимогам до обладнання, яке працює під тиском.

Застосування єдиного комплексного стенду складання та зварювання на базі роликового обертача дозволило скоротити тривалість складально-зварювальних робіт, підвищити точність взаємного встановлення обичайок, забезпечити сталість режимів автоматичного зварювання та покращити якість зварних з'єднань під час виготовлення корпусу автоклава.

З метою якісної та швидкої підготовки кромки запропоновано використовувати установку різання, а складання обичайок проводити з допомогою центраторів і гвинтових стяжок.

Для зварювання кільцевих швів розраховано конструкцію роликового стенду на основі уніфікованих роликоопор.

Розроблено методики контролю якості конструкції та запропоновано прилади контролю.

Проаналізовані небезпеки на зварювальній ділянці та рекомендовано заходи покращення безпеки праці та виробничого освітлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сталь Р355NH. [Електронний ресурс] / ООО НВП «Арма проф» - Режим доступу: <https://arma-prof.com.ua/ru/products/stal-p275nl1-1-0488-2/>
2. 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.
3. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском : наказ Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018 № 333.
4. Про затвердження Технічного регламенту обладнання, що працює під тиском : Постанова Кабінету Міністрів України від 16 січня 2019 р. № 27. Офіційний вісник України. 2019. № 9. Ст. 313.
5. ДСТУ EN 13445-2:2022. Посудини, що працюють під тиском необігрівані. Частина 2. Матеріали. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
6. ДСТУ EN 13445-3:2022. Посудини, що працюють під тиском необігрівані. Частина 3. Конструкція. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
7. ДСТУ EN 13445-4:2022. Посудини, що працюють під тиском необігрівані. Частина 4. Виготовлення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
8. ДСТУ EN 13445-5:2022. Посудини, що працюють під тиском необігрівані. Частина 5. Перевірка та випробування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
9. ДСТУ EN ISO 15614-1:2019. Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталей і дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
10. ДСТУ EN ISO 9606-1:2018. Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 1. Сталі. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
11. ДСТУ EN ISO 5817:2022. Зварювання. Зварні з'єднання, виконані зва-

рюванням плавленням у сталі, нікелі, титані та їх сплавах. Рівні якості щодо недосконалостей. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

12. ДСТУ EN ISO 17635:2018. Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

13. 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

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

15. 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.

16. 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.

17. 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.

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

19. ESAB AB. *A2 Welding Heads. Instruction Manual for A2SF J1, A2SF J1 Twin, A2SG J1 and A2SG J1 4WD* [Electronic resource]. – Available at: <https://manuals.plus/m/0852ce74244f603d21b2ed97957012b4966880c125ab1a94e4dbe94963bd5488>

20. ESAB AB. DC Arc Power Sources LAF 635, LAF 1000, LAF 1250 and LAF 1600. Product Brochure. Gothenburg : ESAB AB. Режим доступу: <https://www.westermans.com/downloads/dc%20arc%20power%20source%20laf%20635%201000%201250%20and%201600%20%282%29.pdf>
21. Ультразвуковий дефектоскоп серії HARFANG VEO / Дефектоскопи . – Режим доступу: <http://defektoskop.com.ua/?p=298>
22. 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.
23. 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>.
24. Левченко О.Г. *Охорона праці у зварювальному виробництві*. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 181 с.
25. 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