

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій
(повна назва кафедри)

Тернопіль
2026

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробленню технологічного процесу виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення якості, надійності та технологічності виготовлення зварних корпусних конструкцій, які працюють в умовах внутрішнього тиску, температурних навантажень і повинні забезпечувати герметичність робочого об'єму.

У роботі розглянуто конструктивні особливості корпусу ємнісного підігрівача, який є основною складальною одиницею апарата та виконується у вигляді циліндричної зварної оболонки з листового прокату. Проаналізовано складові елементи виробу: обичайку, днища, патрубки, штуцери, фланцеві вузли, опори та допоміжні деталі. Встановлено, що конструкція корпусу є технологічно придатною для механізованого виготовлення, оскільки більшість його елементів мають осесиметричну форму та можуть оброблятися із застосуванням стандартного заготівельного, складального і зварювального обладнання.

Окрему увагу приділено вибору матеріалу корпусу. Для виготовлення основних деталей запропоновано застосування сталі 09Г2С, яка характеризується достатньою міцністю, пластичністю, доброю технологічністю та задовільною зварюваністю. Виконано аналіз технічних умов на виготовлення виробу, зокрема вимог до якості основного металу, підготовки кромek, складання деталей, виконання зварних з'єднань і контролю геометричних параметрів.

У технологічній частині проведено обґрунтування способів зварювання корпусу ВПЕГ-1,0. Встановлено, що для протяжних відповідальних стикових швів доцільно застосовувати автоматичне зварювання під флюсом, а для локальних вузлів складнішої форми — механізоване зварювання у середовищі захисних газів. Такий комбінований підхід дозволяє раціонально поєднати продуктивність, якість формування шва та технологічну гнучкість під час виготовлення корпусу.

Запропонований технологічний процес передбачає виконання вхідного контролю матеріалів, підготовку листового прокату, розкрій заготовок,

вальцювання обичайки, складання корпусу, зварювання поздовжніх і кільцевих швів, встановлення патрубків, штуцерів та опор, контроль якості зварних з'єднань, випробування на герметичність і завершальну антикорозійну обробку. Для підвищення стабільності якості передбачено використання складально-зварювальних пристосувань, шаблонів, центраторів і роликового обертача.

У конструкторській частині обґрунтовано застосування роликового обертача, який забезпечує рівномірне обертання корпусу під час складання, зварювання кільцевих швів, очищення та контролю. Використання такого пристрою дає змогу виконувати кільцеві з'єднання у зручному просторовому положенні, стабілізувати формування зварювальної ванни та зменшити вплив ручних операцій на якість виробу.

У розділі з безпеки життєдіяльності запропоновано технологічні й організаційні рішення спрямовані на підвищення якості виготовлення корпусу ємнісного підігрівача, зменшення трудомісткості операцій, покращення умов праці та забезпечення надійності готового виробу.

Ключові слова: ЄМНІСНИЙ ПІДІГРІВАЧ, КОРПУС, ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ, РОЛИКОВИЙ ОБЕРТАЧ, ЗВАРНА КОНСТРУКЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Опис та характеристика конструкції корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 ..	9
1.2 Характеристика матеріалу виробу.....	11
1.3 Технічні умови на виготовлення виробу	15
1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0.....	20
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	25
2.1 Обґрунтування способу зварювання корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0	25
2.3 Вибір методу контролю якості виробу	44
2.4 Опис запропонованого технологічного процесу	48
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	61
3.1 Вибір зварювальних пристосувань.....	61
3.2 Розрахунок роликового обертача для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0.....	64
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	69
4.1 Вимоги безпеки до виробничого процесу	69
4.2 Розрахунок природного освітлення цеху виготовлення рами вагона	71
ВИСНОВКИ.....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75
ДОДАТКИ.....	78

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку машинобудівного виробництва особливого значення набуває удосконалення технологічних процесів виготовлення металевих конструкцій та апаратів відповідального призначення. Це пов'язано з необхідністю підвищення якості продукції, зменшення витрат матеріалів та енергії, скорочення трудомісткості операцій, а також забезпечення стабільності експлуатаційних характеристик готових виробів. Для корпусних конструкцій теплообмінного обладнання, зокрема корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0, ці вимоги є особливо важливими, оскільки виріб працює в умовах дії внутрішнього тиску, температурних навантажень і потребує високої герметичності зварних з'єднань.

Розроблення раціонального технологічного процесу виготовлення корпусу ємнісного підігрівача передбачає комплексний аналіз конструкції виробу, властивостей основного металу, умов роботи апарата, типів зварних з'єднань, а також послідовності виконання заготівельних, складальних, зварювальних і контрольних операцій. Такий підхід дає змогу виявити недоліки традиційних способів виготовлення, зменшити вплив залишкових напружень і деформацій, забезпечити точність складання та стабільну якість зварних швів. Важливим етапом є також обґрунтований вибір обладнання, технологічного оснащення, режимів зварювання і методів контролю якості.

Сучасне зварювальне виробництво дедалі більше орієнтується на застосування механізованих та автоматизованих процесів, які дозволяють підвищити продуктивність праці й забезпечити повторюваність технологічних параметрів. Використання спеціалізованих складально-зварювальних пристроїв, позиціонерів, обертачів, механізованих зварювальних установок і потокових технологічних ліній дає змогу значно покращити умови праці, зменшити залежність якості виробу від людського чинника та забезпечити більш точне виконання операцій. Для виготовлення корпусу підігрівача це має важливе значення, оскільки циліндричні обичайки, днища, патрубки та інші елементи потребують точної взаємної орієнтації перед зварюванням. [1]

Зниження собівартості виготовлення виробу досягається не лише за рахунок підвищення продуктивності, а й завдяки раціональному використанню матеріалів, зменшенню кількості виправних операцій, скороченню витрат на контроль і усунення дефектів. Впровадження механізованих процесів у зварювальне виробництво сприяє формуванню якісних зварних з'єднань із стабільною геометрією шва, необхідною глибиною проплавлення та мінімальним рівнем дефектності. Крім того, застосування сучасного обладнання дозволяє знизити вимоги до виконання окремих ручних операцій, що позитивно впливає на організацію виробництва.

Важливу роль у забезпеченні надійності корпусу ємнісного підігрівача відіграє правильний вибір зварювальних матеріалів. Вони повинні забезпечувати необхідну міцність, пластичність і герметичність зварних з'єднань, а також зменшувати ризик утворення пор, тріщин, непроварів та інших дефектів. Оптимальний підбір електродного дроту, флюсу або захисного газового середовища дає змогу стабілізувати тепловий цикл зварювання, зменшити наводнення металу шва, покращити формування зварного валика та підвищити ефективність використання енергії.

Особливу увагу при виготовленні теплообмінних апаратів необхідно приділяти зварюванню важкодоступних і відповідальних з'єднань, зокрема в місцях приєднання патрубків, трубних елементів, фланців та інших конструктивних вузлів. Перспективним напрямом у цьому випадку є застосування спеціалізованих механізованих способів зварювання, зокрема планетарного зварювання, яке дозволяє забезпечити рівномірне формування шва по колу, стабільність режиму та високу якість з'єднання. Використання такого підходу під час виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 сприяє підвищенню надійності апарата, збільшенню його ресурсу та забезпеченню безпечної експлуатації в робочих умовах.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис та характеристика конструкції корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0

Ємнісні підігрівачі належать до теплообмінного обладнання, яке застосовується у технологічних системах для нагрівання рідких середовищ до заданої температури. Такі апарати використовують у промислових, енергетичних, комунальних та інших установках, де необхідно забезпечити стабільний теплообмін між робочим середовищем і теплоносієм. За конструктивним виконанням подібне обладнання має багато спільних ознак із кожухотрубними теплообмінниками, оскільки основними елементами є корпус, трубний пучок, патрубки, опорні вузли, фланцеві з'єднання, кришки та інші допоміжні деталі.

Корпус ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 (рис. 1.1) є однією з основних складальних одиниць апарата, оскільки саме він сприймає дію внутрішнього тиску, температурних навантажень і забезпечує герметичність робочого об'єму. Конструктивно корпус виконується у вигляді циліндричної зварної оболонки, сформованої з листового прокату. Обичайка може виготовлятися з одного або кількох листових елементів, які після вальцювання з'єднуються поздовжніми та кільцевими зварними швами. До торцевих частин корпусу приєднуються днища, кришки або фланцеві елементи, що забезпечують замикання внутрішнього простору та можливість монтажу інших вузлів підігрівача.



Рис. 1.1 — Ємнісний підігрівач ВПЕГ-1,0 [2]

До складу корпусу ємнісного підігрівача входять (рис. 1.2) патрубки для підведення і відведення робочого середовища, штуцери для встановлення контрольно-вимірювальних приладів, а також опорні елементи, які забезпечують правильне розміщення апарата під час монтажу та експлуатації. Залежно від конструктивного виконання підігрівач може мати нерухомі та рухомі опори. Нерухома опора фіксує положення апарата відносно фундаменту або монтажної рами, а рухома дає змогу компенсувати температурні деформації корпусу, які виникають у процесі нагрівання та охолодження.

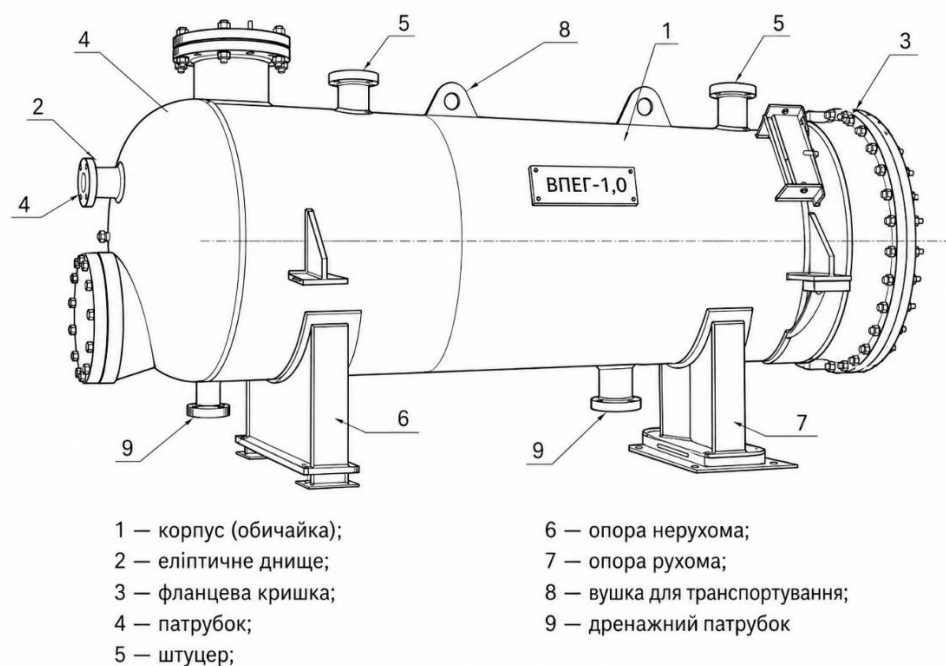


Рис. 1.2 — Схема ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 [2]

Внутрішня частина підігрівача містить трубний пучок, через який проходить теплоносій або робоче середовище. Труби закріплюються в трубних решітках шляхом розвальцювання, зварювання або комбінованим способом, що забезпечує герметичність з'єднання та стійкість до експлуатаційних навантажень. Трубні решітки можуть з'єднуватися з корпусом зварюванням або через фланцеві вузли, залежно від вимог до ремонтпридатності, герметичності та умов роботи апарата.

Кришки й днища теплообмінних апаратів найчастіше мають еліптичну, сферичну, конічну або плоску форму. Для корпусів, які працюють під тиском,

найбільш доцільним є застосування еліптичних або сферичних днищ, оскільки вони краще сприймають внутрішній тиск і дозволяють зменшити концентрацію напружень у зоні переходу від циліндричної обичайки до торцевої частини. З'єднання днищ з корпусом виконується кільцевими зварними швами, до якості яких висуваються підвищені вимоги, оскільки вони належать до відповідальних з'єднань апарата.

Конструкція корпусу ВПЕГ-1,0 є технологічно зручною для виготовлення, оскільки більшість його елементів мають циліндричну або осесиметричну форму. Це створює сприятливі умови для механізації основних операцій: правлення листового прокату, розкрою заготовок, вальцювання обичайок, складання, прихоплення, обертання та зварювання кільцевих швів. Використання обертачів, роликів опор, позиціонерів і спеціалізованих складально-зварювальних пристроїв дає змогу забезпечити точне взаємне розміщення деталей і стабільну якість зварних з'єднань.

Порівняно невеликі габаритні розміри корпусу підігрівача дають можливість раціонально підібрати обладнання для виконання заготівельних і зварювальних операцій без застосування надмірно складних виробничих засобів. Крім того, значна частина вузлів є типовою для теплообмінних апаратів, що дозволяє використовувати уніфіковані технологічні прийоми та стандартне оснащення. Це спрощує організацію виробництва, скорочує тривалість підготовчо-завершальних операцій і знижує загальну трудомісткість виготовлення.

1.2 Характеристика матеріалу виробу

Корпус ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 належить до відповідальних зварних конструкцій, які працюють під дією внутрішнього тиску, температурних навантажень і власної маси апарата. Водопідігрівачі типу ВПЕГ конструктивно виконуються як горизонтальні кожухотрубні теплообмінники, основними вузлами яких є корпус, змійовик, патрубки, опори, контрольно-вимірювальні прилади та запобіжна арматура. Для ВПЕГ-1,0 робоча місткість становить 1000 л, а загальна

місткість — 1180 л, що підтверджує належність апарата до ємнісного обладнання середньої місткості.

Під час вибору матеріалу для корпусу такого підігрівача необхідно враховувати не лише міцність металу, а й його технологічність під час виготовлення. Матеріал повинен добре піддаватися різанню, правленню, вальцюванню, механічній обробці та зварюванню. Особливо важливою є здатність сталі забезпечувати якісне формування зварних швів без утворення холодних тріщин, пор, непроварів і значних залишкових деформацій.

Для виготовлення корпусів ємнісних водопідігрівачів, теплообмінників, апаратів і посудин, що працюють під тиском, можуть застосовуватися такі групи матеріалів:

- вуглецеві конструкційні сталі — сталь 20 або СтЗсп. Вони мають добру зварюваність, достатню пластичність і порівняно невисоку вартість, тому можуть використовуватися для апаратів із помірними робочими параметрами;
- низьколеговані конструкційні сталі — зокрема 09Г2С, 16ГС, 17ГС. Такі сталі мають вищу міцність, кращу роботу при знижених температурах і достатню стійкість до дії експлуатаційних навантажень. Саме тому їх часто застосовують для відповідальних зварних корпусів, резервуарів, трубопровідних елементів і обладнання, що працює під тиском;
- корозійностійкі сталі — 12Х18Н10Т або її сучасні аналоги. Їх використовують тоді, коли апарат працює з агресивними середовищами або коли до внутрішньої поверхні висуваються підвищені вимоги щодо корозійної стійкості. Однак для звичайних систем гарячого водопостачання застосування таких сталей часто є економічно менш доцільним.

З урахуванням умов роботи корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0, а також необхідності забезпечення міцності, зварюваності, технологічності та економічності, найбільш раціональним матеріалом для виготовлення корпусних деталей можна прийняти конструкційну низьколеговану сталь 09Г2С. Ця сталь належить до сталей для зварних конструкцій і виробляється відповідно до вимог ДСТУ 8541.

Сталь 09Г2С широко застосовується для виготовлення листового і фасонного прокату підвищеної міцності, відповідальних зварних металоконструкцій, елементів апаратів, резервуарів, котлів, місткостей, трубопровідної арматури та корпусних деталей. Її використання для корпусу підігрівача ВПЕГ-1,0 є обґрунтованим, оскільки матеріал поєднує достатню міцність, пластичність, задовільну зварюваність і здатність працювати в широкому температурному інтервалі. За даними виробників металопродукції, вироби зі сталі 09Г2С можуть зберігати механічні властивості в інтервалі температур приблизно від -70 до +450 °С.

Із сталі 09Г2С для корпусу підігрівача виготовлятися такі основні деталі:

- циліндрична обичайка корпусу;
- еліптичні або плоскі днища;
- патрубки підведення та відведення середовища;
- штуцери для контрольно-вимірювальних приладів;
- підсилювальні накладки в місцях врізання патрубків;
- опорні елементи;
- фланцеві та перехідні деталі, якщо це передбачено конструкцією.

Хімічний склад сталі 09Г2С наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Хімічний склад сталі 09Г2С [3]

Назва елемента	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
Вміст, %	до 0,12	0,50–0,80	1,30–1,70	до 0,30	до 0,04	до 0,035	до 0,30	до 0,012	до 0,30

Наведений хімічний склад показує, що сталь 09Г2С має невисокий вміст вуглецю, завдяки чому зменшується схильність металу до утворення загартованих структур у зоні термічного впливу під час зварювання. Марганець підвищує міцність сталі та сприяє зв'язуванню сірки, зменшуючи її шкідливий вплив. Кремній виконує роль розкиснювача і додатково підвищує міцнісні властивості металу. Невеликі домішки нікелю, хрому та міді можуть позитивно впливати на

експлуатаційну стійкість сталі, однак їх кількість не є настільки значною, щоб суттєво ускладнювати процес зварювання.

Механічні властивості сталі 09Г2С наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Механічні властивості сталі 09Г2С [3]

Клас міцності	Товщина листового прокату, мм	Границя текучості σ_t , МПа	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Відносне подовження δ , %
325	10–20	325	450–470	не менше 21

Механічні властивості сталі 09Г2С є достатніми для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача. Границя текучості близько 325 МПа забезпечує здатність оболонки сприймати навантаження від внутрішнього тиску без появи недопустимих залишкових деформацій. Тимчасовий опір розриву на рівні 450–470 МПа характеризує достатній запас міцності матеріалу. Відносне подовження не менше 21 % свідчить про добру пластичність сталі, що є важливим під час вальцювання обичайки, формування днищ, складання корпусу та виконання зварювальних операцій.

Окремо необхідно оцінити зварюваність сталі, оскільки корпус підігрівача є зварною конструкцією. Зварюваність металу можна орієнтовно визначити розрахунковим шляхом за еквівалентом вуглецю. Цей показник враховує вплив основних легувальних елементів на схильність сталі до утворення холодних тріщин.

Еквівалент вуглецю визначаємо за формулою [4]:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

де C — вміст вуглецю, %;

Mn — вміст марганцю, %;

Cr — вміст хрому, %;

Ni — вміст нікелю, %;

Cu — вміст міді, %.

$$C_{\text{екв}} = 0,09 + \frac{1,30}{6} + \frac{0,30}{5} + \frac{0,30 + 0,30}{15} = 0,407\%$$

Отже: $C_{\text{екв}} \approx 0,41\%$.

Отримане значення еквівалента вуглецю свідчить, що сталь 09Г2С має задовільну зварюваність. При товщині прокату до 20 мм її можна зварювати без обов'язкового попереднього підігрівання, якщо дотримано раціональних режимів зварювання, виконано якісну підготовку кромek і застосовано відповідні зварювальні матеріали. Для відповідальних швів корпусу необхідно контролювати тепловкладення, не допускати надмірного перегріву металу та забезпечувати плавне формування зварного валика.

У технологічному процесі виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0 сталь 09Г2С є зручною для виконання основних операцій. Листовий прокат добре піддається розкрою, правленню та вальцюванню, що дозволяє виготовляти циліндричні обичайки з необхідною точністю. Матеріал має достатню пластичність для формування оболонки без появи тріщин і розшарувань. Після складання обичайки, днищ, патрубків і опор зварні з'єднання можуть виконуватися ручним дуговим, механізованим або автоматизованим способом залежно від типу шва, товщини металу та наявного обладнання.

1.3 Технічні умови на виготовлення виробу

Матеріали, які застосовуються для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0, повинні відповідати вимогам робочих креслень, стандартів і технічної документації на посудини, що працюють під тиском. Основний метал має забезпечувати необхідну міцність, пластичність, зварюваність, стійкість до утворення тріщин, а також збереження експлуатаційних властивостей у заданому температурному діапазоні.

Під час вибору матеріалу для корпусу необхідно враховувати робочий тиск, температуру середовища, характер навантаження, умови експлуатації, корозійну активність середовища та технологічні особливості виготовлення. Оскільки корпус підігрівача є зварною оболонковою конструкцією, особливу увагу слід приділяти здатності сталі якісно зварюватися без утворення холодних тріщин, непроварів і небезпечних дефектів у зоні термічного впливу.

Усі елементи, які приварюються до корпусу, зокрема патрубки, штуцери, опори, підсилювальні накладки, ребра жорсткості та монтажні елементи, повинні виготовлятися з матеріалів, сумісних з основним металом за зварюваністю і фізико-механічними властивостями. Бажано, щоб коефіцієнти лінійного розширення основного металу і приварюваних деталей були близькими, оскільки значна різниця між ними може спричинити появу додаткових температурних напружень у зоні зварних з'єднань.

Для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача доцільно використовувати конструкційну низьколеговану сталь 09Г2С або інший матеріал, передбачений кресленням і розрахунком на міцність. Матеріал повинен мати сертифікат якості, у якому зазначаються марка сталі, номер плавки, хімічний склад, механічні властивості, товщина прокату та результати випробувань. Використання металу без документального підтвердження його якості для відповідальних деталей корпусу не допускається.

Для зниження ризику утворення гарячих і холодних тріщин у зварних з'єднаннях необхідно обмежувати вміст шкідливих домішок. Вміст сірки та фосфору в основному металі не повинен перевищувати значень, передбачених стандартами на відповідну марку сталі. Для корпусних деталей, що працюють під тиском, доцільно приймати вміст сірки не більше 0,035 %, а фосфору — не більше 0,035 %. Це дозволяє підвищити пластичність металу, зменшити схильність до крихкого руйнування та покращити якість зварних швів.

Складання корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 повинно виконуватися відповідно до вимог робочого креслення, технологічного процесу та технічних умов. Перед складанням усі деталі необхідно перевірити за геометричними розмірами, станом поверхні, якістю підготовки кромки і відповідністю матеріалу. На поверхнях заготовок не допускаються тріщини, розшарування, глибокі риски, задири, забруднення, окалина, мастило та інші дефекти, які можуть негативно вплинути на якість зварювання.

Циліндрична обичайка корпусу після вальцювання повинна мати правильну форму без значних місцевих вм'ятин, овальності та перекосів. Поздовжні кромки

обичайки перед зварюванням мають бути суміщені з дотриманням допустимого зміщення. Зміщення кромок у стикових з'єднаннях не повинно перевищувати встановлених допусків, оскільки надмірне неспівпадіння кромок призводить до концентрації напружень, погіршення формування шва та зниження міцності з'єднання.

Під час складання обичайки з днищами необхідно забезпечити співвісність деталей, рівномірний зазор у стику та правильне положення торцевих кромок. Кільцеві стики повинні складатися без примусового деформування деталей, яке може спричинити появу залишкових напружень. Не допускається підтягування або виправлення елементів корпусу силовими методами, якщо це призводить до порушення геометрії обичайки чи днища.

Патрубки, штуцери та інші різні елементи встановлюють у попередньо підготовлені отвори корпусу або днищ. Їх положення повинно відповідати кресленню за координатами, кутом нахилу та висотою виступання. Перед приварюванням необхідно перевірити щільність прилягання патрубка до поверхні корпусу, правильність обробки кромок і наявність необхідного зазору під зварювання [5-8].

Особливу увагу слід приділяти складанню опорних елементів. Нерухома і рухома опори повинні розташовуватися у визначених місцях корпусу з урахуванням розподілу навантаження від маси апарата і температурного видовження під час експлуатації. Опори не повинні перекривати відповідальні стикові шви корпусу, а відстань від краю опори до найближчого зварного шва має відповідати вимогам технічної документації.

До стикових з'єднань, що визначають міцність корпусу підігрівача, належать поздовжні шви обичайок, кільцеві шви з'єднання секцій корпусу, шви приєднання днищ, а також стикові шви патрубків і перехідних елементів. Такі з'єднання повинні виконуватися з повним проплавленням і бути доступними для контролю якості.

Зварні з'єднання корпусу емнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 повинні забезпечувати міцність, герметичність і надійність апарата протягом усього

терміну експлуатації. При зварюванні обичайок між собою, приєднанні днищ до корпусу, а також виготовленні патрубків необхідно застосовувати стикові з'єднання з повним проплавленням. Виконання відповідальних швів з неповним проплавленням не допускається.

Кутові шви можуть застосовуватися для приварювання допоміжних елементів: опор, кронштейнів, підсилювальних накладок, ребер жорсткості та монтажних деталей. При цьому конструкція з'єднання повинна забезпечувати можливість візуального огляду, вимірювального контролю та, за потреби, проведення неруйнівного контролю.

Зварні шви повинні розташовуватися так, щоб вони не перекривалися опорами або іншими приварними деталями. Перекриття місць перетину швів не допускається, оскільки такі ділянки є зонами підвищеної концентрації напружень і можуть стати осередками утворення дефектів. Відстань між краєм шва корпусу та краєм шва приварного елемента повинна бути не меншою за товщину стінки корпусу, але не менше 20 мм [8-12].

У місцях з'єднання елементів різної товщини необхідно передбачати плавний перехід від товстішої деталі до тоншої. Такий перехід виконується шляхом поступового стоншування товщого елемента або за рахунок відповідної форми зварного шва. Кут скосу при переході між елементами різної товщини не повинен перевищувати 20° . Якщо різниця товщин деталей не перевищує 30 % товщини тоншого елемента, але не більше 5 мм, допускається виконувати зварювання без попереднього стоншування, за умови забезпечення плавного переходу металу шва.

Форма і розміри зварних швів повинні відповідати вимогам стандартів на зварні з'єднання або даним робочого креслення. Посилення стикових швів не повинно мати різких переходів, підрізів, напливів, кратерів, пор, тріщин та інших дефектів. Поверхня шва повинна бути рівномірною, з плавним переходом до основного металу.

Під час зварювання корпусу необхідно дотримуватися встановленої послідовності накладання швів. Це дозволяє зменшити залишкові деформації, запобігти викривленню обичайки та забезпечити стабільну геометрію корпусу. Для

кільцевих швів доцільно застосовувати роликові обертачі або позиціонери, які дозволяють виконувати зварювання у нижньому положенні та отримувати більш якісне формування шва.

Якість корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 повинна контролюватися на всіх етапах виготовлення: від вхідного контролю матеріалів до остаточного приймання готового виробу. Контроль має охоплювати перевірку матеріалу, геометричних розмірів, підготовки кромки, складання, зварювання, стану зварних швів, герметичності та зовнішнього вигляду виробу.

Геометричні розміри корпусу, обичайок, днищ, патрубків, фланців і опор повинні перевірятися вимірювальними засобами, точність яких забезпечує достовірність контролю. Вимірюванню підлягають довжина корпусу, діаметр обичайки, овальність, зміщення кромки, відхилення від прямолінійності, положення патрубків, відстань між опорами та інші параметри, передбачені кресленням [8-12].

Стан поверхонь основного металу і зварних з'єднань перевіряється візуальним оглядом. Не допускаються тріщини, розшарування, глибокі риси, подрізи, пропали, напливи, незаварені кратери, пори, шлакові включення та інші дефекти, що можуть знизити міцність або герметичність корпусу. Візуально також перевіряють наявність маркування, клейм зварників і відповідність розташування швів вимогам креслення.

Остаточний контроль корпусу проводять після завершення всіх зварювальних, термічних, механічних і контрольних операцій. Якщо конструкцією або технологією передбачена термічна обробка, неруйнівний контроль відповідальних зварних з'єднань необхідно виконувати після її завершення. Це дозволяє оцінити фактичний стан металу шва та зони термічного впливу після остаточного формування структури.

Під час виготовлення корпусу необхідно контролювати:

- відповідність основного металу і зварювальних матеріалів вимогам стандартів, технічних умов і робочого креслення;
- якість підготовки кромки під зварювання;

- правильність складання деталей і допустимість зміщення кромки;
- відповідність режимів зварювання технологічному процесу;
- якість виконання прихоплень і основних швів;
- відсутність недопустимих дефектів після зварювання;
- правильність розташування патрубків, штуцерів, опор і підсилювальних елементів;
- герметичність корпусу після остаточного складання.

1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0

Корпус ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 є відповідальною зварною конструкцією, яка працює під дією внутрішнього тиску, температурних навантажень і маси робочого середовища. Тому технологічний процес його виготовлення повинен забезпечувати не лише отримання заданої геометричної форми, а й високу якість зварних з'єднань, герметичність, міцність та надійність апарата в експлуатації. Згідно з технічними вимогами до подібних корпусних апаратів, під час виготовлення необхідно враховувати властивості матеріалу, умови роботи, зварюваність, корозійну стійкість, допустиме зміщення кромки, вимоги до повного проплавлення швів і можливість подальшого контролю якості.

Базовий технологічний процес виготовлення корпусу такого типу зазвичай складається з таких основних етапів: вхідний контроль матеріалів, підготовка листового прокату, розкрій заготовок, вальцювання обичайки, складання корпусу, зварювання поздовжніх і кільцевих швів, встановлення патрубків та штуцерів, приварювання опор, контроль якості зварних з'єднань, випробування на герметичність, очищення, ґрунтування і фарбування готового виробу. Кожна з цих операцій безпосередньо впливає на кінцеву якість корпусу, тому порушення технологічної послідовності або недостатня точність виконання окремих переходів може призвести до появи дефектів.

На початковому етапі здійснюють приймання та перевірку матеріалів. Для виготовлення корпусу використовують листовий прокат, днища, трубні заготовки для патрубків, фланці, опорні елементи та зварювальні матеріали. Під час вхідного контролю перевіряють сертифікати якості, марку сталі, товщину прокату, стан поверхні та відсутність дефектів у вигляді тріщин, розшарувань, глибоких рисок, корозійних пошкоджень або інших недопустимих відхилень. Цей етап є важливим, оскільки застосування матеріалу з прихованими дефектами може знизити надійність корпусу та ускладнити виконання зварювальних робіт.

Після вхідного контролю виконують підготовку листового металу. Листи очищають від забруднень, окалини та слідів мастила, після чого проводять розмічання і розкрій заготовок для обичайки, підсилювальних накладок, елементів опор та інших деталей. У базовому процесі ці операції часто виконуються із застосуванням універсального обладнання або ручного розмічання, що знижує точність повторення розмірів і збільшує залежність якості від кваліфікації працівника.

Циліндрична обичайка корпусу виготовляється шляхом вальцювання листової заготовки до заданого діаметра. Після вальцювання суміщають поздовжні кромки, перевіряють величину зазору, співпадіння кромок, овальність і прямолінійність твірної. У разі недотримання точності формування обичайки виникають труднощі під час зварювання поздовжнього шва та подальшого складання з днищами. Надмірна овальність або нерівномірний зазор у стику призводять до збільшення залишкових напружень, погіршення формування шва і потреби в додатковому правленні.

Поздовжній шов обичайки є одним із найбільш відповідальних з'єднань корпусу. Він повинен виконуватися з повним проплавленням, оскільки сприймає навантаження від внутрішнього тиску. Після зварювання обичайку перевіряють за геометрією, а за потреби виконують калібрування або місцеве правлення. У базовій технології ця операція часто є трудомісткою, оскільки деформації після зварювання не завжди компенсуються правильно підібраною послідовністю накладання швів.

Наступним етапом є складання обичайки з днищами. Днища встановлюють на торці корпусу з дотриманням співвісності, рівномірності зазору і допустимого зміщення кромки. Кільцеві шви з'єднання днищ з обичайкою також належать до відповідальних і повинні мати повне проплавлення. У базовому процесі складання часто виконується за допомогою прихоплень і простих пристроїв, що не завжди забезпечує стабільну точність положення деталей. Через це можливі перекося днищ, нерівномірне зміщення кромки і порушення загальної геометрії корпусу.

Після формування основної оболонки корпусу виконують операції з виготовлення та встановлення патрубків, штуцерів і фланцевих елементів. Для цього на поверхні корпусу розмічають місця врізання, вирізають отвори, обробляють кромки та встановлюють трубні деталі відповідно до креслення. Цей етап є одним із найбільш відповідальних, оскільки патрубки повинні бути точно зорієнтовані за висотою, кутом нахилу та положенням відносно осі корпусу. Помилки під час їх встановлення можуть ускладнити монтаж підігрівача в трубопровідній системі та викликати додаткові напруження в місцях приєднання.

Опорні елементи приварюють після остаточного формування корпусу. Для горизонтального підігрівача зазвичай передбачають нерухому та рухому опори. Їх призначення полягає в утриманні апарата у робочому положенні, передаванні навантаження на фундамент або раму та компенсації температурного видовження корпусу. У базовій технології недоліком може бути недостатньо точне позиціонування опор, що призводить до нерівномірного розподілу навантаження, перекося апарата або появи додаткових напружень у зонах приварювання.

Після завершення зварювальних робіт проводять контроль якості. Спочатку виконують візуальний і вимірювальний контроль, під час якого перевіряють зовнішній вигляд швів, розміри валика, наявність підрізів, напливів, кратерів, пор, тріщин і відповідність геометричних параметрів кресленню. Для відповідальних стикових швів доцільно застосовувати ультразвуковий контроль, а для зон приварювання патрубків і штуцерів — капілярний або магнітопорошковий метод. Остаточну перевірку корпусу проводять гідравлічним випробуванням, яке підтверджує його міцність і герметичність.

Завершальними операціями є очищення поверхні, видалення бризок металу, зачищення швів у межах допустимих вимог, ґрунтування, фарбування, маркування та підготовка виробу до транспортування. На цьому етапі формується остаточний зовнішній вигляд корпусу, забезпечується його захист від корозії та перевіряється комплектність виробу.

Аналіз базового технологічного процесу показує, що він є придатним для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0, однак має певні недоліки, які знижують його ефективність.

Першим недоліком є значна частка ручних операцій під час розмічання, складання, прихоплення, встановлення патрубків і контролю положення деталей. Це підвищує трудомісткість виготовлення та збільшує залежність якості від кваліфікації робітників.

Другим недоліком є недостатнє застосування спеціалізованого складально-зварювального оснащення. За відсутності центрувальних пристроїв, кондукторів, шаблонів і фіксаторів складніше забезпечити точну геометрію корпусу, рівномірні зазори у стиках і правильне розташування патрубків.

Третім недоліком є можливість виникнення зварювальних деформацій. Нерівномірне тепловкладення під час виконання поздовжніх, кільцевих і кутових швів може спричинити овальність обичайки, місцеві викривлення, зміщення патрубків і порушення співвісності днищ.

Четвертим недоліком є недостатній рівень механізації зварювання кільцевих швів. Якщо корпус не обертається на роликів опорах або обертачах, важче підтримувати стабільне положення зварювальної ванни, однакову швидкість зварювання і рівномірне формування шва.

Для підвищення ефективності виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 доцільно передбачити комплекс технологічних удосконалень, спрямованих на підвищення точності, продуктивності та якості зварних з'єднань.

Перш за все, необхідно підвищити рівень механізації заготівельних операцій. Розкрій листового прокату доцільно виконувати на машинах плазмового або лазерного різання з числовим програмним керуванням. Це дозволить підвищити

точність заготовок, зменшити припуски на подальшу обробку, скоротити кількість відходів металу та забезпечити кращу якість кромek під зварювання.

Для виготовлення обичайки доцільно застосовувати сучасні листозгинальні або вальцювальні машини з можливістю точного регулювання радіуса згинання. Це дозволить зменшити овальність корпусу, скоротити обсяг правлення після вальцювання та забезпечити кращу підготовку обичайки до зварювання поздовжнього шва.

На етапі складання необхідно використовувати спеціалізовані складальні пристрої, шаблони, центратори та фіксатори. Їх застосування дасть змогу забезпечити правильне взаємне положення обичайки, днищ, патрубків, штуцерів і опор. Це особливо важливо для корпусу підігрівача, оскільки точність розташування патрубків впливає на подальший монтаж апарата у трубопровідній системі.

Для зварювання поздовжніх і кільцевих швів доцільно застосовувати механізоване зварювання в середовищі захисних газів або автоматичне зварювання під флюсом. Такі способи забезпечують стабільність режимів, рівномірне формування шва, високу продуктивність і зниження впливу людського чинника. Кільцеві шви доцільно виконувати на роликівих обертачах, що дозволяє зварювати їх у нижньому положенні та забезпечувати сталі умови формування зварного з'єднання.

Для зменшення зварювальних деформацій необхідно розробити раціональну послідовність накладання швів. Доцільно застосовувати симетричне зварювання, попереднє прихоплення з контролем геометрії, обмеження надмірного тепловкладення та проміжний контроль після виконання відповідальних операцій. Це дозволить зменшити овальність корпусу, перекося днищ і зміщення патрубків.

Контроль якості також доцільно вдосконалити шляхом поєднання візуального, вимірювального та неруйнівного контролю на проміжних етапах. Виявлення дефектів одразу після виконання окремих операцій дозволяє усунути їх до переходу на наступну стадію виробництва, що зменшує витрати часу і матеріалів на виправлення браку.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування способу зварювання корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0

Вибір раціонального способу зварювання є одним із визначальних етапів розроблення технологічного процесу виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0. Це пояснюється тим, що корпус апарата є відповідальною зварною конструкцією, яка під час експлуатації працює під дією внутрішнього тиску, температурних перепадів, власної маси та навантажень від приєднаних трубопроводів. Тому зварні з'єднання повинні забезпечувати не лише механічну міцність, а й повну герметичність робочого об'єму.

Конструкція корпусу підігрівача включає циліндричну обичайку, торцеві днища, патрубки для підведення і відведення середовища, штуцери, фланцеві елементи, опори та підсилювальні накладки. З технологічної точки зору всі зварні з'єднання корпусу можна умовно поділити на дві групи. До першої належать протяжні відповідальні стикові шви — поздовжній шов обичайки, кільцеві шви з'єднання обичайки з днищами та, за наявності кількох секцій, шви між окремими обичайками. До другої групи належать локальні з'єднання складнішої форми: приварювання патрубків, штуцерів, опор, накладок і допоміжних елементів.

Під час вибору способу зварювання необхідно враховувати марку основного металу, товщину стінки корпусу, довжину швів, доступність місць зварювання, вимоги до герметичності, можливість механізації процесу, продуктивність, витрати зварювальних матеріалів і стабільність якості. Для корпусу ВПЕГ-1,0 доцільним є застосування сталі 09Г2С, яка належить до низьколегованих конструкційних сталей і характеризується задовільною зварюваністю. Такий матеріал допускає використання різних дугових способів зварювання, однак для досягнення високої якості та продуктивності необхідно вибрати найбільш технологічно обґрунтований варіант.

Для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача можуть бути застосовані такі способи зварювання:

- I. ручне дугове;
- II. механізоване зварювання у захисних газах;
- III. автоматичне під флюсу.

I. Ручне дугове зварювання покритими електродами є традиційним і достатньо універсальним способом з'єднання сталевих деталей. Джерелом теплоти при цьому є електрична дуга, яка горить між електродом і виробом. У процесі зварювання розплавляються кромки деталей і металевий стрижень електрода, а покриття електрода утворює газо-шлаковий захист зварювальної ванни від дії кисню та азоту повітря.

Перевагою цього способу є простота обладнання, мобільність, можливість виконання робіт у різних просторових положеннях і придатність для зварювання коротких швів у важкодоступних місцях. Ручне дугове зварювання може застосовуватися при ремонтних роботах, виконанні окремих прихоплень або у випадках, коли використання механізованого обладнання є неможливим [13].

Однак для виготовлення основних зварних з'єднань корпусу ВПЕГ-1,0 цей спосіб не є раціональним. Поздовжні та кільцеві шви корпусу мають значну протяжність і повинні забезпечувати стабільне проплавлення по всій довжині. При ручному зварюванні якість шва значною мірою залежить від досвіду зварника, сталості довжини дуги, швидкості переміщення електрода та правильності ведення шва. Крім того, після кожного проходу необхідно видаляти шлак, що збільшує тривалість операції та підвищує трудомісткість процесу.

Таблиця 2.1 — Оцінка ручного дугового зварювання для виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0

Переваги способу	Обмеження способу
Простота обладнання	Низька продуктивність при довгих швах
Можливість роботи у важкодоступних місцях	Значна залежність якості від кваліфікації зварника
Придатність для ремонту та прихоплень	Потреба у видаленні шлаку після кожного проходу
Можливість зварювання у різних положеннях	Нестабільність геометрії шва на протяжних ділянках
Невеликі витрати на обладнання	Висока трудомісткість при виготовленні корпусу

II. Механізоване зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів є більш продуктивним способом порівняно з ручним дуговим зварюванням. У цьому процесі електродний дріт подається в зону дуги безперервно, що забезпечує рівномірне формування шва і зменшує перерви в роботі. Захист розплавленого металу здійснюється потоком газу, який ізолює зварювальну ванну від атмосферного повітря [13].

Для зварювання корпусних деталей зі сталі 09Г2С доцільно використовувати МАG-процес із суцільним дротом.

Для корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 механізоване зварювання в захисних газах найбільш доцільно застосовувати для вузлів складної конфігурації. До таких з'єднань належать шви приварювання патрубків, штуцерів, підсилювальних накладок, опор і фланцевих деталей. Ці елементи часто мають криволінійну форму, невелику довжину шва або обмежений доступ, тому застосування автоматичного зварювання під флюсом для них є ускладненим.

Перевагою МАG-зварювання є добра керованість процесу, можливість виконання кутових і кільцевих швів невеликого діаметра, відсутність шлакової кірки та достатньо висока продуктивність. Разом із тим цей спосіб потребує якісної підготовки поверхні, стабільної подачі дроту та надійного газового захисту. Порушення газового потоку, наявність протягів або забруднення кромки можуть призвести до появи пор, нестабільного горіння дуги та погіршення зовнішнього вигляду шва.

Таблиця 2.2 — Оцінка механізованого МАG-зварювання для корпусу ВПЕГ-1,0

Переваги способу	Обмеження способу
Вища продуктивність порівняно з ручним зварюванням	Чутливість до протягів і порушення газового захисту
Безперервна подача електродного дроту	Необхідність якісного очищення кромки
Добре формування коротких і кутових швів	Потреба у газовому обладнанні
Відсутність флюсового шлаку	Менша ефективність для дуже довгих стикових швів
Зручність для патрубків, штуцерів і опор	Потрібне точне налаштування режимів

Механізоване МАG-зварювання є доцільним для локальних вузлів корпусу підігрівача, однак для основних протяжних стикових швів воно поступається автоматичному зварюванню під флюсом за стабільністю проплавлення, продуктивністю та економічністю.

III. Автоматичне зварювання під флюсом є найбільш ефективним способом для виконання довгих стикових швів корпусних оболонкових конструкцій. У цьому процесі електрична дуга горить між електродним дротом і виробом під шаром гранульованого флюсу. Флюс виконує кілька функцій: захищає розплавлений метал від атмосферного впливу, стабілізує дуговий процес, сприяє формуванню металу шва з необхідними властивостями та утворює шлакову кірку, яка уповільнює охолодження зварного з'єднання [13].

Для корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 цей спосіб є найбільш доцільним для виконання відповідальних стикових швів. Поздовжній шов обичайки та кільцеві шви приєднання днищ мають значну довжину, повинні забезпечувати повне проплавлення і стабільну герметичність. Саме ці умови найкраще відповідають можливостям автоматичного зварювання під флюсом.

Основними перевагами цього способу є висока продуктивність, глибоке проплавлення, рівномірне формування валика, низькі втрати металу на розбризкування та мінімальний вплив людського чинника. Автоматизована подача дроту і стабільне переміщення зварювальної головки дозволяють отримати шов із повторюваними геометричними параметрами по всій довжині. Це особливо важливо для корпусу, який після виготовлення підлягає контролю герметичності та випробуванню тиском.

Кільцеві шви корпусу доцільно виконувати на роликівих обертачах або спеціалізованих зварювальних стендах. При цьому корпус обертається з установленою швидкістю, а зварювальна головка залишається у стабільному положенні. Така схема дозволяє виконувати зварювання переважно в нижньому положенні, що покращує формування шва, зменшує ймовірність підрізів, напливів, непроварів і нерівномірності валика.

Автоматичне зварювання під флюсом доцільно застосовувати для таких з'єднань корпусу:

- поздовжній стиковий шов циліндричної обичайки;
- кільцеві стикові шви між секціями корпусу, якщо корпус складається з кількох обичайок;
- кільцеві шви приєднання днищ до циліндричної частини;
- інші протяжні стикові з'єднання з достатнім доступом для встановлення зварювальної головки.

Таблиця 2.3 — Оцінка зварювання під флюсом для корпусу ВПЕГ-1,0

Переваги способу	Обмеження способу
Висока продуктивність при довгих швах	Обмежене застосування для коротких і складних швів
Значна глибина проплавлення	Потреба у спеціалізованому обладнанні
Стабільні параметри шва	Необхідність сушіння та правильного зберігання флюсу
Мінімальне розбризкування металу	Переважає виконання у нижньому положенні
Менший вплив людського чинника	Потреба у видаленні шлакової кірки
Добра якість зовнішнього формування шва	Менша гнучкість порівняно з MAG-зварюванням

З урахуванням конструкції корпусу, характеру відповідальних швів і вимог до герметичності автоматичне зварювання слід прийняти як основний спосіб для виконання протяжних стикових з'єднань.

Для остаточного вибору технології доцільно порівняти розглянуті способи за основними критеріями, які мають значення для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача.

Порівняння показує, що для виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0 недоцільно обмежуватися одним способом зварювання. Корпус має як протяжні відповідальні шви, так і локальні вузли складної форми. Тому найбільш раціональним є застосування комбінованої технологічної схеми, у якій кожен спосіб використовується там, де він має найбільшу ефективність

Таблиця 2.4 — Порівняльна характеристика способів зварювання

<i>Критерій</i>	<i>Ручне дугове зварювання</i>	<i>MAG-зварювання</i>	<i>Автоматичне зварювання під флюсом</i>
Продуктивність	Низька	Середня або висока	Висока
Стабільність якості	Залежить від зварника	Достатньо стабільна	Висока
Доцільність для довгих стикових швів	Низька	Середня	Найвища
Доцільність для патрубків і опор	Можлива	Найбільш доцільна	Обмежена
Глибина проплавлення	Середня	Середня	Значна
Рівень механізації	Низький	Середній	Високий
Обсяг післязварювальної зачистки	Значний	Помірний	Помірний
Вплив людського чинника	Високий	Середній	Низький
Загальна доцільність	Допоміжний спосіб	Для локальних вузлів	Для основних швів корпусу

Для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 доцільно прийняти таку схему:

Таблиця 2.5 — Вибір способу зварювання для елементів корпусу ВПЕГ-1,0

<i>Елемент корпусу</i>	<i>Характер з'єднання</i>	<i>Прийнятий спосіб зварювання</i>
Поздовжній шов обичайки	Стиковий шов з повним проплавленням	Автоматичне зварювання під флюсом
Кільцеві шви між обичайками	Стикові кільцеві шви	Автоматичне зварювання під флюсом
З'єднання днищ з обичайкою	Кільцеві стикові шви	Автоматичне зварювання під флюсом
Патрубки та штуцери	Кільцеві, кутові або стикові шви	Механізоване MAG-зварювання
Підсилювальні накладки	Кутові шви	Механізоване MAG-зварювання
Опори корпусу	Кутові або напусткові шви	Механізоване MAG-зварювання
Прихоплення, короткі допоміжні шви	Короткі з'єднання	MAG-зварювання

Використання такої комбінованої технології дозволяє забезпечити високу якість основних стикових швів і водночас зберегти технологічну гнучкість під час зварювання патрубків, опор та інших елементів складної форми. Автоматичне зварювання під флюсом забезпечує продуктивність і стабільність при виконанні протяжних швів, а MAG-зварювання дає змогу якісно виконувати локальні з'єднання з різною просторовою орієнтацією.

Оскільки корпус ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 виготовляється зі сталі 09Г2С, зварювальні матеріали повинні забезпечувати отримання металу шва з міцнісними та пластичними властивостями не нижчими за властивості основного металу. Крім того, вони мають забезпечувати стабільне горіння дуги, якісне формування шва, достатню глибину проплавлення та мінімальну схильність до утворення пор і тріщин.

Для виконання основних протяжних стикових швів корпусу, зокрема поздовжнього шва обичайки та кільцевих швів приєднання днищ, доцільно застосувати автоматичне зварювання під флюсом із використанням комбінації ESAB OK Autrod 12.22 + ESAB OK Flux 10.71L. Такий комплект є сучасним аналогом традиційних матеріалів типу Св-08Г2С + АН-348А і забезпечує стабільне формування шва при зварюванні конструкційних та низьколегованих сталей.

Зварювальний дріт OK Autrod 12.22 характеризується стабільною подачею, добрим формуванням металу шва та придатністю до роботи з різними флюсами. Флюс OK Flux 10.71L виконує функцію захисту зварювальної ванни від атмосферного впливу, стабілізує дуговий процес, сприяє формуванню щільного металу шва та забезпечує добрі показники ударної в'язкості. Перед застосуванням флюс необхідно зберігати в сухих умовах і, за потреби, просувувати відповідно до рекомендацій виробника, оскільки надмірна вологість флюсу може спричинити пористість металу шва [14-16].

Для зварювання патрубків, штуцерів, опор, підсилювальних накладок та інших локальних елементів корпусу доцільно застосувати механізоване MAG-зварювання дротом ESAB OK AristoRod 12.50 у газовій суміші M21 — Ar + 18 % CO₂. Такий дріт забезпечує стабільне горіння дуги, рівномірне формування кутових

і кільцевих швів, зменшене розбризкування металу та менший обсяг післязварювальної зачистки. Газова суміш $Ar + CO_2$ порівняно з чистим CO_2 покращує стабільність процесу, зовнішній вигляд шва та знижує ймовірність утворення дефектів.

Таблиця 2.6 — Рекомендовані зварювальні матеріали для корпусу ВПЕГ-1,0

<i>Елемент конструкції</i>	<i>Спосіб зварювання</i>	<i>Рекомендовані матеріали</i>
Поздовжній шов обичайки	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71L
Кільцеві шви корпусу	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71L
Приварювання днищ до обичайки	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71L
Патрубки і штуцери	MAG-зварювання	ESAB OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/ CO_2
Опори корпусу	MAG-зварювання	ESAB OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/ CO_2
Підсилювальні накладки	MAG-зварювання	ESAB OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/ CO_2

Такий вибір забезпечує високу якість зварних з'єднань, стабільність процесу, добру герметичність корпусу та зменшення трудомісткості післязварювальної обробки.

Під час виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 застосовуються декілька типів зварних з'єднань. Основними відповідальними з'єднаннями є стикові шви циліндричної обичайки та кільцеві шви приварювання днищ до корпусу. Такі з'єднання повинні виконуватися з повним проплавленням, оскільки вони сприймають навантаження від внутрішнього тиску та забезпечують герметичність апарата.

Для приварювання патрубків, штуцерів, опор і підсилювальних накладок застосовуються кутові, таврові або кільцеві шви меншої протяжності.

Розрахунок режимів зварювання виконуємо [17] для найбільш характерних швів корпусу:

- N1 — поздовжній стиковий шов обичайки, $S = 12$ мм, $L = 3,14$ м;
- N2 — кільцевий шов приварювання днища до обичайки, $S = 12$ мм, $L = 3,14$ м;

- N3 — стикове з'єднання елементів різної товщини 12/16 мм, $L = 2,20$ м;
- N4 — таврове з'єднання опори з корпусом, катет шва $K = 8$ мм, $L = 1,20$ м;
- N5 — кільцевий шов приварювання патрубку, катет шва $K = 6$ мм, $L = 0,38$ м.

Стиковий шов N1 є поздовжнім швом циліндричної обичайки корпусу. З'єднання виконується двостороннім автоматичним зварюванням під флюсом із повним проплавленням. Вихідні дані: товщина металу $S = 12$ мм і довжина шва $L = 3,14$ м

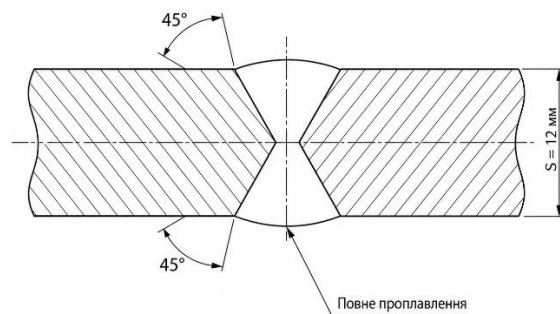


Рис. 2.1 — Конструктивні розміри шва С21

Глибину провару визначаємо за формулою:

$$H = \frac{S}{2} + 1$$

де S — товщина зварюваного металу, мм.

$$H = \frac{12}{2} + 1 = 7 \text{ мм}$$

Площу наплавленого металу приймаємо як суму площ двох частин шва:

$$F_H = F_1 + F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{2} e b$$

$$F_2 = \frac{1}{2} e_1 b$$

Приймаємо: $e = 18$ мм, $e_1 = 20$ мм, $b = 6$ мм

Тоді:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 18 \cdot 6 = 54 \text{ мм}^2$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 6 = 60 \text{ мм}^2$$

$$F_{\text{н}} = 54 + 60 = 114 \text{ мм}^2$$

Силу струму для автоматичного зварювання:

$$I_{\text{зв}} = \frac{H}{K_{\text{п}}} \cdot 100$$

де $K_{\text{п}} = 1,1$ — коефіцієнт провару.

$$I_{\text{зв}} = \frac{7}{1,1} \cdot 100 = 636 \text{ А}$$

Приймаємо: $I_{\text{зв}} = 640 \text{ А}$

Діаметра електродного дроту

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{I_{\text{зв}}}{j}}$$

де $j = 70 \text{ А/мм}^2$ — густина струму.

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{640}{70}} = 3,4 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр дроту: $d_e = 4 \text{ мм}$.

Напруги дуги

$$U_{\text{д}} = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_e}} \cdot I_{\text{зв}} + 1$$

$$U_{\text{д}} = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{4}} \cdot 640 + 1 = 37 \text{ В}$$

Швидкість процесу зварювання

$$V_{\text{зв}} = \frac{A}{I_{\text{зв}}}$$

де для дроту діаметром 4 мм приймаємо $A = 20 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot \text{м} / \text{год}$

$$V_{\text{зв}} = \frac{20 \cdot 10^3}{640} = 31,25 \text{ м/год}$$

Приймаємо: $V_{\text{зв}} = 31 \text{ м/год}$

Швидкість з якою подається дріт в зону зварювання

$$V_{\text{п.д.}} = \frac{4\alpha_H I_{\text{зв}}}{\pi d_e j}$$

де $\alpha_H = 16 \text{ г/(А год)}$.

$$V_{\text{п.д.}} = \frac{4 \cdot 16 \cdot 640}{3,14 \cdot 4 \cdot 70} = 47 \text{ м/год}$$

Маса наплавленого металу:

$$m_H = F_H \cdot L \cdot \gamma = 114 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 7850 = 2,81 \text{ кг} = 2810 \text{ г}$$

Час горіння дуги:

$$t_0 = \frac{m_H \cdot 60}{\alpha_H \cdot I_{\text{зв}}} = \frac{2810 \cdot 60}{16 \cdot 640} = 16,5 \text{ хв}$$

Повний час зварювання:

$$T = \frac{t_0}{K_n}$$

Для автоматичного зварювання під флюсом приймаємо: $K_n = 0,70$

$$T = \frac{16,5}{0,70} = 23,6 \text{ хв}$$

Витрата електроенергії:

$$Q_e = \frac{U_d}{\alpha_H \cdot \eta \cdot K_u} \cdot m_H = \frac{37}{16 \cdot 0,85 \cdot 0,5} \cdot 2,81 = 15,3 \text{ кВт год}$$

Шов N2 — кільцевий шов приварювання днища до циліндричної обичайки. Зварювання виконується автоматично під флюсом на роликовому обертачі. Вихідні дані: $S = 12 \text{ мм}$, $L = 3,14 \text{ м}$.

Оскільки товщина металу та тип підготовки кромки аналогічні шву N1, приймаємо такі самі основні параметри

Шов N3 є стиковим з'єднанням елементів різної товщини, наприклад ділянки корпусу або фланцевого елемента з обичайкою. Приймаємо товщину меншого елемента 12 мм , більшого — 16 мм . Зварювання виконується автоматичним способом під флюсом. Вихідні дані: $S_1 = 12 \text{ мм}$, $S_2 = 16 \text{ мм}$, $L = 2,20 \text{ м}$.

Час горіння дуги:

$$t_0 = \frac{2280 \cdot 60}{16 \cdot 640} = 13,4 \text{ хв}$$

Повний час зварювання:

$$T = \frac{13,4}{0,70} = 19,1 \text{ хв}$$

Витрата електроенергії:

$$Q_e = \frac{37}{16 \cdot 0,85 \cdot 0,5} \cdot 2,28 = 12,4 \text{ кВт год}$$

Шов N4 застосовується для приварювання опорних елементів та підсилювальних накладок до корпусу. Зварювання виконується механізованим MAG-способом у газовій суміші M21 Ar + 18 % CO₂ дротом ОК AristoRod 12.50.

Вихідні дані: $K = 8 \text{ мм}$, $L = 1,20 \text{ м}$, діаметр дроту $d_e = 2,0 \text{ мм}$.

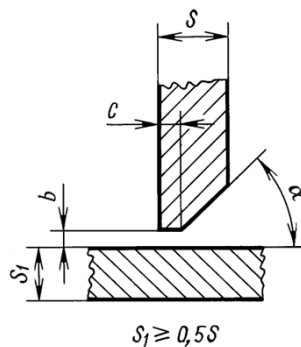


Рис. 2.3 — Конструктивні розміри таврового шва Т6

Площа наплавленого металу для кутового шва:

$$F_H = \frac{K^2}{2} = \frac{8^2}{2} = 32 \text{ мм}^2 = 0,32 \text{ см}^2$$

Силу струму для MAG-зварювання:

$$I_{зв} = \frac{\pi d_e^2 a}{4} = \frac{3,14 \cdot 4 \cdot 120}{4} = 376,8 \text{ А}$$

Приймаємо: $I_{зв} = 380 \text{ А}$

Напругу дуги приймаємо за табличною залежністю від сили струму. Для струму 360–380 А рекомендований діапазон напруги становить приблизно 30–32 В. Приймаємо $U_d = 30 \text{ В}$.

Коефіцієнт розплавлення:

$$\alpha_{\rho} = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{I_{3B}}{d_e} = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{380}{2} = 18,0 \text{ г/(А год)}$$

Коефіцієнт наплавлення:

$$\alpha_H = \alpha_{\rho}(1 - \Psi)$$

де $\Psi = 0,10$ — коефіцієнт втрат металу на розбризкування для газової суміші М21.

$$\alpha_H = 20,3(1 - 0,10) = 18,3 \text{ г/(А год)}$$

Швидкість зварювання:

$$V_{3B} = \frac{\alpha_H I_{3B}}{100 F_H \rho}$$

де $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$.

$$V_{3B} = \frac{18,3 \cdot 380}{100 \cdot 0,32 \cdot 7,8} = 24,9 \text{ м/год}$$

Швидкість подачі дроту

$$V_{п.д.} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{3B}}{\pi \cdot d_e^2 \cdot \rho} = \frac{4 \cdot 18,0 \cdot 380}{3,14 \cdot 2^2 \cdot 7,8} = 282,4 \text{ м/год}$$

Маса наплавленого металу:

$$G_H = F_H \cdot L \cdot \rho$$

$$G_H = 0,32 \cdot 120 \cdot 7,8 = 299,5 \text{ г} = 0,30 \text{ кг}$$

Час горіння дуги:

$$t_0 = \frac{299,5 \cdot 60}{16,38 \cdot 380} = 2,89 \text{ хв}$$

Повний час зварювання:

$$T = \frac{t_0}{K_{\Pi}}$$

де $K_{\Pi} = 0,57$.

$$T = \frac{2,89}{0,57} = 5,07 \text{ хв}$$

Витрата електроенергії:

$$A = \frac{U_{д} I_{3B}}{\eta \cdot 1000} \cdot t_0 + W_0(T - t_0)$$

де $\eta = 0,70$, $W_0 = 3 \text{ кВт}$.

$$A = \frac{32 \cdot 380}{0,70 \cdot 1000} \cdot 0,063 + 3(0,11 - 0,063) = 0,95 \text{ кВт год}$$

Витрата захисного газу для такого режиму приймається:

$$Q_{\text{газ}} = 16 - 18 \text{ л/хв}$$

Шов N5 використовується для приварювання патрубку або штуцера до корпусу. Зварювання виконується механізованим МАG-способом у газовій суміші М21. Вихідні дані: $K = 6 \text{ мм}$, $L = 0,38 \text{ м} = 38 \text{ см}$, $d_e = 1,2 \text{ мм}$.

Площа наплавленого металу:

$$F_{\text{н}} = \frac{K^2}{2} = \frac{6^2}{2} = 18 \text{ мм}^2 = 0,18 \text{ см}^2$$

Сила зварювального струму:

$$I_{\text{зв}} = \frac{\pi d_e^2 a}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,6^2 \cdot 110}{4} = 221 \text{ А}$$

Для струму 220 А за табличними технологічними даними приймаємо напругу $U_{\text{д}} = 26 \text{ В}$.

Коефіцієнт розплавлення:

$$\alpha_{\rho} = 3,0 + 0,08 \cdot \frac{220}{1,6} = 17,7 \text{ г/(А год)}$$

Коефіцієнт наплавлення:

$$\alpha_{\text{н}} = 17,7(1 - 0,10) = 15,9 \text{ г/(А год)}$$

Швидкість зварювання:

$$V_{\text{зв}} = \frac{15,9 \cdot 220}{100 \cdot 0,18 \cdot 7,8} = 24,9 \text{ м/год}$$

Швидкість подачі дроту:

$$V_{\text{п.д.}} = \frac{4 \cdot 16,0 \cdot 220}{3,14 \cdot 1,6^2 \cdot 7,8} = 196,5 \text{ м/год}$$

Маса наплавленого металу:

$$G_{\text{н}} = 0,18 \cdot 38 \cdot 7,8 = 53,4 \text{ г} = 0,053 \text{ кг}$$

Час горіння дуги:

$$t_0 = \frac{53,4}{220 \cdot 15,9} = 0,015 \text{ год} = 0,9 \text{ хв}$$

Повний час зварювання:

$$T = \frac{0,015}{0,57} = 0,026 \text{ год} = 1,6 \text{ хв}$$

Витрата електроенергії:

$$A = \frac{26 \cdot 220}{0,70 \cdot 1000} \cdot 0,015 + 3(0,026 - 0,015) = 0,16 \text{ кВт год}$$

Витрата захисного газу:

$$Q_{\text{газ}} = 14 - 16 \text{ л/хв}$$

Таблиця 2.7 — Зведені параметри режимів зварювання корпусу ВПЕГ-1,0

№ шва	Елемент конструкції	Тип шва	Спосіб зварювання	L, м	d _е , мм	I _{зв} , А	U _д , В	V _{зв} , м/год	V _{пл} , м/год	V _{пл} , м/хв	T, хв	Q _е , кВт·год
N1	Поздовжній шов обичайки	C21	Автоматичне під флюсом	3,14	4,0	640	37	31	47	0,78	23,6	15,3
N2	Кільцевий шов приварювання днища	C21	Автоматичне під флюсом	3,14	4,0	640	37	31	47	0,78	23,6	15,3
N3	Стикове з'єднання елементів 12/16 мм	Стиковий зі скосом кромки	Автоматичне під флюсом	2,20	4,0	640	37	31	47	0,78	19,1	12,4
N4	Приварювання опори або підсилювальної накладки	T6	MAG, M21	1,20	2,0	380	32	25,0	282,4	4,71	5,07	0,95
N5	Приварювання патрубку або штуцера	T6	MAG, M21	0,38	1,6	220	26	19,7	196,5	3,28	2,02	0,20

2.2 Вибір зварювального устаткування

Для виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0 прийнято комбіновану технологічну схему зварювання. Основні стикові з'єднання — поздовжній шов обичайки, кільцеві шви приварювання днищ і стикове з'єднання елементів різної товщини — доцільно виконувати автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Для локальних вузлів, зокрема приварювання патрубків, штуцерів, опор і підсилювальних накладок, раціонально застосовувати механізоване MAG-зварювання у газовій суміші M21.

Для виконання основних стикових швів корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 доцільно застосувати автоматизований зварювальний комплекс ESAB CaB

300M (рис. 2.4). Це обладнання належить до колонно-стрілових зварювальних систем, які застосовуються для механізованого та автоматизованого зварювання великогабаритних і корпусних конструкцій. Колонно-стрілові системи ESAB призначені для зварювальної автоматизації, зокрема для процесів зварювання під флюсом, і забезпечують зручний доступ зварювальної головки до зони шва.

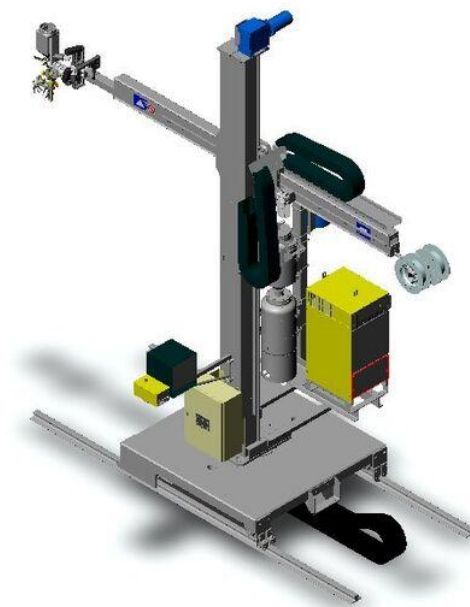


Рис. 2.4 Зварювальний комплекс ESAB CaB 300M [18]

Для автоматичного зварювання під флюсом доцільно застосувати автоматизований зварювальний комплекс ESAB CaB 300M. Це колонно-стрілова система, призначена для зварювальної автоматизації та роботи з процесами зварювання під флюсом. Таке устаткування забезпечує точне позиціонування зварювальної головки, стабільне ведення процесу та можливість використання у складі автоматизованого зварювального поста. ESAB відносить CaB 300M до колонно-стрілових систем для автоматизованого зварювання.

Вибір ESAB CaB 300M є обґрунтованим для виконання основних швів корпусу ВПЕГ-1,0, оскільки розрахований режим автоматичного зварювання під флюсом становить приблизно $I_{зв} = 640\text{A}$, $U_d = 37\text{В}$, $V_{зв} = 31\text{м/год}$. За таких умов необхідне обладнання, здатне стабільно працювати при високих струмах, забезпечувати рівномірну подачу дроту та сталі параметри дугового процесу.

Колонно-стрілова компоновка дає змогу зручно налаштовувати положення зварювальної головки відносно стику, що важливо для забезпечення повторюваної якості стикових з'єднань корпусу.

До складу комплексу для зварювання під флюсом доцільно включити джерело живлення ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW. Це джерело призначене для високопродуктивного автоматичного зварювання під флюсом і може працювати як на постійному, так і на змінному струмі. За технічними даними, Aristo 1000 AC/DC SAW має номінальний вихід при 100 % ПВ 1000 А / 44 В та діапазон вихідного струму 200–1000 А, що забезпечує достатній запас для прийнятого режиму 640 А.

Застосування джерела ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW дозволяє підтримувати стабільне горіння дуги, забезпечувати необхідну глибину проплавлення та якісне формування шва при зварюванні. Для основних стикових з'єднань корпусу це має особливе значення, оскільки саме ці шви формують герметичну оболонку апарата і працюють під дією внутрішнього тиску. У комплекті з ESAB CaB 300M таке джерело забезпечує необхідний рівень автоматизації, продуктивності та повторюваності режимів.

Для механізованого MAG-зварювання локальних вузлів корпусу доцільно застосувати Kemppi X8 MIG Welder 500 А (рис. 2.5). Це сучасна зварювальна система для MIG/MAG-процесів, яка включає джерело живлення, механізм подачі дроту, зварювальний пальник і цифрові засоби керування. За технічними даними Kemppi X8 Power Source 500 забезпечує роботу в режимі MIG-зварювання до 500А.

Вибір Kemppi X8 MIG Welder 500 А також обґрунтовується можливістю роботи зі сталевим дротом діаметром 0,8; 0,9; 1,0; 1,2 та 1,6 мм, а також використання пальника X8 MIG Gun 500-w з рідинним охолодженням і допустимим навантаженням 500 А при роботі.

Для зварювання патрубків, штуцерів, опор і підсилювальних накладок важливою є не лише потужність джерела, а й стабільність подачі дроту, точність налаштування режимів і можливість отримання якісного кутового або кільцевого шва без надмірного розбризкування. Kemppi X8 MIG Welder 500 А відповідає цим вимогам, оскільки забезпечує цифрове керування процесом, стабільну роботу в

газовій суміші $Ar + CO_2$ і достатній запас за струмом для зварювання локальних елементів корпусу.



Рис. 2.5 Джерело МАG-зварювання Kemppi X8 MIG Welder 500 A [19]

Таблиця 2.8 — Зварювальне устаткування для виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0

Вид робіт	Спосіб зварювання	Рекомендоване зварювальне устаткування
Поздовжній шов обичайки	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB CaB 300M + SAW-головка + ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW
Кільцевий шов приварювання днища	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB CaB 300M + SAW-головка + ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW
Стикове з'єднання елементів 12/16 мм	Автоматичне зварювання під флюсом	ESAB CaB 300M + SAW-головка + ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW
Приварювання опор і підсилювальних накладок	МАG-зварювання у M21	Kemppi X8 MIG Welder 500 A
Приварювання патрубків і штуцерів	МАG-зварювання у M21	Kemppi X8 MIG Welder 500 A
Прихоплення та допоміжні короткі шви	МАG-зварювання у M21	Kemppi X8 MIG Welder 500 A

Прийняте обладнання відповідає розрахованим режимам зварювання і має необхідний запас за силою струму та тривалістю навантаження. Застосування автоматичного зварювання під флюсом для протяжних стикових швів дозволяє підвищити продуктивність і забезпечити стабільну якість з'єднань, а використання МАГ-зварювання для патрубків, штуцерів і опор забезпечує технологічну гнучкість при виконанні коротких та просторово складних швів. У результаті запропонований комплект обладнання є раціональним для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 в умовах сучасного зварювального виробництва.

2.3 Вибір методу контролю якості виробу

Якість виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 значною мірою визначається надійністю його зварних з'єднань, оскільки корпус є основною герметичною частиною апарата і під час експлуатації працює під дією внутрішнього тиску, температурних перепадів та навантажень від приєднаних трубопроводів. У процесі роботи корпус повинен зберігати міцність, щільність, геометричну стабільність і стійкість до локальних напружень у зонах приєднання патрубків, штуцерів та опорних елементів.

Зварні шви корпусу підігрівача мають різний ступінь відповідальності. Найбільш навантаженими є стикові шви обичайки та кільцеві шви приварювання днищ, оскільки саме вони формують герметичну оболонку апарата. Особливої уваги потребують шви патрубків і штуцерів, де через наявність отворів у стінці корпусу виникає місцева концентрація напружень. Тому система контролю якості повинна бути комплексною і поєднувати візуально-вимірний контроль, ультразвукову дефектоскопію, капілярний контроль локальних вузлів та остаточне випробування корпусу на герметичність.

Першим і обов'язковим етапом перевірки є візуально-вимірний контроль. Його виконують після складання деталей, після прихоплення, після основного зварювання та після очищення швів від шлаку, бризок металу й окалини. Метою такого контролю є оцінювання зовнішнього стану шва, перевірка

відповідності його геометричних параметрів кресленню, а також виявлення поверхневих дефектів [20-23].

Під час візуального контролю перевіряють рівномірність формування зварного валика, плавність переходу металу шва до основного металу, відсутність підрізів, тріщин, прожогів, напливів, кратерів, поверхневих пор і незаплавлених ділянок. Для стикових з'єднань обичайки та днищ контролюють ширину шва, висоту підсилення, рівномірність профілю та зміщення кромки. Для кутових швів патрубків, штуцерів, опор і накладок перевіряють катет шва, повноту обварювання і відсутність місцевих дефектів у зоні переходу.

Для виконання візуально-вимірювального контролю доцільно застосовувати універсальний шаблон зварника WG-2 або УШС-3, штангенциркуль ШЦ-1, металеву лінійку, рулетку, набір щупів, лупу з підсвічуванням і переносне освітлення. За допомогою цих засобів можна контролювати висоту підсилення стикового шва, катет кутового шва, ширину валика, глибину підрізу, зазор у стику та інші параметри, які безпосередньо впливають на якість з'єднання.

Візуально-вимірювальний контроль доцільно виконувати для 100 % зварних швів корпусу, оскільки він є основним способом первинного виявлення дефектів і дозволяє своєчасно встановити ділянки, які потребують додаткової перевірки або виправлення.

Для відповідальних стикових з'єднань корпусу ВПЕГ-1,0 найбільш доцільним є ультразвуковий контроль. Його слід застосовувати для поздовжнього шва обичайки, кільцевих швів приварювання днищ, а також стикового з'єднання елементів різної товщини 12/16 мм. Саме ці шви сприймають основні навантаження від внутрішнього тиску і визначають герметичність корпусу як зварної оболонки.

Ультразвуковий метод дозволяє виявляти внутрішні дефекти металу шва та зони термічного впливу: непровари, несплавлення, тріщини, шлакові включення, пори та розшарування. Перевагою цього методу є можливість контролю без руйнування виробу, достатня чутливість до площинних дефектів і придатність для перевірки зварних з'єднань середньої товщини. Для корпусу підігрівача цей метод

є раціональним, оскільки товщина основних елементів становить орієнтовно 12–16 мм, що добре відповідає можливостям ультразвукової дефектоскопії.

Для проведення ультразвукового контролю доцільно застосувати сучасний дефектоскоп Evident OmniScan X4. Це обладнання є ефективним для контролю відповідальних стикових з'єднань, оскільки дозволяє отримувати більш інформативну картину стану шва, оцінювати розташування дефектів у товщі металу та підвищувати достовірність контролю. Його застосування є доцільним для поздовжніх і кільцевих швів корпусу, де важливо не лише встановити наявність дефекту, а й визначити його координати та характер.

Перед ультразвуковим контролем поверхню шва і прилеглі ділянки очищають від забруднень, нерівностей, шлаку, бризок металу та окалини. Для забезпечення акустичного контакту між перетворювачем і металом застосовують контактну рідину. Контроль виконують за розробленою схемою прозвучування з урахуванням товщини металу, типу з'єднання і доступності контрольованої ділянки. Результати контролю оформлюють у протоколі із зазначенням номера шва, довжини перевіреної ділянки, типу перетворювача, виявлених дефектів і висновку про придатність з'єднання.

Для швів приварювання патрубків, штуцерів, підсилювальних накладок та окремих локальних вузлів доцільно застосовувати капілярний контроль. Ці ділянки мають складнішу геометрію, а в місцях врізання патрубків у корпус виникає локальна концентрація напружень. У таких зонах особливо небезпечними є дрібні поверхневі тріщини, пори та відкриті неоднорідності, які можуть бути малопомітними при звичайному візуальному огляді.

Капілярний метод базується на здатності індикаторної рідини проникати у відкриті поверхневі дефекти. Після видалення надлишку пенетранта і нанесення проявника дефект проявляється у вигляді контрастного сліду на поверхні. Метод є простим, достатньо чутливим і зручним для контролю коротких кільцевих та криволінійних швів.

Для виконання капілярного контролю доцільно застосувати комплект Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit. Такий комплект включає очищувач, пенетрант і

проявник, що дозволяє виконувати локальний контроль без складного стаціонарного обладнання. Його доцільно використовувати для перевірки швів патрубків, штуцерів, підсилювальних накладок і ділянок, де можливе виникнення поверхневих дефектів після зварювання або зачищення.

Послідовність контролю включає очищення і знежирення поверхні, нанесення пенетранта, витримку для проникнення в дефекти, видалення надлишку пенетранта, нанесення проявника і огляд поверхні. У разі виявлення індикаторних слідів дефектну ділянку підлягає ремонту з подальшим повторним контролем.

Після завершення зварювання та неруйнівного контролю корпус ємнісного підігрівача повинен пройти випробування на герметичність і міцність. Для такого виробу найбільш доцільним є гідравлічне випробування, оскільки корпус під час експлуатації працює як посудина, що сприймає внутрішній тиск.

Гідравлічне випробування дозволяє оцінити не окремий шов, а корпус як цілісну зварну конструкцію. Під час випробування перевіряють герметичність поздовжнього шва обичайки, кільцевих швів днищ, швів патрубків, штуцерів та інших приварних елементів. Не допускається поява течі, запотівання, падіння тиску, залишкових деформацій, тріщин або інших ознак порушення цілісності корпусу.

Для проведення випробування застосовують випробувальний насос високого тиску, манометри відповідного класу точності, заглушки, ущільнення та запірну арматуру. Перед випробуванням корпус заповнюють водою, повітря з внутрішньої порожнини видаляють, після чого тиск плавно підвищують до встановленого випробувального значення. Після витримки під тиском виконують огляд усіх зварних з'єднань і фіксують результати контролю.

Гідравлічне випробування є завершальним етапом перевірки, оскільки навіть за позитивних результатів візуального, ультразвукового та капілярного контролю корпус повинен підтвердити фактичну герметичність у складеному стані.

Таблиця 2.9 — Методи та обладнання для контролю якості корпусу ВПЕГ-1,0

<i>Контрольована ділянка</i>	<i>Можливі дефекти</i>	<i>Метод контролю</i>	<i>Рекомендоване обладнання</i>	<i>Обсяг контролю</i>
Листовий прокат, днища, патрубки, зварювальні матеріали	Невідповідність марки сталі, товщини, пошкодження поверхні, корозія	Вхідний контроль	Сертифікати якості, штангенциркуль, мікрометр, товщиномір	До запуску у виробництво
Заготовки, кромки, обичайка, днища	Нерівномірний зазор, зміщення кромки, неправильна геометрія	Операційний вимірювальний контроль	Рулетка, кутомір, шаблони кромки, щупи	Після кожної основної операції
Усі зварні шви корпусу	Підрізи, напливи, кратери, прожоги, поверхневі пори, відхилення форми	Візуально-вимірювальний контроль	WG-2 або УШС-3, лупа, штангенциркуль, освітлювач	100 % швів
Поздовжній шов обичайки	Непровар, несплавлення, тріщини, пори, включення	Ультразвуковий контроль	Evident OmniScan X4	По всій довжині відповідального шва
Кільцеві шви приварювання днищ	Внутрішні неоднорідності, непровари, тріщини, шлакові включення	Ультразвуковий контроль	Evident OmniScan X4	По периметру кільцевого шва
Стикове з'єднання 12/16 мм	Несплавлення, непровар, концентрація дефектів у зоні переходу товщини	Ультразвуковий контроль	Evident OmniScan X4	У зоні стику і переходу товщини
Патрубки, штуцери, підсилювальні накладки	Поверхневі тріщини, пори, відкриті неоднорідності	Капілярний контроль	Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit	Локально по периметру шва
Готовий корпус підігрівача	Негерметичність, течя, запотівання швів, залишкові деформації	Гідравлічне випробування	Насос високого тиску, манометри, заглушки	Після завершення зварювання і НК

2.4 Опис запропонованого технологічного процесу

Запропонований технологічний процес виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 передбачає послідовне виконання операцій підготовки листового прокату, розкрою заготовок, формоутворення, складання, зварювання та контролю якості. Побудова процесу спрямована на забезпечення точної геометрії корпусу, якісного формування обичайки та днищ, стабільного виконання зварних з'єднань і підтвердження герметичності готового виробу.

010. Вхідний контроль матеріалів і комплектуючих.

На початковому етапі виконують приймання листового прокату, заготовок днищ, патрубків, штуцерів, фланців, опорних елементів, зварювального дроту, флюсу та захисного газу. Перевіряють сертифікати якості, марку сталі, відповідність матеріалів кресленню, стан поверхні та відсутність дефектів, які можуть негативно вплинути на подальше виготовлення. Під час контролю звертають увагу на відсутність тріщин, розшарувань, корозійних пошкоджень, глибоких рисок, вм'ятин і забруднень у зонах майбутнього зварювання. Для контролю застосовують штангенциркуль, мікрометр, рулетку, металеву лінійку, товщиномір і засоби візуального огляду. Переміщення листів і комплектуючих виконують кран-балкою або мостовим краном із використанням траверс і захватних пристроїв.

015. Очищення листового прокату.

Перед розкромом листовий метал очищають від окалини, пилу, залишків мастила, поверхневої корозії та інших забруднень. Якісна підготовка поверхні покращує умови термічного різання, зменшує кількість дефектів на кромках і створює кращі умови для подальшого зварювання. Для цієї операції доцільно застосувати дробоструминну лінію Wheelabrator Plate Preservation Line (рис. 2.6). Вона забезпечує рівномірне очищення поверхні листового металу та підготовку прокату до подальшого розкрою, формоутворення і нанесення захисного покриття.

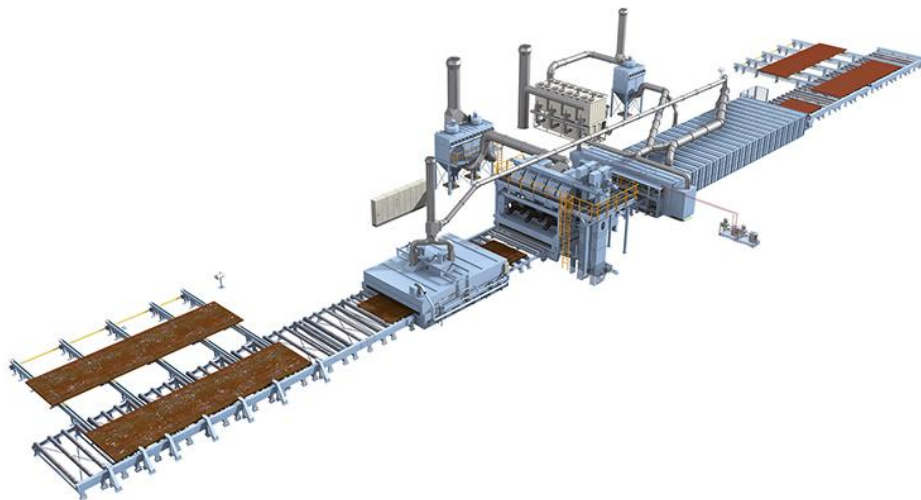


Рис. 2.6 Дробоструминна лінія Wheelabrator Plate Preservation Line [24]

020. Правлення листового прокату

Після очищення листи подають на правлення. Операція призначена для усунення хвилястості, серповидності, локальних вм'ятин і залишкових деформацій, які могли виникнути під час транспортування або зберігання металу. Правлення виконують на листопрямильній машині Bendmak BPSM (рис. 2.7). Отримання рівної заготовки забезпечує точніший розкрій, стабільніше вальцювання та краще суміщення кромки під час складання поздовжнього стику обичайки.



Рис. 2.7 Машина Bendmak BPSM для усунення хвилястості та залишкових деформацій листового прокату[25]

025. Розкрій листового металу на заготовки

Розкрій виконують відповідно до робочих креслень і карти розкрою. Із листового прокату вирізають заготовку обичайки, заготовки торцевих днищ, підсилювальні накладки, опорні елементи та допоміжні деталі. Для розкрою доцільно застосувати порталну машину плазмового різання з ЧПК MicroStep MG (рис. 2.8). Застосування ЧПК-різання забезпечує точність контуру, повторюваність розмірів, раціональне використання металу та зменшення обсягу ручного доопрацювання. Після різання крайки заготовок очищають від ґрату, окалини, напливів і шлакових залишків.



Рис. 2.8 – Портальна машина плазмового різання з ЧПК MicroStep MG для розкрою листового металу[26]

030. Підготовка крайок під зварювання

Після розкрою виконують механічну підготовку крайок під зварювання. Для стикових швів обичайки та днищ кромки обробляють відповідно до прийнятого типу з'єднання з повним проплавленням. У місцях з'єднання деталей різної товщини передбачають плавний перехід, що знижує концентрацію напружень і покращує умови формування шва. Для оброблення крайок застосовують кромкофрезерну машину Cevisa СНР 12G (рис. 2.9), мобільний фаскознімач Promotech ВМ-21, кутові шліфувальні машини, абразивні круги та металеві щітки. Поверхні біля майбутнього шва очищають до чистого металу, що зменшує ризик непровару, несплавлення, пористості й шлакових включень.



Рису. 2.9 – Кромкофрезерна машина CEVISA СНР-12G для підготовки крайок під зварювання [27]

035. Вальцювання обичайки

Підготовлену листову заготовку подають на вальцювання. Формування циліндричної обичайки виконують на чотиривалковій листозгинальній машині DAVI MCA (рис. 2.10). Таке обладнання забезпечує попереднє підгинання крайок, рівномірне формування радіуса та достатню точність геометрії оболонки.

Після вальцювання перевіряють збіг поздовжніх кромek, овальність, прямолінійність твірної, відсутність місцевих перегинів і загальну правильність форми обичайки. За потреби виконують коригувальне підвальцювання.



Рис. 2.10 – Машина DAVI MCA [28]

040. Складання поздовжнього стику обичайки

Звальцьовану обичайку встановлюють у складальне положення. Поздовжні кромки суміщають, виставляють необхідний зазор, контролюють зміщення кромek, притуплення та правильність форми оболонки. Після перевірки виконують прихоплення. Прихоплення виконують механізованим MAG-зварюванням із використанням обладнання Kemppi X8 MIG Welder 500 A. Прихватки розташовують рівномірно по довжині стику, щоб забезпечити стабільне положення кромek під час основного зварювання.

045. Зварювання поздовжнього шва обичайки

Поздовжній стиковий шов обичайки виконують автоматичним зварюванням під флюсом. Для цієї операції застосовують автоматизований зварювальний комплекс ESAB CaB 300M із SAW-головкою та джерелом живлення ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW. Як зварювальні матеріали використовують дрiт ESAB OK

Autrod 12.22 і флюс ESAB OK Flux 10.71L. Автоматичне зварювання під флюсом забезпечує стабільне горіння дуги, рівномірне проплавлення, якісне формування валика та високу повторюваність параметрів. Після зварювання видаляють шлакову кірку, залишки флюсу та виконують попередній візуально-вимірний контроль.

050. Калібрування обичайки після зварювання

Після виконання поздовжнього шва обичайку перевіряють за геометрією. Контролюють овальність, прямолінійність твірної, місцеві деформації в зоні шва, правильність форми торців і відповідність корпусу кресленню. Калібрування виконують на листозгинальній машині DAVI MCA. Операція дозволяє усунути можливі деформації після зварювання та забезпечити якісне прилягання торцевих днищ під час подальшого складання.

055. Формування торцевих днищ корпусу

Торцеві днища формують окремо від обичайки. Вони закривають корпус із двох боків і забезпечують герметичність зварної оболонки. Заготовки днищ вирізають із листового прокату, після чого виконують формоутворення з наданням необхідної просторової форми та підготовкою кромкової частини. Для формування і відбортування днищ доцільно застосувати машину BFM (рис. 2.11). Під час операції контролюють рівномірність відбортування, правильність форми, відсутність складок, тріщин, надривів і місцевих деформацій. Якщо у виробництві застосовують готові штамповані або еліптичні днища, на цій операції виконують перевірку їх геометрії, обрізання припусків і підготовку крайок під кільцевий шов.

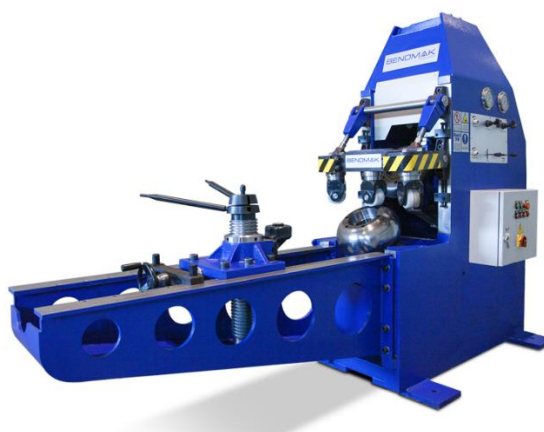


Рис. 2.11 – Машина BFM для формування днищ [29]

060. Механічна обробка крайок днищ

Перед складанням із обичайкою крайки днищ обробляють під кільцевий стиковий шов. Операція включає зняття фаски, видалення задирок, вирівнювання кромки та очищення зони майбутнього зварювання. Для оброблення застосовують Cevisa CNP 12G, Promotech BM-21, абразивний інструмент і металеві щітки. Після підготовки крайки перевіряють шаблонами, щупами та вимірювальним інструментом.

065. Складання обичайки з днищами

Підготовлені днища встановлюють на торці обичайки. Під час складання контролюють співвісність деталей, рівномірність зазору по периметру, зміщення кромки і щільність прилягання. Прихоплення виконують рівномірно по колу, щоб не допустити перекосу днища та місцевих деформацій оболонки.

Для складання застосовують складально-зварювальний стенд, гідравлічні центратори, притиски, шаблони для контролю зазорів і вимірювальний інструмент. Складання виконують без примусового силового припасування, оскільки надмірні монтажні зусилля можуть спричинити додаткові залишкові напруження.

070. Зварювання кільцевих швів днищ із корпусом

Кільцеві стикові шви приварювання днищ до обичайки виконують автоматичним зварюванням під флюсом на комплексі ESAB CaB 300M із SAW-головкою та джерелом ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW. Для зварювання застосовують дріт OK Autrod 12.22 і флюс OK Flux 10.71L.

Автоматичний процес забезпечує стабільний тепловий режим, рівномірне проплавлення по периметру та якісне формування кільцевого шва. Після завершення зварювання видаляють шлак, залишки флюсу, очищають навколошовну зону та виконують попередній огляд.

075. Розмічання і вирізання отворів під патрубки та штуцери

Після формування основної оболонки виконують розмічання місць встановлення патрубків, штуцерів і фланцевих вузлів. Розмітку проводять відповідно до креслення з контролем координат, орієнтації та взаємного розташування елементів.

Отвори вирізають спеціалізованою машиною для вирізання врізок Promotech PRO-36 RH (рис. 2.12). Після різання кромки отворів зачищають, перевіряють форму, діаметр і якість підготовки під зварювання. Для доведення отворів застосовують борфрези, кутові шліфувальні машини, фаскознімачі та металеві щітки.



Рис. 2.12 – Машина Promotech PRO-36 RH [30]

080. Встановлення патрубків, штуцерів і фланців

Патрубки, штуцери та фланцеві елементи встановлюють у підготовлені отвори корпусу. Перед зварюванням перевіряють їх положення, висоту виступання, перпендикулярність або заданий кут нахилу, щільність прилягання та правильність орієнтації фланців. Для складання застосовують шаблони, притискні пристрої, тимчасові фіксатори, рівні, кутоміри та вимірювальний інструмент. Після перевірки виконують прихоплення, яке забезпечує стабільне положення елементів до основного зварювання.

085. МАГ-зварювання патрубків, штуцерів і фланцевих вузлів

Основне зварювання патрубків, штуцерів і фланцевих елементів виконують механізованим МАГ-зварюванням у газовій суміші M21 Ar + CO₂. Для цієї операції застосовують обладнання Kemppi X8 MIG Welder 500 A. Як електродний матеріал використовують дріт ESAB OK AristoRod 12.50. МАГ-зварювання забезпечує якісне виконання коротких кільцевих і кутових швів, стабільне горіння дуги, добру керованість процесу та менший обсяг післязварювального очищення. Після зварювання шви очищають від бризок і локальних напливів.

090. Встановлення і приварювання опор

Опорні елементи встановлюють на корпус відповідно до креслення. Перед зварюванням контролюють симетричність їх розташування, щільність прилягання, правильність просторового положення та відсутність перекосів. Після виставлення виконують прихоплення і повторну перевірку положення. Приварювання опор виконують механізованим МАG-зварюванням на обладнанні Kemppi X8 MIG Welder 500 A із застосуванням дроту ОК AristoRod 12.50. Після зварювання видаляють бризки металу, напливи та гострі нерівності, а шви готують до контролю якості.

095. Зачищення зварних швів

Після завершення зварювальних операцій виконують зачищення швів і навколошовних зон. Видаляють залишки флюсу, шлак, бризки металу, гострі кромки, напливи та нерівності, які можуть ускладнити контроль або погіршити якість захисного покриття. Для зачищення застосовують кутові шліфувальні машини Bosch GWS 24-230 (рис. 2.13), металеві щітки, абразивні круги та промисловий пилосос. Особливу увагу приділяють швам патрубків, днищ і опор, оскільки ці ділянки є відповідальними з погляду міцності та герметичності.



Рис. 2.13 – Шліфувальна машина Bosch GWS 24-230

100. Контроль якості зварних з'єднань

Після зварювання корпус проходить комплексний контроль якості. Спочатку виконують візуально-вимірювальний контроль усіх швів. Для цього застосовують шаблон зварника WG-2, універсальний шаблон УШС-3, штангенциркуль, лінійку, щупи, лупу з підсвічуванням і переносне освітлення. Відповідальні стикові шви обичайки та днищ перевіряють ультразвуковим методом із використанням дефектоскопа Evident OmniScan X4. Шви патрубків, штуцерів і локальних вузлів додатково контролюють капілярним методом із застосуванням комплекту

Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit. У разі виявлення дефектів виконують ремонтну зачистку, повторне зварювання і повторний контроль.

105. Гідравлічне випробування корпусу

Після позитивних результатів неруйнівного контролю корпус піддають гідравлічному випробуванню на міцність і герметичність. Виріб заповнюють водою, видаляють повітря з внутрішньої порожнини, встановлюють заглушки, манометри та запірну арматуру. Потім тиск поступово підвищують до встановленого випробувального значення. Для проведення випробування застосовують насос Rothenberger RP 50-S або іншу випробувальну установку відповідного тиску, контрольні манометри, заглушки, шланги високого тиску та запірну арматуру. Під час витримки контролюють відсутність течії, запотівання швів, падіння тиску, залишкових деформацій і тріщин.

110. Підготовка поверхні та нанесення захисного покриття

Після випробування корпус очищають від залишків вологи, пилу, продуктів корозії та технологічних забруднень. Поверхню готують до нанесення ґрунтовки та лакофарбового покриття.

Для підготовки поверхні застосовують дробоструминну камеру Clemco (рис. 2.14). Нанесення покриття виконують у фарбувальній камері з використанням апарата безповітряного розпилення Graco King. Захисне покриття забезпечує стійкість корпусу до атмосферної вологи, забруднень і корозійних процесів під час експлуатації.



Рис. 2.14 – Дробоструминна камера Clemco [31]

115. Складування і передача готового корпусу

Після висихання захисного покриття корпус передають на склад готових вузлів або на наступну ділянку складання. Під час транспортування і зберігання необхідно запобігати механічним пошкодженням покриття, деформації патрубків, штуцерів та опор, а також потраплянню вологи у внутрішню порожнину.

Переміщення готового корпусу виконують кран-балкою, мостовим краном або транспортними візками. Для складування застосовують ложементи або підставки, які забезпечують стійке положення виробу і не пошкоджують його поверхню.



Рис. 2.15 Схема реалізації технологічного процесу

Таблиця 2.10 – Технологічний процес виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0

№ операції	Найменування операції	Основне обладнання
010	Вхідний контроль матеріалів і комплектуючих	Кран-балка, траверси, штангенциркуль, мікрометр, товщиномір
015	Очищення листового прокату	Дробоструминна лінія Wheelabrator Plate Preservation Line
020	Правлення листового прокату	Листоправильна машина Bendmak BPSM
025	Розкрій листового металу на заготовки	Портальна машина плазмового різання з ЧПК MicroStep MG
030	Підготовка крайок під зварювання	Cevisa CHP 12G, Promotech BM-21, кутові шліфувальні машини
035	Вальцювання обичайки	Чотиривалкова листозгинальна машина DAVI MCA
040	Складання поздовжнього стику обичайки	Складальний стенд, притиски, Kemppi X8 MIG Welder 500 A
045	Зварювання поздовжнього шва обичайки	ESAB CaB 300M, ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW
050	Калібрування обичайки після зварювання	DAVI MCA або калібрувальний стенд
055	Формування торцевих днищ корпусу	Машина для формування та відборткування днищ BFM
060	Механічна обробка крайок днищ	Cevisa CHP 12G, Promotech BM-21
065	Складання обичайки з днищами	Складально-зварювальний стенд, центратори, притиски
070	Зварювання кільцевих швів днищ із корпусом	ESAB CaB 300M, ESAB Aristo 1000 AC/DC SAW
075	Розмічання і вирізання отворів під патрубки та штуцери	Promotech PRO-36 RH
080	Встановлення патрубків, штуцерів і фланців	Шаблони, притиски, фіксатори, вимірювальний інструмент
085	MAG-зварювання патрубків, штуцерів і фланцевих вузлів	Kemppi X8 MIG Welder 500 A
090	Встановлення і приварювання опор	Kemppi X8 MIG Welder 500 A, складальні шаблони
095	Зачищення зварних швів	Bosch GWS 24-230, пневмошліфмашини, металеві щітки
100	Контроль якості зварних з'єднань	WG-2, УЩС-3, Evident OmniScan X4, Magnaflux SK-3

105	Гідравлічне випробування корпусу	Rothenberger RP 50-S, манометри, заглушки, арматура
110	Підготовка поверхні та нанесення захисного покриття	Дробоструминна камера Clemco, Graco King, фарбувальна камера
115	Складування і передача готового корпусу	Кран-балка, ложементи, транспортні візки

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір зварювальних пристосувань

Для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 доцільно застосувати комплект складально-зварювальних пристосувань, які забезпечують точне встановлення обичайки, днищ, патрубків, штуцерів, фланців та опор перед зварюванням. Такі пристосування потрібні не тільки для фіксації деталей, а й для збереження геометрії корпусу під час прихоплення та виконання основних швів. Особливо важливими є пристрої для складання поздовжнього стику обичайки, центрування днищ, обертання корпусу під час зварювання кільцевих швів і фіксації патрубків у заданому положенні.

Для зварювання поздовжнього стику доцільно застосувати установку (рис. 3.1), яка забезпечує надійне підтримання обичайки і зони шва під час автоматичного зварювання під флюсом. Основними елементами такої установки є опорна рама, роликові або призматичні опори, притискні вузли, флюсова подушка, SAW-головка, бункер для флюсу та механізм переміщення зварювального вузла.

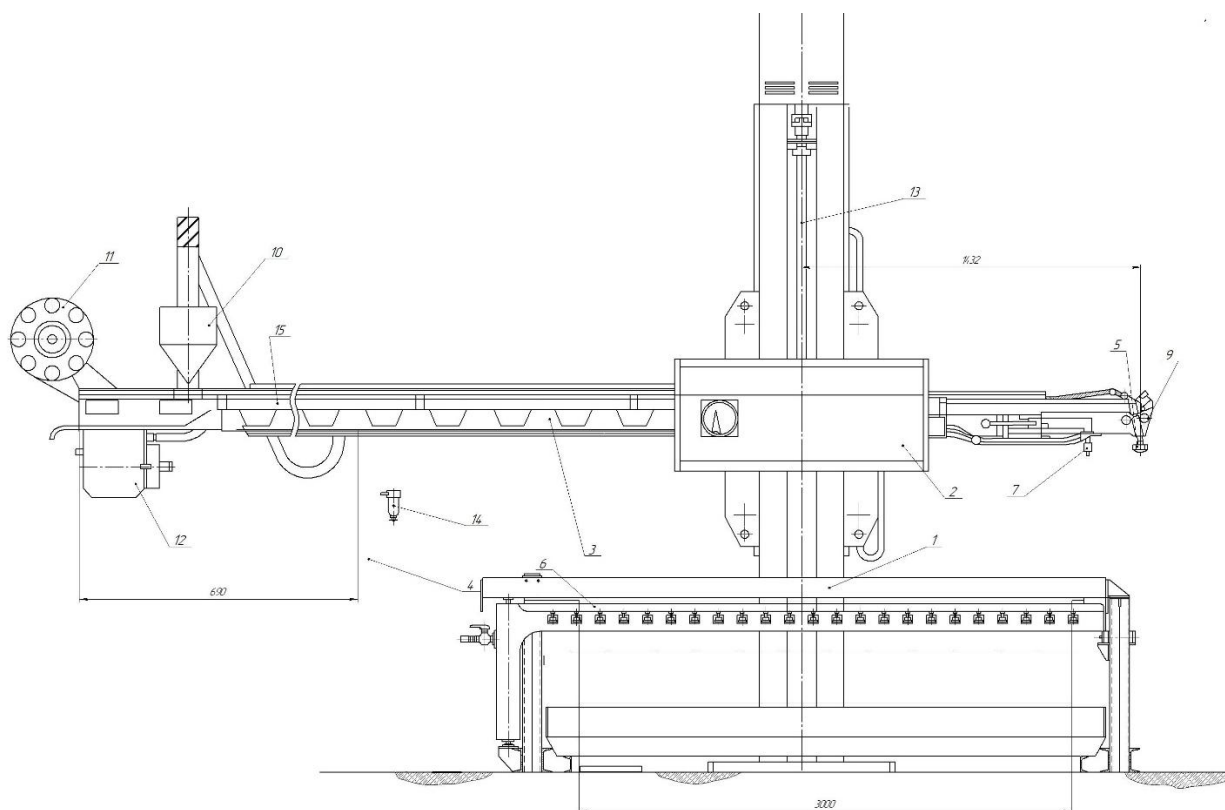


Рис. 3.1 Установка для зварювання поздовжнього стику

Флюсова подушка розміщується під зоною стику і підтримує зворотний бік шва (рис. 3.2). Її призначення полягає у формуванні якісного кореня шва, запобіганні витіканню розплавленого металу та стабілізації процесу проплавлення. Під час роботи обичайку притискають до опор, зварювальну головку виставляють по осі стику, після чого подають флюс і виконують автоматичне зварювання.

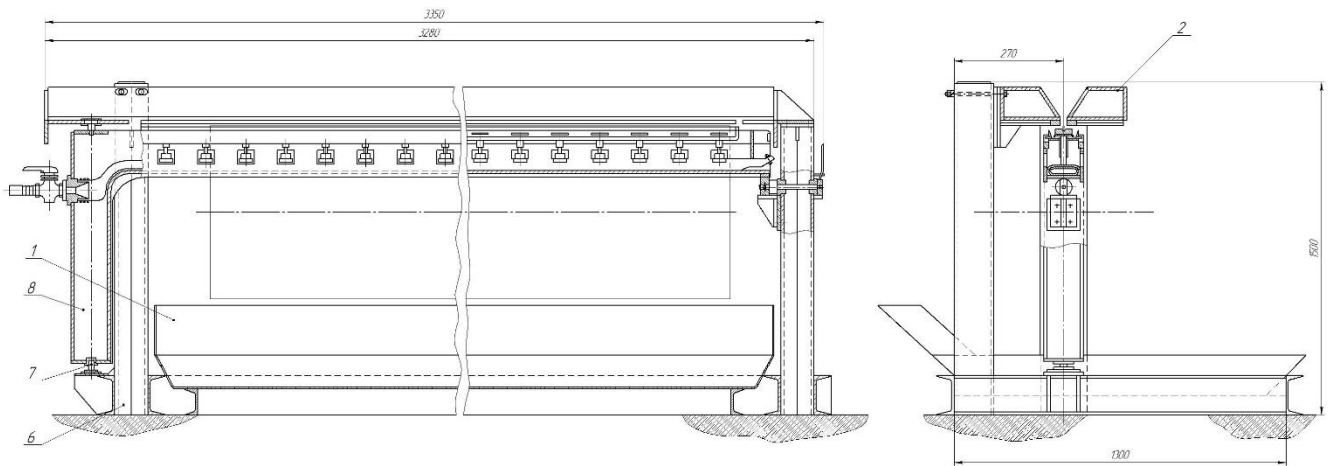


Рис. 3.2 Пристрій затискний установки

Після виготовлення обичайки і підготовки торцевих днищ корпус складають на спеціальному стенді (рис. 3.3). Його основними елементами є роликові опори, осьові упори, торцеві притиски, центрувальні елементи і пристрої для контролю зазору. Обичайку встановлюють на ролики, після чого до її торця підводять днище. Далі днище центрують відносно осі корпусу і притискають до обичайки.

Робота стенда полягає у забезпеченні співвісності обичайки й днища, рівномірного зазору по всьому периметру кільцевого стику та мінімального зміщення кромки. Після виставлення днища прихоплюють у кількох точках, зазвичай симетрично по колу, щоб не допустити перекосу. Після цього виконують основне зварювання кільцевого шва.

Для кільцевих швів корпусу доцільно поєднувати такий стенд із роликовим обертачем. Роликовий обертач забезпечує обертання корпусу, а зварювальна головка залишається стабільно зорієнтованою відносно стику. У промисловій практиці колонно-стрілові маніпулятори часто працюють разом із роликовими

обертачами для виконання поздовжніх і кільцевих швів циліндричних деталей (рис. 3.4).

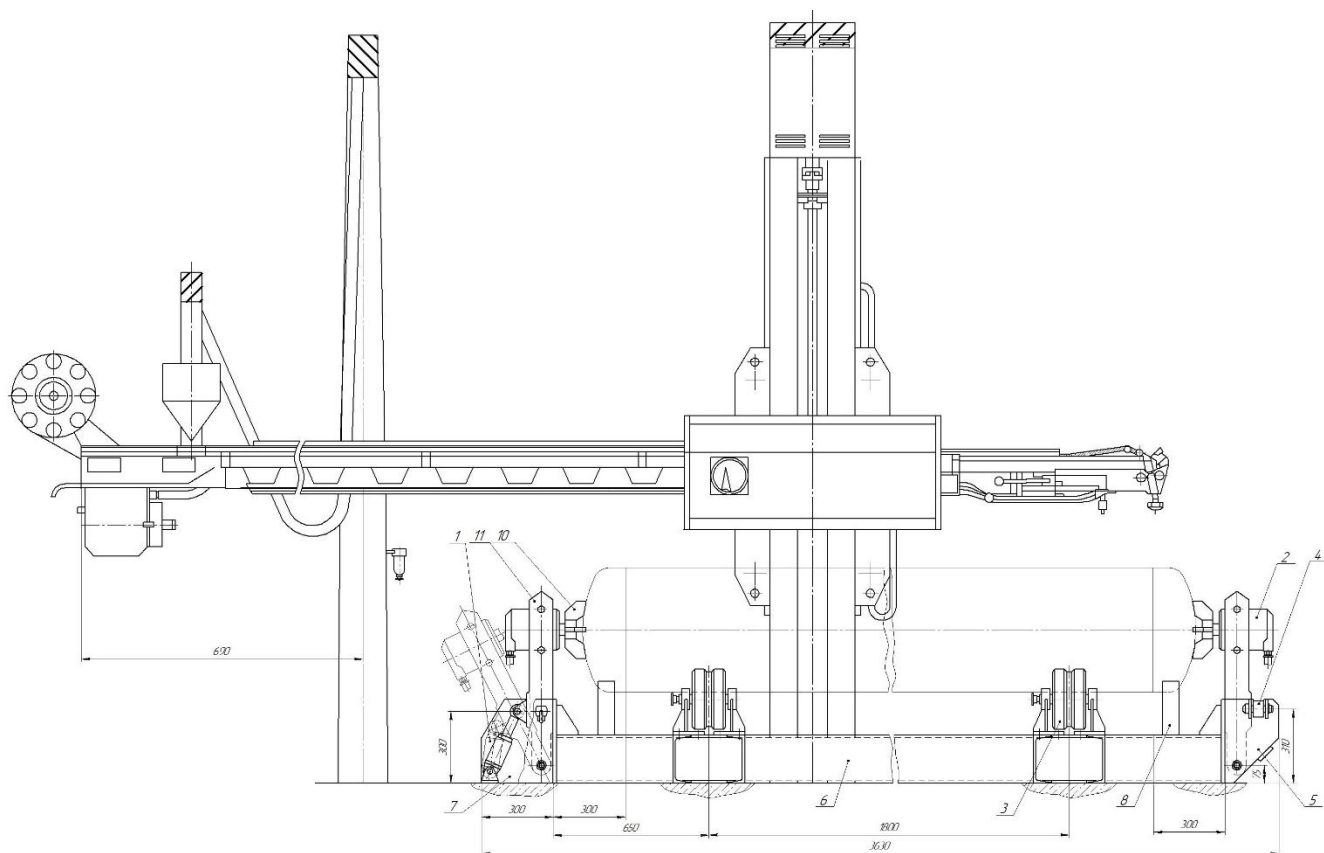


Рис. 3.3 Установка для складання та зварювання боковин

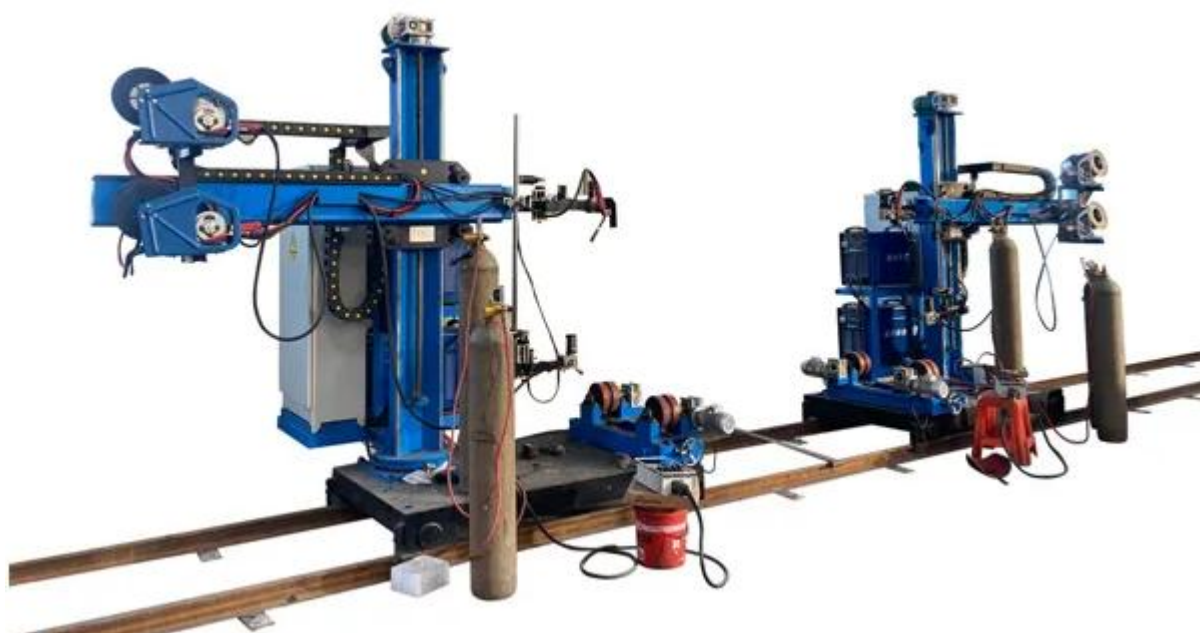


Рис. 3.3 Установка зварювання кільцевих швів

Роликовий обертач є одним із основних пристосувань для виготовлення корпусу ВПЕГ-1,0. Він складається з приводної та холостої секцій, на яких розміщені ролики з гумовим або поліуретановим покриттям. Приводна секція передає обертання корпусу, а холоста підтримує його з протилежного боку. Завдяки цьому корпус обертається рівномірно, без ривків і зміщення.

Перед зварюванням корпус встановлюють на ролики, перевіряють його положення, після чого задають необхідну швидкість обертання. Швидкість має відповідати прийнятому режиму зварювання кільцевого шва. Під час роботи роликовий обертач забезпечує сталі умови формування зварювальної ванни, тому шов виконується рівномірно по всьому периметру.

3.2 Розрахунок роликового обертача для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0

Роликовий обертач застосовується для встановлення та рівномірного обертання корпусу ємнісного підігрівача під час складання, зварювання кільцевих швів, очищення та контролю. Використання такого пристрою дає змогу виконувати кільцеві зварні з'єднання в зручному просторовому положенні, забезпечувати сталі умови формування зварювальної ванни та зменшувати вплив ручного переміщення виробу на якість шва.

Для корпусу ВПЕГ-1,0 доцільно прийняти роликовий обертач із двома роликовими секціями: приводною та холостою. Кожна секція має по дві роликоопори з гумовим покриттям. Гумове покриття роликів підвищує зчеплення з поверхнею корпусу, зменшує ризик проковзування, забезпечує плавність обертання та запобігає пошкодженню поверхні виробу [32].

Для розрахунку приймаємо: $D = 1000 \text{ мм} = 1,0 \text{ м}$, $R = 0,5 \text{ м}$, $l = 3140 \text{ мм} = 3,14 \text{ м}$

Орієнтовна маса корпусу з урахуванням обичайки, днищ, патрубків, штуцерів та опорних елементів приймається: $m = 1200 \text{ кг}$

Тоді вага корпусу:

$$G = m \cdot g = 1200 \cdot 9,81 = 11772 \text{ Н}$$

Приймаємо: $G \approx 11800 \text{ Н}$

Ексцентриситет, що враховує можливу незбалансованість корпусу під час обертання, приймаємо:

$$e = 0,02R = 0,02 \cdot 0,5 = 0,01 \text{ м}$$

Маршова частота обертання корпусу: $n = 5 \text{ об/хв}$

Діаметр роликоопори приймаємо: $D_p = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м}$

Радіус ролика: $r_p = 0,125 \text{ м}$

Центральний кут між роликоопорами приймаємо: $\alpha = 60^\circ$

Відстань між осями роликоопор визначаємо за геометричною залежністю:

$$L = 2(R + r_p) \sin \frac{\alpha}{2}$$

де R — радіус корпусу, м;

r_p — радіус ролика, м;

α — центральний кут між роликоопорами.

$$L = 2(0,5 + 0,125) \sin 30^\circ = 2 \cdot 0,625 \cdot 0,5 = 0,625 \text{ м}$$

Приймаємо конструктивно: $L = 0,63 \text{ м}$

Отримана відстань забезпечує стійке розміщення корпусу на роликах і достатню площу контакту між поверхнею виробу та гумовим покриттям роликоопор.

Перевірка стійкості корпусу на роликовому обертачі. Критичне значення ексцентриситету для забезпечення стійкості корпусу визначаємо за умовою, що проєкція центра маси не повинна виходити за межі опорної зони:

$$e_{\text{кр}} = R \sin \frac{\alpha}{2} = 0,5 \sin 30^\circ = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ м}$$

Фактичний ексцентриситет: $e = 0,01 \text{ м}$

Оскільки:

$$e < e_{\text{кр}}$$

$$0,01 < 0,25$$

корпус ємнісного підігрівача буде стійко розміщуватися на роликовому обертачі під час повільного обертання.

Визначення навантаження на роликоопори

Приймаємо, що корпус спирається на дві секції роликового обертача: приводну та холосту. Тоді навантаження на одну секцію:

$$G_1 = \frac{G}{2} = \frac{11800}{2} = 5900 \text{ Н}$$

У кожній секції корпус спирається на дві роликоопори. Реакція однієї роликоопори визначається з урахуванням нахилоного положення реакції:

$$Q = \frac{G_1}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{5900}{2 \cdot 0,866} = 3406 \text{ Н}$$

Приймаємо: $Q \approx 3,4 \text{ кН}$

З урахуванням можливих динамічних навантажень, неточності встановлення та дисбалансу вводимо коефіцієнт запасу: $k = 1,25$

Розрахункове навантаження на одну роликоопору:

$$Q_p = kQ = 1,25 \cdot 3406 = 4258 \text{ Н} \approx 4,3 \text{ кН}$$

Отже, для даного корпусу достатньо застосувати роликоопори з допустимим навантаженням не менше 5 кН на один ролик. З урахуванням запасу доцільно прийняти роликоопори вантажопідйомністю 6–8 кН кожна.

Попередній розрахунок осі холостої роликоопори. Вісь ролика розраховуємо як балку, навантажену посередині між двома підшипниковими опорами. Відстань між підшипниками приймаємо: $l_0 = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м}$

Максимальний згинальний момент:

$$M_3 = \frac{Q_p l_0}{4} = \frac{4258 \cdot 0,25}{4} = 266 \text{ Н м}$$

Матеріал осі — сталь 35. Допустиме напруження приймаємо: $[\sigma] = 60 \text{ МПа}$

Діаметр осі визначаємо з умови міцності при згині:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_3}{\pi[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 266}{3,14 \cdot 60 \cdot 10^6}} = 0,0356 \text{ м} \approx 35,6 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр осі холостої роликоопори: $d = 40 \text{ мм}$

Дотична сила на приводних роликах повинна подолати опір від дисбалансу, тертя кочення та тертя у підшипникових вузлах.

Складова дотичної сили від ексцентриситету:

$$T_e = \frac{Ge}{R} = \frac{11800 \cdot 0,01}{0,5} = 236 \text{ Н}$$

Складова від опору коченню:

$$T_\mu = \frac{\mu G}{r_p}$$

де $\mu = 0,0025$ м— коефіцієнт тертя кочення для роликів із гумовим покриттям.

$$T_\mu = \frac{0,0025 \cdot 11800}{0,125} = 236 \text{ Н}$$

Складова від тертя у підшипниках:

$$T_f = f \frac{d}{2r_p} G$$

де $f = 0,05$ — приведений коефіцієнт тертя в підшипникових вузлах;

$d = 0,04$ м— діаметр осі роликоопори.

$$T_f = 0,05 \cdot \frac{0,04}{2 \cdot 0,125} \cdot 11800 = 94,4 \text{ Н}$$

Загальна дотична сила:

$$T = T_e + T_\mu + T_f = 236 + 236 + 94,4 = 566,4 \text{ Н}$$

Приймаємо: $T \approx 570 \text{ Н}$

Крутний момент, необхідний для обертання корпусу:

$$M_{\text{кр}} = T \cdot R = 570 \cdot 0,5 = 285 \text{ Н м}$$

З урахуванням запасу на пуск, можливе проковзування та нерівномірність навантаження приймаємо коефіцієнт: $k_p = 1,5$

$$M_{\text{розр}} = k_p M_{\text{кр}} = 1,5 \cdot 285 = 427,5 \text{ Нм}$$

Приймаємо: $M_{\text{розр}} = 430 \text{ Нм}$

Приводний вал працює під дією згинального моменту від навантаження корпусу та крутного моменту, що передається від привода.

Згинальний момент для приводного ролика: $M_z = 266 \text{ Нм}$

Оскільки приводна секція має два ролики, крутний момент на один приводний ролик становить:

$$M_{\text{кр1}} = \frac{M_{\text{розр}}}{2} = \frac{430}{2} = 215 \text{ Нм}$$

Еквівалентний момент визначаємо за формулою:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M_3^2 + 0,75M_{\text{кр1}}^2} = \sqrt{266^2 + 0,75 \cdot 215^2} = 324,7 \text{ Нм}$$

Діаметр приводного вала:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_{\text{екв}}}{\pi[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 324,7}{3,14 \cdot 60 \cdot 10^6}} = 0,038 \text{ м} \approx 38 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр приводного вала: $d = 45 \text{ мм}$

Визначення потужності приводу. Кутова швидкість обертання корпусу:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5}{60} = 0,523 \text{ рад/с}$$

Потужність, необхідна безпосередньо для обертання корпусу:

$$N_0 = M_{\text{розр}} \omega = 430 \cdot 0,523 = 224,9 \text{ Вт}$$

Приймаємо загальний ККД привода: $\eta = 0,60$

Потужність електродвигуна:

$$N = \frac{N_0}{\eta} = \frac{224,9}{0,60} = 374,8 \text{ Вт} \approx 0,38 \text{ кВт}$$

З урахуванням пускового моменту, можливого забруднення роликів, нерівномірності навантаження та необхідного технологічного запасу приймаємо електродвигун потужністю:

$$N_{\text{дв}} = 0,75 \text{ кВт}$$

Для плавного регулювання швидкості обертання корпусу доцільно використовувати мотор-редуктор із частотним перетворювачем. Це дозволяє точно встановлювати швидкість обертання під час зварювання кільцевих швів і змінювати її під час складальних або контрольних операцій.

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпек і шкідливих факторів під час виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0

Виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 виконується на складально-зварювальній дільниці та включає низку технологічних операцій, пов'язаних із підготовкою листового прокату, формуванням обичайки, складанням корпусу, зварюванням основних і допоміжних елементів, механічною обробкою та контролем якості. Оскільки корпус є відповідальною зварною конструкцією, що працює під внутрішнім тиском, до процесу його виготовлення висуваються підвищені вимоги щодо точності, якості зварних з'єднань і безпеки праці.

До основних операцій виготовлення корпусу належать розкрій листового металу, підготовка кромek, вальцювання заготовки в циліндричну обичайку, складання обичайки з днищами, виконання поздовжнього та кільцевих зварних швів, вирізання отворів під патрубки, приварювання штуцерів, фланців, опор і підсилювальних елементів. Для переміщення листів, обичайок, днищ і готового корпусу застосовують вантажопідіймальні механізми, зокрема мостовий кран.

Під час виконання цих робіт на працівників можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Найбільш характерними з них є підвищений рівень шуму під час різання та механічної обробки металу, виділення зварювального аерозолу й газів, дія ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, висока температура нагрітих деталей, небезпека ураження електричним струмом, можливість опіків, порізів, ударів, защемлень і травмування під час переміщення великогабаритних заготовок.

Особливо небезпечними є операції транспортування елементів корпусу. Під час роботи мостового крана існує ризик падіння вантажу, розгойдування заготовки, пошкодження обладнання або травмування працівників у разі неправильного стропування. Тому переміщення листового прокату, обичайок, днищ і готового корпусу повинно виконуватися лише справними вантажозахоплювальними пристроями з дотриманням установлених правил безпеки.

Під час різання листового металу на гільйотинних ножицях або іншому різальному обладнанні небезпеку становлять рухомі ножі, гострі кромки заготовок, шум, вібрація та можливість травмування рук. Для запобігання нещасним випадкам робоча зона різання повинна мати захисні огороження, а працівники мають користуватися рукавицями, спецодягом і захисними окулярами[33].

Значна кількість небезпечних факторів виникає під час зварювання корпусу. При автоматичному зварюванні поздовжніх і кільцевих швів під флюсом працівник може зазнавати впливу електричного струму, підвищеної температури металу, шуму, а також шкідливих речовин, що утворюються в зоні дуги. Хоча флюс частково екранує дугу, все одно необхідно контролювати справність обладнання, ізоляцію кабелів, заземлення джерела живлення і стан механізмів подачі дроту та флюсу.

При напівавтоматичному зварюванні патрубків, штуцерів, фланців і опор у середовищі захисних газів виникає інтенсивне світлове випромінювання, виділяються зварювальні аерозолі, можливе розбризкування розплавленого металу. Для захисту працівника необхідно застосовувати зварювальні маски зі світлофільтрами, спецодяг із вогнестійкої тканини, рукавиці, захисне взуття та місцеву витяжну вентиляцію.

Під час вирізання отворів у корпусі під патрубки повітряно-плазмовим різанням додатково виникає дія високотемпературного плазмового струменя, яскравого випромінювання, металевого пилу та шуму. Тому зона плазмового різання повинна бути обладнана витяжною вентиляцією, захисними екранами та засобами пожежогасіння.

Окрему увагу необхідно приділяти контролю якості зварних з'єднань. При застосуванні візуально-вимірювального, ультразвукового або капілярного контролю небезпека є відносно незначною, але при використанні рентгенографічного контролю виникає ризик іонізуючого випромінювання. У такому разі потрібно обмежувати доступ до небезпечної зони, використовувати попереджувальні знаки, захисні екрани та проводити контроль лише спеціально підготовленим персоналом [33-34].

4.2 Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічного процесу

Безпечне виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0 можливе лише за умови правильного розміщення обладнання, дотримання технологічної послідовності, справного стану машин і механізмів, а також виконання вимог охорони праці на кожному етапі виробництва. Усі операції повинні виконуватися відповідно до технологічної документації, інструкцій з експлуатації обладнання та правил безпеки.

Монтаж, налагодження і введення в експлуатацію зварювального, різального, вантажопідіймального та допоміжного обладнання повинні проводитися згідно з паспортами, монтажними схемами й інструкціями підприємств-виробників. Перед початком роботи необхідно перевірити технічний стан обладнання, справність огорожень, наявність заземлення, стан електричних кабелів, механізмів керування та засобів аварійного вимкнення.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом усі джерела живлення, зварювальні автомати, напіваавтомати, шафи керування та корпуси обладнання повинні бути надійно заземлені. Струмопровідні частини мають бути закриті кожухами, а кабелі — мати неущожену ізоляцію. Забороняється працювати на обладнанні з пошкодженими проводами, несправним заземленням або відкритими електричними контактами.

Зварювальні пости необхідно обладнувати захисними екранами або щитами, які запобігають поширенню ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання на сусідні робочі місця. Працівники повинні користуватися зварювальними масками або щитками зі світлофільтрами, спецодягом, рукавицями та захисним взуттям. Під час виконання різання, зачищення і шліфування додатково застосовують захисні окуляри або лицеві щитки.

На дільниці виготовлення корпусу необхідно забезпечити ефективну загальнообмінну і місцеву вентиляцію. Місцеві відсмоктувачі доцільно розміщувати безпосередньо біля зон зварювання, плазмового різання та зачищення

металу. Це дозволяє видаляти шкідливі гази, пил і зварювальні аерозолі ще до їх поширення в робочу зону.

Перед початком роботи зварювального трактора, напівавтомата або плазморізальної установки необхідно провести зовнішній огляд обладнання. Перевіряють надійність кріплень, справність механізмів подачі дроту або флюсу, стан кабелів, заземлення, газових рукавів, редукторів і систем керування. У разі виявлення несправностей обладнання до роботи не допускається.

Технічне обслуговування обладнання повинно проводитися згідно з установленим графіком. Воно включає профілактичні огляди, очищення вузлів, перевірку електричних з'єднань, стану ізоляції, заземлення, механічних приводів, систем подачі зварювальних матеріалів і охолодження. Усі виявлені дефекти повинні фіксуватися у журналі огляду, а обладнання може бути допущене до роботи лише після їх усунення.

Підключення, ремонт і налагодження електрозварювального обладнання мають виконувати тільки працівники з відповідним допуском. Зварювальникам і операторам забороняється самостійно втручатися в електричні схеми, ремонтувати джерела живлення або змінювати підключення обладнання.

Під час переміщення обичайок, днищ, листового прокату та готового корпусу необхідно користуватися справними стропами, траверсами або іншими вантажозахоплювальними пристроями. Забороняється перебувати під піднятим вантажем, переміщувати деталі над людьми, а також виконувати стропування без перевірки надійності зачеплення. Вантажі повинні переміщуватися плавно, без ривків і різкого гальмування [33-34].

Особливу увагу необхідно приділяти пожежній безпеці. У зоні зварювання та плазмового різання не допускається зберігання горючих матеріалів, мастил, паперу, деревини та легкозаймистих рідин. Робочі місця повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння, а працівники мають знати порядок дій у разі виникнення пожежі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено технологічний процес виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0. Установлено, що корпус є відповідальною зварною конструкцією, яка під час експлуатації працює під дією внутрішнього тиску, температурних навантажень і повинна забезпечувати повну герметичність робочого об'єму.

У процесі виконання роботи проаналізовано конструкцію виробу, його основні елементи та умови роботи. Визначено, що корпус складається з циліндричної обичайки, днищ, патрубків, штуцерів, фланцевих вузлів та опор. Така конструкція є технологічно зручною для виготовлення, оскільки більшість деталей мають просту геометричну форму й можуть бути виготовлені з використанням механізованих операцій.

Для виготовлення корпусу обґрунтовано застосування сталі 09Г2С. Вона має достатню міцність, пластичність і задовільну зварюваність, що дозволяє використовувати її для відповідальних зварних конструкцій, які працюють під тиском. Матеріал добре піддається розкрою, вальцюванню, складанню та зварюванню.

Проведений аналіз базового технологічного процесу показав, що його основними недоліками є значна частка ручних операцій, недостатнє використання спеціалізованого оснащення та можливість виникнення зварювальних деформацій. Для усунення цих недоліків запропоновано застосування механізованого розкрою, точного вальцювання, складально-зварювальних пристосувань і роликового обертача.

У роботі обґрунтовано вибір способів зварювання корпусу. Для виконання протяжних стикових швів доцільно застосовувати автоматичне зварювання під флюсом, а для приварювання патрубків, штуцерів, опор і допоміжних елементів — механізоване зварювання у середовищі захисних газів. Таке поєднання способів забезпечує високу продуктивність, стабільну якість швів і надійну герметичність з'єднань.

Запропонований технологічний процес охоплює всі основні етапи виготовлення: вхідний контроль матеріалів, підготовку та розкрій заготовок, вальцювання обичайки, складання корпусу, зварювання, встановлення патрубків і опор, контроль якості, випробування на герметичність та нанесення захисного покриття. Така послідовність дозволяє забезпечити належну якість виробу на кожній стадії виробництва.

Окрему увагу приділено контролю якості зварних з'єднань. Для корпусу підігрівача доцільно застосовувати візуальний, вимірювальний та неруйнівний контроль, що дає змогу своєчасно виявляти дефекти й запобігати їх переходу на наступні етапи виготовлення.

Запропонований технологічний процес є технічно обґрунтованим і може бути використаний для виготовлення корпусу ємнісного підігрівача ВПЕГ-1,0. Запропоновані рішення сприяють підвищенню точності складання, якості зварних з'єднань, продуктивності виробництва та надійності готового виробу в експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кривов Г. О., Зворикін К. О. Виробництво зварних конструкцій : підручник. Київ : КВІЦ, 2012. 896 с.
2. <https://tekcom-zavod.com.ua/ua/p1052917014-yomkostnoj-vodonagrevatel-vpeg.html>
3. <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s>
4. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізовуглецевих сплавів : навч. посіб. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2003. 263 с.
5. ДСТУ EN 13445-1:2015. Посудини, що працюють під тиском без вогневого підведення тепла. Частина 1. Загальні положення.
6. ДСТУ EN 13445-3:2015. Посудини, що працюють під тиском без вогневого підведення тепла. Частина 3. Проектування.
7. Водопідігрівачі STD. Технічні характеристики підігрівачів ємнісних ВПЕГ. ТОВ «Хіммашнафтогаз». URL: <https://www.hng-ua.com/vodopidigrivachi-std/>
8. ДСТУ EN ISO 3834-2:2022. Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_iso_3834-2_2022_vimogi_do_yakosti_dlya_zvaryuvannya_p.pdf
9. ДСТУ EN ISO 3834-3:2015. Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 3. Стандартні вимоги до якості. URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/search?query=ДСТУ%20EN%20ISO%203834-3>
10. ДСТУ EN ISO 5817:2022. Зварювання. Зварні з'єднання, виконані зварюванням плавленням. Рівні якості залежно від дефектів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102602
11. ДСТУ ISO 5817:2016. Зварювання. Рівні якості залежно від дефектів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65291
12. ДСТУ EN ISO 9692-1:2014. Зварювання та споріднені процеси. Типи підготовки з'єднань. Частина 1. URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/search?query=ДСТУ%20EN%20ISO%209692-1>
13. Биковський О. Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій : підручник. Київ : Основа, 2021. 400 с.
14. ДСТУ EN ISO 14341:2014. Матеріали зварювальні. Дроти електродні та наплавлений метал для дугового зварювання металевим електродом у захисному газі нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82621

15. ДСТУ EN ISO 14171:2015. Матеріали зварювальні. Суцільні дроти, порошкові дроти та комбінації дріт-флюс для зварювання під флюсом нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82838
16. https://esab.com/lv/eur_en/products-solutions/search/?brand=esab
17. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологія та устаткування зварювання плавленням» / М.І. Підгурський, Б.П. Татарин, І.Б. Окіпний, В.С. Сенчишин. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 95 с.
18. https://esab.com/md/eur_en/products-solutions/product/welding-automation/submerged-arc-welding/column-and-boom-systems/esab-cab-300m/
19. https://kemppi.in.ua/catalog/visokie_technologii/223.htm
20. ДСТУ EN ISO 17637:2017. Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72977
21. ДСТУ EN ISO 17640:2022. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролю та оцінювання. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104111
22. ДСТУ EN ISO 3452-1:2014. Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи. URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/search?query=ДСТУ%20EN%20ISO%203452-1>
23. ДСТУ EN ISO 17638:2016. Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль. URL: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/search?query=ДСТУ%20EN%20ISO%2017638>
24. <https://www.wheelabratorgroup.com/wheelblast-equipment/roller-conveyor-machines/>
25. <https://svartech.com.ua/ua/p1183680545-listopravilnaya-mashina-bendmak.html>
26. <https://machineryline.ua/ru/-/prodazha/stanki-dlya-plazmennoy-rezki/MicroStep/MG-6001-25PrGB--25120201043758466700?srsId=AfmBOopY-gDbjXi6diO2BsANKmUsQHWTz7SgIeWA1Wxn6xtmdrcChpQT>
27. https://www.cevisa.net/bevelling-machines/adjustable-bevelling-machines/bevelling-machine-chp-12g?utm_source=chatgpt.com
28. https://www.davi.com/int/en/plate-roll/4-roll-plate-roll/mca?utm_source=chatgpt.com
29. https://www.bendmakusa.com/machines/dishing-flanging/bfm_flanging_machine?utm_source=chatgpt.com
30. https://www.promotech.eu/product/pro-36rh-petrol-motor-rail-drill/?utm_source=chatgpt.com

31. https://www.clemcoindustries.com/blastrooms?utm_source=chatgpt.com
32. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навч. посібник / А.С. Карпенко. - К.: Арістей, 2005. - 268 с.
33. Безпека життєдіяльності та охорона праці : підруч. / В.В. Сокурєнко, О.М. Бандурка та ін. – Харків : ХНУВС, 2021. 308 с.
34. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві. Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.

ДОДАТКИ