

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня
бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розроблення технологічного процесу виготовлення
цистерни вагона 15-7076**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МПЗс-41
спеціальності 131 «Прикладна механіка»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Тарнавський А.Є.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Підгурський М.І.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Дячун А.Є.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Окіпний І.Б.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u></u> (підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробленню технологічного процесу виготовлення цистерни вагона моделі 15-7076, призначеної для перевезення світлих нафтопродуктів. У роботі розглянуто конструктивні особливості вагона-цистерни, наведено характеристику основних елементів котла, торцевих днищ, люк-горловини, зливного пристрою, опорних зон і допоміжних вузлів. Особливу увагу приділено вимогам до герметичності, міцності та якості зварних з'єднань котла, оскільки саме вони визначають надійність і безпечність експлуатації цистерни.

У аналітичній частині виконано опис конструкції виробу, проаналізовано матеріал котла цистерни та обґрунтовано застосування низьколегованої сталі 09Г2С, яка характеризується достатньою міцністю, пластичністю, опором крихкому руйнуванню та доброю зварюваністю. Розглянуто технічні умови на виготовлення цистерни, вимоги до листового прокату, підготовки кромки, складання обичайок, приварювання торцевих днищ, встановлення люк-горловини, зливного пристрою та контролю якості зварних з'єднань.

У технологічній частині проведено аналіз базового технологічного процесу виготовлення котла цистерни та визначено його основні недоліки: значна трудомісткість складальних операцій, потреба у багаторазовому переміщенні виробу, можливість виникнення зварювальних деформацій, залежність якості швів від точності підготовки кромки і тривалий цикл контролю. На основі аналізу запропоновано вдосконалений технологічний процес із використанням сучасного обладнання для підготовки листового прокату, вальцювання обичайок, формування боковин, складання, зварювання та контролю якості.

Для виконання основних стикових швів котла запропоновано застосування автоматичного зварювання під шаром флюсу, а для приварювання люк-горловини, патрубків, зливного пристрою, підсилювальних накладок і допоміжних елементів — механізоване зварювання в середовищі захисних газів. Також обґрунтовано застосування сучасної системи контролю якості, що включає візуально-

вимірювальний контроль, ультразвуковий контроль із використанням Evident OmniScan X4, капілярний контроль і випробування котла на герметичність.

У конструкторській частині описано складально-зварювальну установку роликового типу, яка забезпечує центрування обичайок, встановлення торцевих боковин, вирівнювання крайок, виконання прихваток і зварювання кільцевих швів у нижньому положенні. Конструкція установки включає роликовий стенд-обертач, центрувально-притискний портал, осьові упори, приводні та холості роликоопори, гідравлічні притискні циліндри й пульт керування.

У розділі з безпеки життєдіяльності та охорони праці розглянуто вплив електромагнітного випромінювання на організм людини, організаційно-технічні заходи щодо поліпшення умов праці зварника та вимоги електробезпеки під час експлуатації зварювального обладнання.

Ключові слова: ВАГОН-ЦИСТЕРНА 15-7076, КОТЕЛ ЦИСТЕРНИ, , МАГ-ЗВАРЮВАННЯ, ЗВАРНЕ З'ЄДНАННЯ, РОЛИКОВИЙ СТЕНД, СКЛАДАЛЬНО-ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Опис конструкції зварного виробу.....	9
1.2 Характеристика матеріалу виробу.....	12
1.3 Технічні умови на виготовлення виробу	15
1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу.....	21
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	27
2.1 Обґрунтування способу зварювання	27
2.3 Вибір методу контролю якості виробу	44
2.4 Опис запропонованого технологічного процесу виготовлення цистерни вагона 15-7076.....	48
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	59
3.1 Розрахунок роликового стенду-обертача для котла цистерни 15-7076.....	59
3.2 Опис конструкції і роботи складально-зварювального обладнання.....	64
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	67
4.1 Вплив електромагнітного випромінювання на організм людини.....	67
4.2 Організаційно-технічні заходи щодо поліпшення умов праці зварника.....	68
4.3 Забезпечення електробезпеки при експлуатації зварювального обладнання...	70
ВИСНОВКИ.....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75
ДОДАТОК.....	78

ВСТУП

Зварювання є одним із найважливіших і найбільш ефективних технологічних процесів отримання нероз'ємних з'єднань, що широко застосовується у промисловості, машинобудуванні, будівництві, транспортному виробництві та багатьох інших галузях. Завдяки високій продуктивності, економічності та можливості створення міцних металевих конструкцій складної форми зварювальне виробництво постійно розвивається і вдосконалюється.

Сучасне зварювальне виробництво характеризується широким використанням прогресивного обладнання, автоматизованих і роботизованих комплексів, а також новітніх технологічних рішень. Значна частина зварювальних процесів виконується із застосуванням концентрованих джерел теплової енергії, які забезпечують локальне нагрівання матеріалу до необхідного температурного стану. При цьому в зоні зварювання відбуваються складні фізико-хімічні, теплові та металургійні процеси, що безпосередньо впливають на формування структури металу шва, якість з'єднання та експлуатаційну надійність готової конструкції.

Процес зварювання є досить складним, оскільки охоплює велику кількість способів, які ґрунтуються на різних фізичних принципах дії. До них належать дугове, газове, контактне, електрошлакове, лазерне, електронно-променеве, плазмове та інші види зварювання. Кожен із цих методів має свої технологічні особливості, сферу застосування, переваги та обмеження. Завдяки цьому зварювання може використовуватися для з'єднання не лише металів і сплавів, а й окремих неметалевих матеріалів, зокрема пластмас, кераміки та скла [1].

Особливістю зварювальних технологій є їх універсальність і можливість застосування в різноманітних умовах експлуатації та виробництва. Зварювальні роботи виконують не тільки в наземних умовах, а й під водою, у важкодоступних місцях, у вакуумі та навіть у космічному просторі. При цьому діапазон товщин зварюваних елементів є надзвичайно широким — від мікрометрових розмірів у приладобудуванні та мікроелектроніці до масивних металоконструкцій великої товщини, що застосовуються у важкому машинобудуванні, суднобудуванні та будівництві.

У багатьох випадках зварювання є найбільш раціональним, а інколи й єдино можливим способом отримання міцного та надійного нероз'ємного з'єднання конструкційних матеріалів. Його використання дає змогу зменшити витрати металу, скоротити трудомісткість виготовлення виробів, підвищити рівень механізації та автоматизації виробничих процесів. Крім того, зварювання дозволяє отримувати заготовки та конструкції, форма яких максимально наближена до геометрії готового виробу, що сприяє підвищенню ресурсозбереження та ефективності виробництва. [1].

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис конструкції зварного виробу

Вагони-цистерни належать до спеціалізованого вантажного рухомого складу, призначеного для перевезення рідких, в'язких, легкозаймистих та інших наливних вантажів без використання додаткової тари. Їх конструкція повинна забезпечувати герметичність котла, достатню міцність під час дії статичних і динамічних навантажень, безпечне виконання операцій наливу та зливу, а також надійну роботу вагона в умовах тривалої експлуатації на залізничних коліях [2].

У даній роботі розглядається технологічний процес виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 (рис. 1.1 та 1.2), який призначений для перевезення світлих нафтопродуктів. За конструктивним виконанням це чотиривісний вагон-цистерна для колії 1520 мм, обладнаний котлом великого об'єму, ходовими частинами, автозчепним обладнанням, гальмівною системою та пристроями для наливу і зливу вантажу. Згідно з відкритими технічними даними, для моделі 15-7076 зазначаються вантажопідйомність близько 67,3–68 т, повний об'єм котла 85,6 м³, конструкційна швидкість 120 км/год, довжина по осях автозчепів 12020 мм, габарит 1-Т та розрахункове навантаження від колісної пари на рейки 230,5 кН. Для кузовних елементів вказуються низьколеговані сталі типу 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12, які широко застосовуються у вагонобудуванні завдяки поєднанню міцності, зварюваності та працездатності за змінних температурних умов [2].

Основним несучим і робочим елементом цистерни є котел, який являє собою горизонтально розміщену зварну циліндричну оболонку, закриту з торців днищами. Саме котел сприймає тиск наливного вантажу, інерційні навантаження під час руху, гідравлічні удари при гальмуванні та прискоренні, а також температурні впливи зовнішнього середовища. Конструкція котла повинна забезпечувати герметичність, мінімальну залишкову деформацію після зварювання та достатню жорсткість у місцях приєднання опорних, зливних і наливних вузлів.



Рис. 1.1 – Загальний вигляд залізничної цистерни для перевезення світлих нафтопродуктів [2]

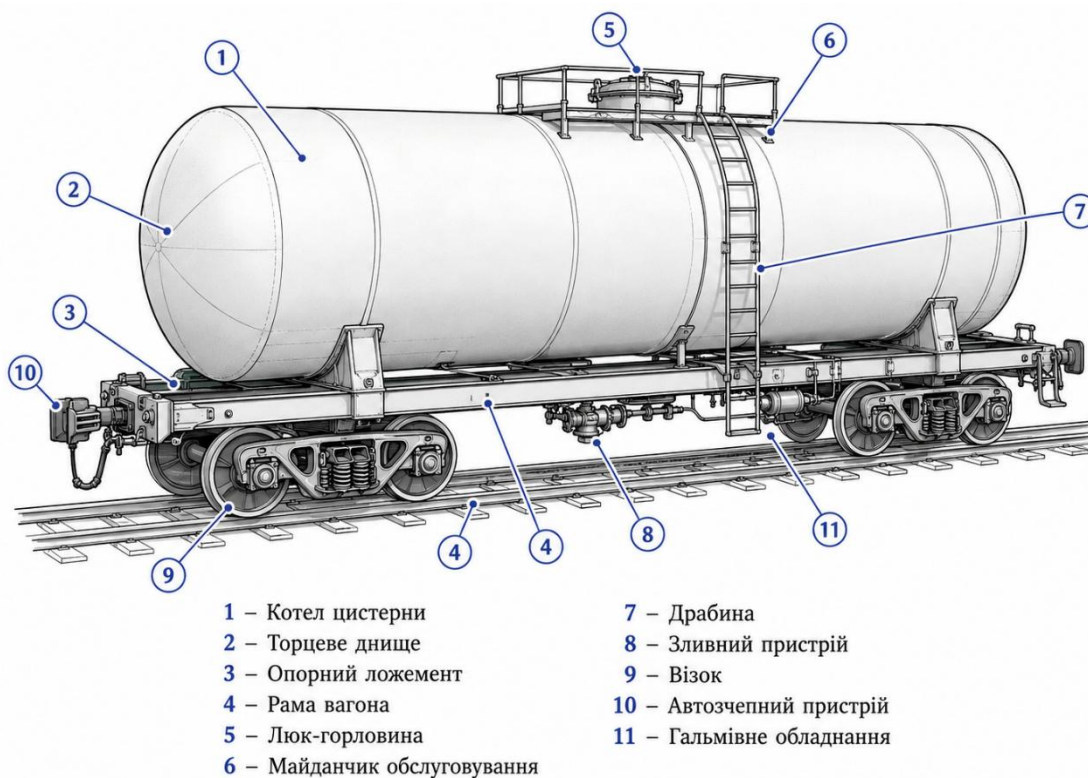


Рис. 1.2 – Конструкція вагона-цистерни моделі 15-7076 з позначенням основних елементів

Корпус котла формується з окремих листових заготовок, які після вальцювання утворюють циліндричні обичайки. Між собою обичайки з'єднуються кільцевими зварними швами, а поздовжній стик кожної обичайки виконується зварюванням із забезпеченням повного провару металу. Торцеві частини котла закриваються штампованими або формованими днищами, які приварюються до крайніх обичайок по кільцевому контуру. Така схема дозволяє отримати просторово жорстку герметичну оболонку з рівномірним розподілом напружень у стінках.

У верхній частині котла розміщується наливна горловина з люком, через яку здійснюється заповнення цистерни, огляд внутрішньої поверхні, очищення та виконання регламентних робіт. Люковий вузол посилюється приварними елементами, оскільки в зоні вирізу виникає локальне послаблення оболонки. Для компенсації цього послаблення застосовують підсилювальні кільця, накладки або спеціальні конструктивні обрамлення, які підвищують жорсткість ділянки та знижують концентрацію напружень.

У нижній частині котла передбачаються елементи зливного пристрою, через які виконується спорожнення цистерни. Зливний вузол є відповідальним конструктивним елементом, оскільки він повинен забезпечувати герметичність при транспортуванні вантажу та зручність під'єднання зливної арматури під час розвантаження. У зоні встановлення зливного пристрою також передбачаються місцеві підсилення, оскільки ця частина котла піддається дії додаткових технологічних і експлуатаційних навантажень.

Котел вагона-цистерни встановлюється на раму вагона, яка сприймає навантаження від маси котла, вантажу, ударно-тягових зусиль, гальмівних сил і динамічних впливів під час руху. Рама складається з поздовжніх і поперечних балок, кінцевих частин, шворневих зон, опорних елементів та вузлів кріплення автозчепного і гальмівного обладнання. З'єднання котла з рамою виконується через опорні ложементи або спеціальні опорні вузли, які забезпечують рівномірне передавання навантаження від циліндричної оболонки на металоконструкцію рами.

Особливу увагу в конструкції цистерни приділяють зонам контакту котла з опорами. У цих місцях можливе виникнення підвищених місцевих напружень, тому застосовуються підсилювальні накладки, ребра жорсткості та опорні елементи збільшеної площі. Це дає змогу зменшити ризик деформації оболонки, підвищити довговічність зварних з'єднань і забезпечити стабільне положення котла на рамі протягом усього строку служби вагона.

Зварна конструкція вагона-цистерни 15-7076 включає значну кількість відповідальних швів: поздовжні та кільцеві шви котла, шви приварювання днищ, з'єднання горловини, зливного вузла, опорних елементів, підсилювальних накладок, а також шви рами. Найбільш відповідальними є шви котла, оскільки саме вони визначають герметичність і безпечність експлуатації цистерни. До них висуваються підвищені вимоги щодо якості формування, відсутності тріщин, непроварів, пор, підрізів та інших дефектів, які можуть знизити міцність або герметичність конструкції.

1.2 Характеристика матеріалу виробу

Для виготовлення котла вагона-цистерни моделі 15-7076 доцільно застосовувати низьколеговану конструкційну сталь 09Г2С. Цей матеріал широко використовується у вагонобудуванні, машинобудуванні та виробництві відповідальних зварних металоконструкцій, які працюють під дією статичних, динамічних і змінних навантажень. Згідно з технічними даними для вагона-цистерни 15-7076, як матеріал кузова можуть застосовуватися сталі 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12.

Вибір сталі 09Г2С для котла цистерни є технічно обґрунтованим, оскільки цей матеріал поєднує достатню міцність, пластичність, опір крихкому руйнуванню та добру зварюваність. Для вагона-цистерни це має особливе значення, оскільки котел цистерни 1, торцеві днища 2, зони встановлення люк-горловини 5, зливного пристрою 8 та ділянки опирання на ложементи 3 під час експлуатації зазнають складного напруженого стану.

Позначення сталі 09Г2С характеризує її орієнтовний хімічний склад. Число 09 вказує на вміст вуглецю близько 0,09 %, літера Г означає наявність марганцю, цифра 2 — підвищений вміст марганцю до приблизно 2 %, а літера С вказує на наявність кремнію. Завдяки такому легуванню сталь має вищу міцність порівняно з вуглецевими сталями звичайної якості, зберігаючи при цьому достатню пластичність і здатність до зварювання.

У конструкції вагона-цистерни 15-7076 сталь 09Г2С може застосовуватися для виготовлення основних елементів котла: циліндричних обичайок, торцевих днищ, підсилювальних накладок, елементів горловини, патрубків, опорних зон і частини зварних вузлів, які безпосередньо працюють у складі герметичної оболонки. Для рами вагона також можуть використовуватися низьколеговані сталі аналогічного класу міцності, оскільки рама сприймає навантаження від котла, вантажу, візків, автозчепного та гальмівного обладнання.

Хімічний склад сталі 09Г2С наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 09Г2С, % [3]

Марка сталі	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
09Г2С	0,09–0,12	1,30–1,70	0,50–0,80	до 0,035	до 0,035	до 0,30	до 0,30	до 0,30

Низький вміст вуглецю у сталі 09Г2С позитивно впливає на її зварюваність, оскільки зменшує ймовірність утворення твердих загартованих структур у зоні термічного впливу. Марганець підвищує міцність сталі, сприяє зменшенню шкідливого впливу сірки та покращує технологічні властивості металу. Кремній виконує роль розкиснювача і додатково підвищує міцність, не спричиняючи суттєвого зниження пластичності за умови дотримання нормативного вмісту.

Обмежений вміст сірки та фосфору є важливою умовою для виготовлення відповідальних зварних конструкцій. Надмірна кількість цих домішок може знижувати пластичність металу, підвищувати схильність до утворення гарячих тріщин і погіршувати якість зварних з'єднань. Тому під час виготовлення котла

цистерни необхідно використовувати металопродукт із підтвердженим хімічним складом і сертифікатом якості.

Основні механічні властивості сталі 09Г2С наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні механічні властивості сталі 09Г2С [3]

Марка сталі	Стан матеріалу	Границя текучості σ_t , МПа	Тимчасовий опір розриву σ_b , МПа	Відносне видовження δ_5 , %	Ударна в'язкість
09Г2С	Гарячекатаний листовий прокат	не менше 345	490–640	не менше 21	нормується залежно від товщини прокату і температури випробування

Наведені властивості свідчать, що сталь 09Г2С має достатній запас міцності для виготовлення котла цистерни, який працює під дією маси наливного вантажу, внутрішнього тиску, інерційних сил, вібрацій та температурних коливань. Границя текучості не менше 345 МПа забезпечує опір залишковим деформаціям оболонки котла, а тимчасовий опір розриву в межах 490–640 МПа характеризує здатність матеріалу витримувати значні силові впливи без руйнування.

Важливою перевагою сталі 09Г2С є її пластичність. Відносне видовження не менше 21 % дає змогу матеріалу частково сприймати локальні деформації без утворення тріщин. Для вагона-цистерни це особливо важливо, оскільки під час руху рідкий вантаж створює додаткові гідродинамічні впливи на стінки котла, а в місцях розташування опорних ложементів, люк-горловини та зливного вузла можуть виникати локальні концентрації напружень [4-8].

Найбільш навантаженими ділянками котла є кільцеві та поздовжні стикові шви обичайок, місця приварювання торцевих днищ, зона встановлення люк-горловини, ділянка зливного пристрою та опорні зони, через які навантаження передається на ложементи й раму вагона. У цих місцях необхідно забезпечити якісну підготовку кромок, точне складання деталей, мінімальне зміщення стиків і стабільне тепловкладення під час зварювання.

Однією з головних причин застосування сталі 09Г2С у конструкції котла цистерни є її добра зварюваність. Під зварюваністю розуміють здатність металу утворювати якісне нероз'ємне з'єднання без значного погіршення властивостей основного металу, металу шва та зони термічного впливу. Для котла цистерни це має визначальне значення, оскільки зварні шви повинні забезпечувати не лише міцність, а й повну герметичність оболонки.

Попередню оцінку зварюваності сталі 09Г2С можна виконати за еквівалентним вмістом вуглецю. Цей показник враховує вплив вуглецю та легувальних елементів на схильність сталі до утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу.

Еквівалент вуглецю визначають за формулою [4]:

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

де C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu — масова частка відповідних елементів у сталі, %.

$$C_{\text{екв}} = 0,09 + \frac{1,50}{6} + \frac{0,20}{5} + \frac{0,20 + 0,20}{15} = 0,407.$$

Розраховане значення еквівалента вуглецю становить приблизно 0,41, що підтверджує добру зварюваність сталі 09Г2С. Такий матеріал придатний для виготовлення відповідальних зварних вузлів котла цистерни за умови дотримання технологічних режимів зварювання, правильного вибору зварювальних матеріалів і контролю якості зварних з'єднань.

1.3 Технічні умови на виготовлення виробу

Виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 належить до відповідальних технологічних процесів, оскільки конструкція працює в умовах дії значних статичних, динамічних, температурних та експлуатаційних навантажень. Основним зварним вузлом виробу є котел цистерни 1, який повинен забезпечувати герметичність, міцність і стійкість форми під час перевезення наливного вантажу. Тому до матеріалів, заготовок, складання, зварювання та контролю якості висуваються підвищені технічні вимоги [9-15].

Технічні умови на виготовлення цистерни встановлюють вимоги до якості металопрокату, точності виготовлення елементів котла, підготовки кромek, складання обичайок, приварювання торцевих днищ 2, встановлення люк-горловини 5, зливного пристрою 8, опорних ложементів 3, а також до якості зварних з'єднань і контролю готового виробу.

Для виготовлення котла цистерни повинні застосовуватися матеріали, передбачені конструкторською та технологічною документацією. Основним матеріалом для відповідальних елементів котла доцільно приймати низьколеговану конструкційну сталь 09Г2С, яка має добру зварюваність, достатню міцність і пластичність.

Матеріали, що надходять у виробництво, повинні відповідати чинним стандартам і технічним умовам. Кожна партія листового прокату повинна супроводжуватися сертифікатом якості, у якому зазначаються марка сталі, номер плавки, хімічний склад, механічні властивості, товщина листа та результати випробувань. За відсутності супровідної документації матеріал допускається до використання лише після проведення вхідного контролю та лабораторних випробувань.

Перед запуском у виробництво металопрокат необхідно оглянути, очистити та перевірити на відсутність дефектів. Не допускається використання листів із тріщинами, розшаруваннями, глибокими рисками, закатами, надривами, значними корозійними пошкодженнями або іншими дефектами, які можуть знизити міцність і герметичність котла. Тонкий шар окалини або поверхневої корозії допускається лише за умови, що він не перешкоджає виявленню дефектів і повністю видаляється перед зварюванням.

Заготовки для виготовлення обичайок котла, днищ, підсилювальних накладок, елементів горловини та зливного вузла повинні виготовлятися відповідно до креслень і технологічних карт. Розкрій листового металу необхідно виконувати з урахуванням припусків на обробку, формування кромek, вальцювання та можливу усадку після зварювання.

Кромки деталей після механічного, плазмового або газового різання повинні бути очищені від ґрату, шлаку, бризок металу, напливів та слідів окиснення. Поверхні, які підлягають зварюванню, зачищаються до чистого металу на ширину не менше 20 мм від кромки з кожного боку. У зоні зварювання не допускається наявність вологи, мастила, фарби, іржі, окалини та інших забруднень.

Підготовка кромки повинна забезпечувати повний провар зварного з'єднання. Для стикових швів обичайок і днищ форма розкриття кромки, величина притуплення та зазор між деталями встановлюються технологічним процесом залежно від товщини металу та способу зварювання. Для автоматичного зварювання під шаром флюсу зазор між крайками повинен бути стабільним і не виходити за межі, передбачені технологічною документацією. Орієнтовно допустиме відхилення зазору може становити до $\pm 1,5$ мм, якщо інше не встановлено кресленнями або технічними умовами.

Обичайки котла цистерни виготовляють із листового прокату шляхом вальцювання. Після вальцювання обичайка повинна мати правильну циліндричну форму без різко вираженої овальності, місцевих вм'ятин, хвилястості та зламів у зоні поздовжнього стику. Відхилення зовнішнього діаметра обичайки не повинно перевищувати значень, установлених кресленнями та технологічними умовами.

Особливу увагу необхідно приділяти точності стикування кромки поздовжнього шва. Зміщення кромки стикуваних листів не повинно перевищувати 10 % від товщини тоншого елемента, оскільки надмірний зсув призводить до концентрації напружень, погіршення формування шва та зниження міцності оболонки. Усі стикові з'єднання обичайок повинні забезпечувати повний провар і плавний перехід металу шва до основного металу.

Під час транспортування, переміщення та кантування обичайок необхідно застосовувати спеціальні траверси, захвати, роликові опори або інше оснащення, яке запобігає деформації заготовок. Забороняється виконувати переміщення способом, що може спричинити зминання кромки, появу вм'ятин або порушення геометрії циліндричної оболонки.

Складання котла повинно виконуватися на спеціалізованих складально-зварювальних стендах або роликових опорах, які забезпечують співвісність обичайок, правильне положення торцевих днищ і стабільність геометрії виробу. Під час складання необхідно контролювати діаметр котла, овальність, прямолінійність поздовжньої осі, зазори у стиках і зміщення кромок.

Припасування деталей із застосуванням значних силових дій не допускається, оскільки це може спричинити виникнення додаткових внутрішніх напружень у металі. Якщо виявлено невідповідність форми або розмірів заготовок, її необхідно усунути до початку складання шляхом правлення, механічної обробки або повторної підготовки елемента.

Прихватки повинні виконуватися зварювальними матеріалами, передбаченими для основного зварювання. Розміри, кількість і розташування прихваток встановлюються технологічним процесом. Прихватки мають бути якісними, без тріщин, пор, підрізів і непроварів. Перед виконанням основного шва дефектні прихватки необхідно видалити або виправити.

Остаточний зібраний вузол перед зварюванням повинен бути перевірений майстром і представником відділу технічного контролю. Контролю підлягають правильність складання, відповідність розмірів кресленню, стан кромок, чистота поверхонь, величина зазорів, зміщення кромок і надійність фіксації деталей.

Зварювання котла цистерни повинно виконуватися за затвердженим технологічним процесом. У технологічній документації мають бути зазначені спосіб зварювання, тип з'єднання, форма підготовки кромок, марка зварювальних матеріалів, сила струму, напруга дуги, швидкість зварювання, полярність, кількість проходів, послідовність накладання швів і вимоги до міжопераційного контролю.

Поздовжні та кільцеві шви обичайок, а також шви приварювання торцевих днищ доцільно виконувати автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Такий спосіб забезпечує стабільне формування шва, високу продуктивність, достатню глибину проплавлення та добру якість стикових з'єднань. Приварювання допоміжних елементів, підсилювальних накладок, деталей люк-горловини,

зливного вузла та елементів кріплення може виконуватися напівавтоматичним зварюванням у середовищі захисних газів.

Температура навколишнього середовища під час зварювання повинна бути не нижче $+5^{\circ}\text{C}$, якщо інше не передбачено технологічними умовами. У разі виконання робіт за нижчих температур необхідно застосовувати попередній підігрів, захист зони зварювання від протягів, вологи та швидкого охолодження.

До виконання зварювальних робіт допускаються лише зварники відповідної кваліфікації. Для відповідальних швів котла цистерни доцільно залучати зварників не нижче IV розряду, які мають допуск до виконання робіт на відповідальних зварних конструкціях.

Зварні шви котла повинні мати рівномірну форму, плавний перехід до основного металу та відповідати розмірам, указаним у кресленнях. Поверхня шва повинна бути рівною, без різких перепадів, напливів, прожогів, кратерів, тріщин, пор, шлакових включень, підрізів і непроварів.

Посилення стикових швів повинно відповідати вимогам стандартів і технічної документації. Якщо висота окремих нерівностей або гребінців на поверхні стикового шва перевищує допустимі значення, вони повинні бути зачищені до плавного переходу без пошкодження основного металу. Не допускається надмірне шліфування, яке може зменшити товщину стінки котла нижче допустимої.

Зварні з'єднання, що забезпечують герметичність котла, належать до найбільш відповідальних. До них відносять:

- поздовжні шви обичайок котла;
- кільцеві шви між обичайками;
- шви приварювання торцевих днищ;
- шви люк-горловини;
- шви зливного пристрою;
- шви підсилювальних накладок у зонах опирання.

Саме ці з'єднання повинні проходити підвищений контроль якості, оскільки від них залежить безпечна експлуатація цистерни.

Готовий котел цистерни повинен відповідати кресленням за основними геометричними параметрами: довжиною, діаметром, овальністю, розташуванням горловини, положенням зливного пристрою, місцями встановлення опорних ложементів і підсилювальних елементів. Відхилення розмірів не повинні перевищувати допустимих значень, установлених технічною документацією.

Вимоги до точності виготовлення елементів котла наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні технічні вимоги до виготовлення елементів котла цистерни

Елемент або параметр	Технічна вимога
Листовий прокат	Повинен відповідати сертифікату якості та вимогам до сталі 09Г2С
Поверхня листів	Без тріщин, розшарувань, надривів, глибокої корозії та механічних пошкоджень
Кромки після різання	Очищені від грату, шлаку, бризок і напливів
Зона біля шва	Очищена до чистого металу на ширину не менше 20 мм
Зміщення кромок у стикових з'єднаннях	Не більше 10 % товщини тоншого елемента
Зазор під автоматичне зварювання	У межах, установлених технологічною картою; орієнтовно до $\pm 1,5$ мм
Форма обичайки	Без значної овальності, хвилястості та місцевих деформацій
Торцеві днища	Повинні щільно стикуватися з крайніми обичайками без примусового припасування
Люк-горловина	Встановлюється у проектному положенні з обов'язковим підсиленням зони вирізу
Зливний пристрій	Розміщується в нижній частині котла з підсиленням зони встановлення
Зварні шви	Без тріщин, непроварів, прожогів, підрізів, пор і шлакових включень
Геометрія котла після зварювання	Повинна відповідати кресленням і не мати недопустимих залишкових деформацій

Контроль якості повинен виконуватися на всіх етапах виготовлення цистерни. На першому етапі проводять вхідний контроль матеріалів, перевірку сертифікатів, огляд листового прокату та контроль його геометричних параметрів. На другому етапі перевіряють якість розкрою, підготовки кромок, вальцювання обичайок і формування днищ.

Після складання котла здійснюють операційний контроль: перевіряють правильність взаємного розташування елементів, величину зазорів, зміщення кромek, співвісність секцій, положення горловини, зливного пристрою та опорних зон. Лише після позитивного висновку контролю допускається виконання основного зварювання.

Після зварювання всі шви повинні пройти зовнішній огляд і вимірювальний контроль. Відповідальні стикові шви котла необхідно контролювати неруйнівними методами. Для цього можуть застосовуватися ультразвуковий, радіографічний, капілярний або магнітопорошковий контроль залежно від типу шва, товщини металу та вимог технічної документації.

Окремо перевіряється герметичність котла. Для цього можуть застосовуватися гідравлічні, пневматичні або інші випробування, передбачені технологічними умовами. Під час випробування не допускається поява течії, запотівання, залишкових деформацій, тріщин або інших ознак порушення герметичності.

Після завершення зварювання та контролю котел цистерни повинен бути очищений від шлаку, бризок металу, залишків флюсу, забруднень і продуктів корозії. Дефектні місця, виявлені під час контролю, підлягають виправленню за затвердженою технологією з обов'язковим повторним контролем.

Готовий виріб повинен відповідати кресленням за конструкцією, розмірами, положенням основних вузлів і якістю зварних з'єднань. Поверхні, які підлягають фарбуванню або нанесенню захисного покриття, повинні бути підготовлені відповідно до вимог технологічного процесу. Антикорозійний захист має забезпечувати стійкість металоконструкції до атмосферного впливу, вологи, температурних змін і експлуатаційних забруднень.

1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу

Базовий технологічний процес виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 передбачає послідовне виготовлення окремих елементів котла, їх складання у просторову оболонкову конструкцію, виконання відповідальних зварних з'єднань,

контроль якості та випробування готового виробу на герметичність. Основним об'єктом виготовлення є котел цистерни, який складається з циліндричних обичайок, торцевих днищ, люк-горловини, зливного пристрою, підсилювальних накладок і опорних зон.

Котел цистерни є найбільш відповідальним вузлом вагона, оскільки саме він забезпечує розміщення та безпечне транспортування наливного вантажу. У процесі експлуатації на нього діють навантаження від маси вантажу, гідродинамічні удари рідини, температурні коливання, вібрації, а також сили, що виникають під час руху, гальмування та маневрових операцій. Тому базова технологія виготовлення повинна забезпечувати не тільки міцність зварних з'єднань, але й точність геометричної форми котла, стабільність розмірів, відсутність недопустимих залишкових деформацій і повну герметичність.

Базовий технологічний процес можна представити у вигляді таких основних етапів:

I. Вхідний контроль матеріалів. На початковому етапі здійснюється перевірка листового прокату, зварювальних матеріалів і комплектувальних елементів. Перевіряють наявність сертифікатів якості, марку сталі, товщину листів, хімічний склад, механічні властивості та стан поверхні. Для виготовлення котла цистерни доцільно використовувати сталь 09Г2С, яка має добру зварюваність, достатню міцність і пластичність. Листи з тріщинами, розшаруваннями, глибокою корозією або іншими дефектами до виготовлення відповідальних елементів не допускаються.

II. Підготовка листового прокату та розкрій заготовок. Після приймання листовий метал очищають, за потреби правлять і подають на розкрій. Заготовки для обичайок, днищ, підсилювальних накладок, горловини та зливного вузла виготовляють відповідно до карт розкрою. При цьому враховують припуски на обробку кромek, вальцювання та усадку металу після зварювання. Якість розкрою має важливе значення, оскільки неточність на цьому етапі ускладнює подальше складання котла.

III. Підготовка кромок під зварювання. Кромки після різання очищають від ґрату, шлаку, окалини, напливів і бризок металу. Поверхні в зоні майбутнього шва зачищають до чистого металу. Якісна підготовка кромок є однією з основних умов отримання надійного стикового з'єднання, оскільки забруднення, нерівномірний зазор або зміщення кромок можуть призвести до непроварів, пор, шлакових включень і зниження герметичності котла.

IV. Виготовлення обичайок котла. Обичайки формують із листових заготовок методом вальцювання. Після надання листу циліндричної форми перевіряють діаметр, овальність, прямолінійність кромок і збіг стику. Поздовжній стик обичайки фіксують прихватками, після чого виконують основне зварювання. Саме на цьому етапі формується геометрична основа котла, тому від точності вальцювання залежить подальша якість складання всієї цистерни.

V. Зварювання поздовжніх швів обичайок. Поздовжні шви є відповідальними, оскільки вони входять до складу герметичної оболонки котла. У базовому процесі їх доцільно виконувати автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Такий спосіб забезпечує високу продуктивність, стабільне формування шва, достатню глибину проплавлення та зменшення впливу людського фактора. Після зварювання шви очищають і піддають візуально-вимірному контролю.

VI. Виготовлення та підготовка торцевих днищ. Торцеві днища виготовляють із листового прокату методом формування або штампування. Вони повинні мати правильну геометричну форму, оскільки нерівномірне стикування днища з обичайкою може призвести до утворення внутрішніх напружень і деформацій після зварювання. Перед складанням кромки днищ обробляють і очищають.

VII. Складання котла з обичайок і днищ. Окремі обичайки встановлюють на роликові опори або спеціалізований складально-зварювальний стенд. Під час складання контролюють співвісність секцій, величину зазорів, зміщення кромок і загальну прямолінійність котла. Після складання циліндричної частини до крайніх обичайок приєднують торцеві днища. Складання повинно виконуватися без примусового припасування, оскільки силове зведення деталей може викликати додаткові залишкові напруження.

VIII. Зварювання кільцевих швів і швів приварювання днищ. Кільцеві шви між обичайками та шви приварювання днищ є одними з найбільш відповідальних у конструкції котла. Їх виконують за заданою послідовністю, щоб зменшити зварювальні деформації. Після зварювання шви очищають, оглядають і контролюють неруйнівними методами.

IX. Встановлення люк-горловини та зливного пристрою. У верхній частині котла виконується отвір під люк-горловину, а в нижній частині — місце для зливного пристрою. Ці ділянки є конструктивно послабленими, тому потребують встановлення підсилювальних накладок або кілець. Приварювання горловини, патрубків і фланцевих елементів повинно виконуватися з особливою увагою до герметичності та якості формування шва.

X. Встановлення опорних зон і підсилювальних елементів. Опорні ложементи забезпечують передавання навантаження від котла на раму вагона. У місцях контакту котла з опорами виникають місцеві напруження, тому ці ділянки підсилюють накладками або ребрами жорсткості. Якість виконання цих вузлів впливає на довговічність котла та стійкість його геометрії під час експлуатації.

XI. Слюсарна обробка зварних швів. Після виконання зварювальних операцій проводиться очищення швів і навколошовної зони. Видаляють бризки металу, залишки флюсу, шлак, гострі нерівності, напливи та дефектні кратери. Ця операція необхідна не тільки для покращення зовнішнього вигляду, але й для якісного проведення подальшого контролю.

XII. Контроль якості зварних з'єднань. Контроль виконується після кожної відповідальної операції. На етапі складання застосовують візуально-вимірювальний контроль, за допомогою якого перевіряють зазори, зміщення кромek і правильність взаємного положення деталей. Після зварювання виконують зовнішній огляд, вимірювання швів, а для відповідальних з'єднань — ультразвуковий, радіографічний або капілярний контроль. Особливо ретельно перевіряють поздовжні та кільцеві шви котла, з'єднання днищ, горловини і зливного пристрою.

XIII. Випробування котла на герметичність. Остаточний зварений котел проходить випробування на герметичність. Під час випробування перевіряють відсутність течії, запотівання, тріщин і залишкових деформацій. Позитивний результат випробування підтверджує придатність котла до подальшого складання, фарбування та експлуатації.

XIV. Очищення, фарбування і завершальні операції. Після контролю котел очищають від технологічних забруднень, продуктів корозії та залишків зварювальних матеріалів. Поверхню готують до нанесення захисного покриття. Далі виконується фарбування, маркування, монтаж допоміжних елементів і передача виробу на подальше складання з рамою вагона.

Базовий технологічний процес має низку позитивних сторін. Насамперед він забезпечує поетапне виготовлення котла з можливістю контролю якості після кожної відповідальної операції. Паралельне виготовлення окремих елементів, зокрема обичайок, днищ, горловини, підсилювальних деталей і зливного вузла, дає змогу скоротити тривалість виробничого циклу. Застосування роликів опор, шаблонів і складально-зварювальних стендів підвищує точність складання великогабаритного виробу.

Водночас проведений аналіз показує, що базова технологія має суттєві недоліки. Найбільш важливим із них є значна трудомісткість складальних операцій. Котел цистерни має великі розміри та масу, тому його виготовлення потребує багаторазового переміщення, кантування, центрування і фіксації елементів. Це збільшує тривалість виробничого циклу та створює ризик порушення геометрії деталей.

Другим недоліком є виникнення зварювальних деформацій і залишкових напружень. Довгі поздовжні та кільцеві шви супроводжуються значним тепловкладенням. Унаслідок нерівномірного нагрівання і охолодження металу можуть виникати овальність обичайок, викривлення осі котла, місцеві деформації оболонки та зміщення стиків. Це ускладнює подальше складання і може знижувати експлуатаційну надійність виробу.

Важливим недоліком є також залежність якості зварювання від точності підготовки кромки. Для автоматичного зварювання під флюсом необхідно забезпечити стабільний зазор, правильну форму кромки і мінімальне зміщення листів. Будь-яке відхилення на етапі складання може призвести до дефектів шва, зокрема непроварів, підрізів, пористості або шлакових включень.

Окрему проблему становить приварювання допоміжних елементів — люк-горловини, патрубків, зливного пристрою, підсилювальних накладок і кронштейнів. Ці роботи часто виконуються механізованим або ручним способом, тому якість шва значною мірою залежить від кваліфікації зварника, положення виробу, доступності зони зварювання і стабільності режиму.

До недоліків базової технології належить і тривалий цикл контролю якості. Оскільки котел має велику кількість відповідальних зварних з'єднань, після кожного етапу необхідно виконувати контроль. У разі виявлення дефектів проводиться їх видалення, повторне зварювання, зачищення і повторна перевірка. Це збільшує тривалість виготовлення та витрати виробничих ресурсів.

Проведений аналіз показує, що базовий технологічний процес загалом забезпечує можливість виготовлення котла цистерни з необхідною міцністю та герметичністю. Однак він має резерви для вдосконалення. Основними напрямками покращення є підвищення рівня механізації та автоматизації складально-зварювальних операцій, використання точніших складальних пристосувань, застосування автоматичного зварювання під флюсом для довгих стикових швів, оптимізація послідовності зварювання, зменшення кількості переміщень виробу та удосконалення системи неруйнівного контролю.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування способу зварювання

Вибір способу зварювання для виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 є одним із ключових етапів розроблення технологічного процесу. Це пояснюється тим, що основним елементом виробу є котел цистерни, який являє собою великогабаритну зварну оболонкову конструкцію. До складу котла входять циліндричні обичайки, торцеві днища, люк-горловина, зливний пристрій, підсилювальні накладки та опорні зони. Більшість цих елементів з'єднуються зварюванням, тому якість зварних швів безпосередньо визначає міцність, герметичність і довговічність цистерни.

Під час вибору способу зварювання необхідно враховувати такі чинники: марку основного металу, товщину листового прокату, довжину зварних швів, просторове положення з'єднань, вимоги до герметичності, продуктивність процесу, рівень механізації, можливість контролю якості та економічну доцільність. Для виготовлення котла цистерни доцільно застосовувати сталь 09Г2С, яка має добру зварюваність і широко використовується у відповідальних зварних конструкціях [1, 16].

Для виготовлення цистерни можуть бути розглянуті такі основні способи зварювання:

- I. ручне дугове зварювання покритими електродами;
- II. механізоване зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів;
- III. автоматичне зварювання під шаром флюсу.

I. Ручне дугове зварювання покритими електродами є універсальним способом зварювання, який може застосовуватися для з'єднання конструкційних сталей у різних просторових положеннях. Суть процесу полягає в тому, що електрична дуга горить між покритим електродом і поверхнею виробу. Під дією теплоти дуги розплавляються кромки деталей і металевий стрижень електрода, у результаті чого утворюється зварювальна ванна. Захист розплавленого металу

забезпечується газами та шлаком, які утворюються під час плавлення електродного покриття [16].

Перевагою цього способу є простота обладнання, можливість виконання коротких швів у важкодоступних місцях, а також придатність для ремонтних робіт. Проте для виготовлення котла вагона-цистерни 15-7076 цей спосіб не є основним. Це пов'язано з великою довжиною поздовжніх і кільцевих швів, високими вимогами до стабільності якості, необхідністю забезпечення герметичності та значною трудомісткістю ручного процесу.

Під час ручного зварювання якість шва суттєво залежить від кваліфікації зварника, стабільності довжини дуги, кута нахилу електрода, швидкості переміщення та умов виконання робіт. Крім того, процес потребує частої заміни електродів, видалення шлаку після кожного проходу та додаткового зачищення. Для довгих стикових швів котла це призводить до зниження продуктивності та збільшення тривалості виробничого циклу [16].

Таблиця 2.1 – Переваги і недоліки ручного дугового зварювання

Переваги	Недоліки
Простота обладнання	Низька продуктивність
Можливість роботи у важкодоступних місцях	Висока залежність якості від зварника
Придатність для ремонтних і допоміжних робіт	Значна трудомісткість при виконанні довгих швів
Можливість зварювання у різних положеннях	Потреба в очищенні шлаку після кожного проходу
Невисока вартість обладнання	Складність забезпечення стабільної якості герметичних швів

Ручне дугове зварювання доцільно розглядати лише як допоміжний або ремонтний спосіб. Для виконання основних швів котла цистерни воно є малопродуктивним і недостатньо ефективним.

II. Механізоване зварювання плавким електродом у середовищі захисних газів є більш продуктивним способом порівняно з ручним дуговим зварюванням. У цьому процесі електродний дріт безперервно подається в зону дуги, де він

розплавляється разом із крайками основного металу. Захист зварювальної ванни від кисню, азоту та вологи повітря забезпечується потоком захисного газу.

Для зварювання конструкційних і низьколегованих сталей доцільно застосовувати не чистий вуглекислий газ, а газові суміші типу 82 % Ar + 18 % CO₂. Використання такої суміші дає змогу стабілізувати горіння дуги, зменшити розбризкування металу, покращити формування шва та підвищити якість зварного з'єднання. Для сталі 09Г2С можуть застосовуватися зварювальні дроти типу Св-08Г2С або їх сучасні аналоги, призначені для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей [16].

Для виготовлення вагона-цистерни 15-7076 механізоване зварювання в захисних газах доцільно використовувати для приварювання допоміжних і конструктивно складних елементів: люк-горловини, патрубків, зливного пристрою, підсилювальних накладок, кронштейнів, елементів майданчика обслуговування, драбини та окремих деталей опорних зон. Ці шви часто мають складну конфігурацію, невелику протяжність або розміщуються в місцях, де автоматичне зварювання під флюсом застосувати складно.

Перевагою механізованого зварювання є вища продуктивність порівняно з ручним способом, можливість виконання швів різної форми, добра керованість процесу та менша кількість шлакових включень, оскільки флюсовий шлак не утворюється. Водночас цей спосіб чутливий до протягів, забруднення поверхні, нестабільної подачі дроту та неправильного вибору захисного газу.

Таблиця 2.2 – Переваги і недоліки MIG/MAG

Переваги	Недоліки
Вища продуктивність порівняно з ручним зварюванням	Чутливість до протягів і порушення газового захисту
Добре формування шва при правильному виборі газової суміші	Залежність якості від стабільності режиму і положення пальника
Можливість зварювання складних вузлів	Більше розбризкування при використанні чистого CO ₂
Відсутність шлакової кірки	Потреба в балонах або централізованій системі подачі газу
Придатність до напівавтоматизації та роботизації	Менша ефективність для дуже довгих прямолінійних стикових швів порівняно зі зварюванням під флюсом

MIG/MAG є доцільним для допоміжних вузлів цистерни, однак для основних довгих стикових швів обичайок воно поступається автоматичному зварюванню під флюсом за продуктивністю, стабільністю проплавлення та економічністю.

III. Автоматичне зварювання під шаром флюсу є найбільш раціональним способом для виконання довгих прямолінійних і кільцевих стикових швів котла вагона-цистерни. Суть процесу полягає в тому, що електрична дуга горить між електродним дротом і виробом під шаром гранульованого флюсу. Флюс захищає зону зварювання від атмосферного впливу, стабілізує горіння дуги, сприяє формуванню якісного металу шва та після кристалізації утворює шлакову кірку на поверхні зварного з'єднання [16].

Основними перевагами автоматичного зварювання під флюсом є висока продуктивність, значна глибина проплавлення, стабільність режиму, низькі втрати металу на розбризкування та висока якість формування шва. Завдяки автоматизованій подачі електродного дроту та переміщенню зварювальної головки зменшується вплив людського фактора, що особливо важливо для відповідальних герметичних швів котла.

Для вагона-цистерни 15-7076 цей спосіб доцільно застосовувати для:

- зварювання поздовжніх швів обичайок;
- зварювання кільцевих швів між обичайками;
- приварювання торцевих днищ до циліндричної частини котла;
- виконання протяжних стикових з'єднань, які мають доступ для встановлення автоматичного обладнання.

Оскільки котел цистерни має значну довжину і циліндричну форму, зварювання кільцевих швів доцільно виконувати на роликівих обертачах або спеціалізованих стендах, які забезпечують рівномірне обертання виробу. Це дозволяє підтримувати стабільне положення зварювальної ванни, зменшити ризик дефектів і забезпечити рівномірне формування шва по всьому периметру.

З урахуванням конструкції котла цистерни, великої довжини стикових швів, вимог до герметичності та необхідності забезпечення високої продуктивності

автоматичне зварювання під шаром флюсу є найбільш ефективним способом для основних з'єднань.

Таблиця 2.3 – Переваги і недоліки автоматичного зварювання під флюсом

Переваги	Недоліки
Висока продуктивність при виконанні довгих швів	Обмежене застосування для коротких і важкодоступних швів
Стабільна якість зварного з'єднання	Переважно нижнє або зручне просторове положення
Значна глибина проплавлення	Потреба у спеціальному обладнанні та роликівих стендах
Низьке розбризкування металу	Необхідність видалення шлакової кірки після зварювання
Добрий захист зварювальної ванни	Потреба у сушінні та правильному зберіганні флюсу
Менший вплив людського фактора	Недоцільність для дрібних допоміжних елементів

Для обґрунтування остаточного вибору способу зварювання доцільно порівняти розглянуті способи за основними технологічними критеріями.

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика способів зварювання

Критерій оцінювання	Ручне дугове зварювання	Зварювання в захисних газах	Зварювання під флюсом
Продуктивність	Низька	Середня / висока	Висока
Стабільність якості	Значно залежить від зварника	Залежить від режиму і газового захисту	Висока
Придатність для довгих стикових швів	Низька	Середня	Висока
Придатність для кільцевих швів котла	Низька	Середня	Висока
Придатність для патрубків і горловини	Середня	Висока	Обмежена
Розбризкування металу	Середнє	Низьке при $Ar + CO_2$	Низьке
Вплив людського фактора	Високий	Середній	Низький
Потреба в очищенні шва	Висока	Невелика	Потрібне видалення шлаку
Загальна доцільність	Допоміжні та ремонтні роботи	Допоміжні вузли і складні шви	Основні стикові шви котла

З таблиці видно, що жоден спосіб зварювання не є універсальним для всіх елементів цистерни. Для довгих стикових швів обичайок і днищ найбільш доцільним є автоматичне зварювання під шаром флюсу. Воно забезпечує стабільну якість, глибокий провар, високу продуктивність і менший вплив людського фактора. Водночас для приварювання коротких, криволінійних або конструктивно складних елементів раціональніше застосовувати механізоване зварювання в середовищі захисних газів.

Аналіз показує, що для виготовлення цистерни недоцільно застосовувати один спосіб зварювання для всіх елементів. Котел має як протяжні стикові шви, так і локальні вузли складної форми. Тому, з урахуванням конструкції виробу, матеріалу котла, характеру зварних з'єднань і вимог до герметичності для виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 доцільно прийняти комбіновану технологічну схему зварювання (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Вибір способу зварювання для елементів вагона-цистерни 15-7076

<i>Елемент конструкції</i>	<i>Тип з'єднання</i>	<i>Рекомендований спосіб зварювання</i>
Поздовжні стики обичайок	Стикове з'єднання з повним проваром	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Кільцеві стики між обичайками	Стикове кільцеве з'єднання	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Приварювання торцевих днищ	Кільцевий стиковий шов	Автоматичне зварювання під шаром флюсу
Люк-горловина	Кутові та стикові шви складної конфігурації	Механізоване зварювання в захисних газах
Зливний пристрій	Кутові, фланцеві та патрубкові з'єднання	Механізоване зварювання в захисних газах
Підсилювальні накладки	Кутові та переривчасті шви	Механізоване зварювання в захисних газах
Опорні елементи і ложементи	Кутові шви	Механізоване зварювання в захисних газах або під флюсом за наявності доступу
Ремонт окремих дефектних ділянок	Локальні підварювання	Ручне дугове або механізоване зварювання

Прийнята комбінована технологія дозволяє врахувати особливості різних вузлів цистерни, підвищити якість зварних з'єднань, зменшити трудомісткість

виготовлення, скоротити виробничий цикл і забезпечити надійну герметичність котла під час експлуатації.

Для виготовлення котла вагона-цистерни моделі 15-7076 необхідно застосовувати такі зварювальні матеріали, які забезпечують отримання міцних, пластичних і герметичних зварних з'єднань. Оскільки основним матеріалом котла прийнято сталь 09Г2С, зварювальні матеріали повинні бути сумісними з низьколегованими конструкційними сталями та забезпечувати механічні властивості металу шва не нижчі за властивості основного металу.

З урахуванням прийнятої комбінованої технології виготовлення цистерни доцільно застосовувати дві групи зварювальних матеріалів [15, 17-18].

Для автоматичного зварювання під шаром флюсу доцільно застосовувати зварювальний дріт ОК Autrod 12.22 у поєднанні з флюсом ОК Flux 10.71. Таке поєднання призначене для зварювання конструкційних і низьколегованих сталей та забезпечує стабільне горіння дуги, якісне формування шва, достатню глибину проплавлення і добрі механічні властивості металу зварного з'єднання.

Дані матеріали доцільно використовувати для виконання поздовжніх швів обичайок, кільцевих швів між обичайками та швів приварювання торцевих днищ. Саме ці з'єднання є найбільш відповідальними, оскільки вони формують герметичну оболонку котла.

Флюс у цьому процесі виконує кілька важливих функцій: захищає розплавлений метал від дії повітря, стабілізує горіння дуги, сприяє формуванню якісного металу шва та покращує зовнішній вигляд зварного з'єднання. Перед використанням флюс повинен бути сухим і зберігатися відповідно до вимог технологічної інструкції, оскільки підвищена вологість може спричинити появу пор у металі шва.

Для MIG/MAG доцільно застосовувати суцільний зварювальний дріт ОК AristoRod 12.50 діаметром 1,0–1,2 мм. Цей дріт забезпечує стабільне формування шва при виконанні кутових, кільцевих і коротких стикових з'єднань.

Як захисне середовище доцільно використовувати газову суміш M21 — Ar + 18 % CO₂. Порівняно з чистим вуглекислим газом така суміш забезпечує

стабільніше горіння дуги, менше розбризкування електродного металу, кращий зовнішній вигляд шва та зменшення обсягу післязварювальної зачистки. Це особливо важливо під час зварювання люк-горловини, патрубків, зливного пристрою та підсилювальних накладок, де необхідно отримати акуратний і щільний шов без пор, підрізів і напливів.

Таблиця 2.6 – Прийняті зварювальні матеріали для зварювання цистерни 15-7076

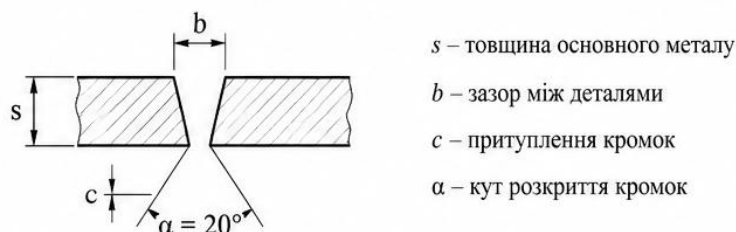
<i>Елемент конструкції</i>	<i>Спосіб зварювання</i>	<i>Рекомендовані матеріали</i>
Поздовжні шви обичайок	Автоматичне зварювання під флюсом	OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71
Кільцеві шви між обичайками	Автоматичне зварювання під флюсом	OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71
Шви приварювання торцевих днищ	Автоматичне зварювання під флюсом	OK Autrod 12.22 + OK Flux 10.71
Люк-горловина	Механізоване зварювання в захисних газах	OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/CO ₂
Зливний пристрій і патрубки	Механізоване зварювання в захисних газах	OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/CO ₂
Підсилювальні накладки, кронштейни, драбина	Механізоване зварювання в захисних газах	OK AristoRod 12.50 + M21 Ar/CO ₂

Враховуючи вибрану комбіновану технологію зварювання, проведемо розрахунок режимів зварювання для кожного із запропонованих способів і з'єднувальних елементів (табл. 2.6) цистерни згідно літератури [19].

Для розрахунку приймаємо три характерні типи з'єднань:

- I. С17 — стикове з'єднання обичайок і торцевих днищ котла;
- II. Н1 — напусткове з'єднання підсилювальних накладок, патрубків і елементів зливного пристрою;
- III. Т1 — таврове з'єднання кронштейнів, опорних елементів, ребер і деталей майданчика обслуговування.

Стикове з'єднання типу С17 (рис. 2.1) застосовується для виконання поздовжніх швів обичайок, кільцевих швів між обичайками та швів приварювання торцевих днищ.



$$s = s_1 = 12 \text{ мм}; b = 2 \text{ мм}; c = 2 \text{ мм}; \alpha = 20^\circ$$

Рис. 2.1 З'єднання С17

Глибину проплавлення визначаємо за формулою:

$$h_p = s - 0,5b = 12 - 0,5 \cdot 2 = 11 \text{ мм.}$$

Діаметр електродного дроту:

$$d_e = \sqrt[4]{h_p} + 0,05h_p = \sqrt[4]{11} + 0,05 \cdot 11 = 1,82 + 0,55 = 2,37 \text{ мм.}$$

З урахуванням стандартного сортаменту для автоматичного зварювання під флюсом приймаємо:

$$d_e = 3,0 \text{ мм.}$$

Силу зварювального струму визначаємо за залежністю:

$$I_{зв} = 140 \cdot d_e^{1,5} = 140 \cdot 3^{1,5} = 140 \cdot 5,196 = 727 \text{ А.}$$

З урахуванням товщини металу 12 мм і необхідності забезпечення повного проплавлення приймаємо: $I_{зв} = 650 \text{ А.}$

Напруга дуги:

$$U_d = 0,05 \cdot I_{зв} = 0,05 \cdot 650 = 32,5 \text{ В.}$$

Приймаємо: $U_d = 34 \text{ В.}$

Швидкість подачі електродного дроту:

$$V_{п.д.} = 1,9 \frac{I_{зв}}{d_e^2} + 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{I_{зв}^2}{d_e^3} = 1,9 \frac{650}{3^2} + 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{650^2}{3^3} = 176,3 \text{ м/год.}$$

Приймаємо: $V_{п.д.} = 176 \text{ м/год.}$

Швидкість зварювання:

$$V_{зв} = \frac{300}{0,7h_p} = \frac{300}{0,7 \cdot 11} = 39 \text{ м/год.}$$

Для стабільного формування шва при автоматичному зварюванні під флюсом приймаємо робочу швидкість $V_{зв} = 28 \text{ м/год.}$

Коефіцієнт форми провару:

$$\psi_{пр} = 0,92(19 - 0,01I_{зв}) \frac{d_e U_d}{I_{зв}} = 0,92(19 - 0,01 \cdot 650) \frac{3 \cdot 34}{650} = 1,8.$$

Ширина зварного шва:

$$e = 1,6h_p = 1,6 \cdot 11 = 17,6 \text{ мм.}$$

Площа наплавленого металу:

$$F_{\text{нм}} = \frac{V_{\text{п.д.}} \cdot \pi d_e^2 \cdot 0,9}{4V_{зв}} = \frac{176 \cdot 3,14 \cdot 3^2 \cdot 0,9}{4 \cdot 28} = 44,6 \text{ мм}^2.$$

Опуклість шва:

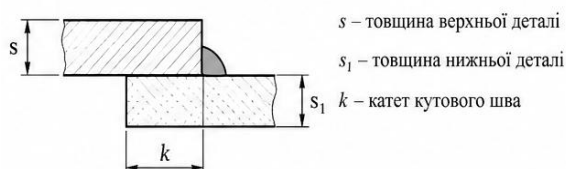
$$g = \frac{F_{\text{нм}}}{0,7e} = \frac{44,6}{0,7 \cdot 17,6} = 3,6 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт форми валика:

$$\psi_{\text{в}} = \frac{e}{g} = \frac{17,6}{3,6} = 4,9.$$

Розрахунок режиму зварювання напусткового з'єднання Н1

Напусткове з'єднання Н1 (рис. 2.2) застосовується для приварювання підсилювальних накладок, опорних пластин, елементів зливного пристрою, а також окремих допоміжних деталей до оболонки котла цистерни.



$$s = 8 \text{ мм}; s_1 = 10 \text{ мм}; b = 0 \text{ мм}; k = 6 \text{ мм.}$$

Рис. 2.2 З'єднання Н1

Площу поперечного перерізу кутового шва визначаємо за формулою:

$$F_H = \frac{k^2}{2} = \frac{6^2}{2} = 18 \text{ мм}^2.$$

Для шва з катетом 6 мм приймаємо електродний дріт $d_e = 1,2$ мм.

Силу зварювального струму визначаємо за формулою:

$$I_{зв} = \frac{\pi d_e^2}{4} j$$

де $j = 185 \text{ А/мм}^2$ — густина струму для механізованого зварювання у суміші $\text{Ar} + \text{CO}_2$.

$$I_{зв} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} \cdot 185 = 209 \text{ А.}$$

Приймаємо: $I_{зв} = 210 \text{ А.}$

Коефіцієнт наплавлення:

$$\alpha_H = A + B \frac{I_{зв}}{d_e}$$

де $A = 7,0$; $B = 0,04$.

$$\alpha_H = 7 + 0,04 \frac{210}{1,2} = 14,0 \text{ г/(А} \cdot \text{год)}.$$

Швидкість зварювання приймаємо з урахуванням катета шва та площі наплавленого металу $V_{зв} = 20 \text{ м/год.}$

Напруга дуги:

$$U_d = 20 + \frac{I_{зв} \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_e}} = 20 + \frac{210 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,2}} = 29,6 \text{ В.}$$

Для стабільного процесу і зменшення розбризкування приймаємо $U_d = 26 \text{ В.}$

Швидкість подачі електродного дроту:

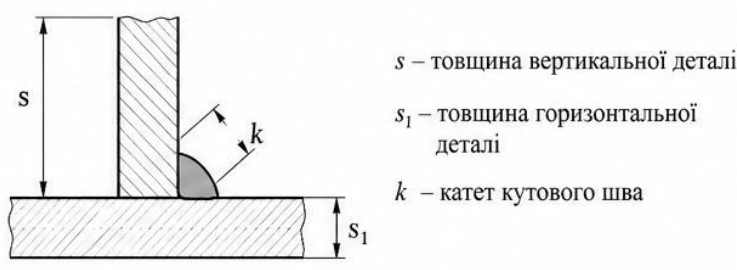
$$V_{п.д.} = \frac{4\alpha_H I_{зв}}{\pi d_e^2 \gamma}$$

де $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$.

$$V_{п.д.} = \frac{4 \cdot 14,0 \cdot 210}{3,14 \cdot 0,12^2 \cdot 7,8} = 33300 \text{ см/год} = 333 \text{ м/год.}$$

Розрахунок режиму зварювання таврового з'єднання Т1

Таврове з'єднання Т1 (рис. 2.3) застосовується при приварюванні кронштейнів, ребер жорсткості, елементів опорних зон, драбини та майданчика обслуговування.



$$s = s_1 = 10 \text{ мм}; b = 0 \text{ мм}; k = 8 \text{ мм}.$$

Рис. 2.3 З'єднання Т1

Площа поперечного перерізу кутового шва:

$$F_H = \frac{k^2}{2} = \frac{8^2}{2} = 32 \text{ мм}^2.$$

Для кутового шва з катетом 8 мм приймаємо електродний дріт $d_e = 1,6 \text{ мм}$.

Сила зварювального струму:

$$I_{зв} = \frac{\pi d_e^2}{4} j$$

де $j = 160 \text{ А/мм}^2$.

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

Приймаємо: $I_{зв} = 320 \text{ А}$.

Коефіцієнт наплавлення:

$$\alpha_H = 7 + 0,04 \frac{I_{зв}}{d_e}$$

$$\alpha_H = 7 + 0,04 \frac{320}{1,6} = 15,0 \text{ г/(А} \cdot \text{год)}.$$

Швидкість зварювання для шва з катетом 8 мм приймаємо $V_{зв} = 18 \text{ м/год}$.

Напруга дуги:

$$U_d = 20 + \frac{I_{зв} \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_e}}$$

$$U_d = 20 + \frac{320 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,6}} = 32,7 \text{ В.}$$

Для забезпечення стабільного формування кутового шва приймаємо: $U_d = 30 \text{ В.}$

Швидкість подачі електродного дроту:

$$V_{\text{п.д.}} = \frac{4\alpha_H I_{3B}}{\pi d_e^2 \gamma}$$

де $d_e = 1,6 \text{ мм} = 0,16 \text{ см.}$

$$V_{\text{п.д.}} = \frac{4 \cdot 15,0 \cdot 320}{3,14 \cdot 0,16^2 \cdot 7,8}$$

$$V_{\text{п.д.}} = 30600 \text{ см/год} = 306 \text{ м/год.}$$

Масу наплавленого металу визначаємо за формулою:

$$G_H = F_{3B} \cdot l \cdot \rho$$

де F_{3B} — площа поперечного перерізу шва, см^2 ;

l — довжина шва, см ;

$\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ — густина сталі.

Для стикового з'єднання С17 приймаємо довжину одного кільцевого шва котла:

$$l = 1005 \text{ см}$$

$$F_{C17} = 44,6 \text{ мм}^2 = 0,446 \text{ см}^2$$

$$G_{H(C17)} = 1005 \cdot 0,446 \cdot 7,8 = 3495 \text{ г} = 3,50 \text{ кг.}$$

Для напусткового з'єднання Н1 приймаємо:

$$l = 300 \text{ см}$$

$$F_{H1} = 18 \text{ мм}^2 = 0,18 \text{ см}^2$$

$$G_{H(H1)} = 300 \cdot 0,18 \cdot 7,8 = 421 \text{ г} = 0,421 \text{ кг.}$$

Для таврового з'єднання Т1 приймаємо:

$$l = 500 \text{ см}$$

$$F_{T1} = 32 \text{ мм}^2 = 0,32 \text{ см}^2$$

$$G_{H(T1)} = 500 \cdot 0,32 \cdot 7,8 = 1248 \text{ г} = 1,248 \text{ кг.}$$

Основний час горіння дуги визначаємо за формулою:

$$t_0 = \frac{G_H}{I_{зв} \alpha_H}$$

Для з'єднання С17 приймаємо $\alpha_H = 15,65$ г/(А · год).

$$t_{0(C17)} = \frac{3495}{650 \cdot 15,65} = 0,34 \text{ год.}$$

Для з'єднання Н1:

$$t_{0(H1)} = \frac{421}{210 \cdot 14,0} = 0,14 \text{ год.}$$

Для з'єднання Т1:

$$t_{0(T1)} = \frac{1248}{320 \cdot 15,0} = 0,26 \text{ год.}$$

Повний час зварювання визначаємо з урахуванням коефіцієнта використання зварювального поста:

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

де $K_{\Pi} = 0,6$.

Для з'єднання С17:

$$T_{C17} = \frac{0,34}{0,6} = 0,57 \text{ год.}$$

Для з'єднання Н1:

$$T_{H1} = \frac{0,14}{0,6} = 0,23 \text{ год.}$$

Для з'єднання Т1:

$$T_{T1} = \frac{0,26}{0,6} = 0,43 \text{ год.}$$

Витрати електроенергії визначаємо за формулою:

$$A = \frac{U_d I_{зв}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0 (T - t_0)$$

де U_d — напруга дуги, В;

$I_{зв}$ — сила зварювального струму, А;

$\eta = 0,6$ — ККД джерела живлення;

$W_0 = 3,0$ кВт — потужність холостого ходу.

Для з'єднання С17:

$$A_{C17} = \frac{34 \cdot 650}{0,6 \cdot 1000} \cdot 0,34 + 3,0(0,57 - 0,34) = 13,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для з'єднання Н1:

$$A_{H1} = \frac{26 \cdot 210}{0,6 \cdot 1000} \cdot 0,14 + 3,0(0,23 - 0,14) = 1,55 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для з'єднання Т1:

$$A_{T1} = \frac{30 \cdot 320}{0,6 \cdot 1000} \cdot 0,26 + 3,0(0,43 - 0,26) = 4,67 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для механізованого зварювання у суміші 80 % Ar + 20 % CO₂ витрати газу приймаються залежно від сили струму:

- для з'єднання Н1 при струмі 210 А — 14–16 л/хв;
- для з'єднання Т1 при струмі 320 А — 16–18 л/хв.

Таблиця 2.7 – Режими зварювання елементів котла цистерни 15-7076

Тип з'єднання	Застосування у конструкції цистерни	Спосіб зварювання	Товщина / катет	Дріт	Флюс / газ	d, мм	I _{зв} , А	U _d , В	V _{зв} , м/год	V _{п.д.} , м/год
С17	Поздовжні та кільцеві шви обичайок, шви днищ	Автоматичне під флюсом	s = s ₁ = 12мм	OK Autrod 12.22	OK Flux 10.71	3,0	650	34	28	176
Н1	Підсилювальні накладки, патрубки, зливний пристрій	MAG у Ar+CO ₂	s = 8мм; s ₁ = 10мм; k = 6мм	OK AristoRod 12.50	80 % Ar + 20 % CO ₂	1,2	210	26	20	333
Т1	Кронштейни, ребра, опорні елементи, драбина, майданчик	MAG у Ar+CO ₂	s = s ₁ = 10мм; k = 8мм	OK AristoRod 12.50	80 % Ar + 20 % CO ₂	1,6	320	30	18	306

2.2 Вибір зварювального устаткування

Оскільки котел цистерни є великогабаритною оболонковою конструкцією, для його виготовлення доцільно застосовувати не універсальне ручне обладнання, а спеціалізовані механізовані та автоматизовані зварювальні комплекси.

Для виконання поздовжніх і кільцевих стикових швів обичайок, а також швів приварювання торцевих днищ доцільно застосувати автоматизований комплекс на базі ESAB A6 Mastertrac A6TF у поєднанні з джерелом живлення ESAB Warrior 750i CC/CV.

Автомат ESAB A6 Mastertrac A6TF (рис. 2.4) є самохідним зварювальним трактором для зварювання під флюсом. Він може використовуватися у варіантах Single або Twin-Arc, причому конструкція дозволяє переобладнати одинарний варіант у дводуговий для підвищення продуктивності при виконанні стикових і кутових швів. Це важливо для виготовлення цистерни, оскільки котел має довгі поздовжні та кільцеві шви, де необхідні стабільна швидкість переміщення, рівномірне формування шва та зменшення впливу людського фактора [20].



Рис. 2.4 Зварювальний трактор ESAB A6 Mastertrac A6TF [20]

Як джерело живлення доцільно застосувати ESAB Warrior 750i CC/CV, оскільки для основного стикового з'єднання C17 розрахункова сила струму становить 650 А. Це джерело має достатній запас потужності для таких режимів, оскільки виробник зазначає максимальний вихід до 850 А і 750 А при 100 % ПВ, що дозволяє виконувати тривалі зварювальні операції без перевантаження

обладнання. Крім того, Warrior 750i є інверторним багатопроцесним джерелом з ефективністю близько 91 %, що знижує енерговитрати під час тривалої роботи.

Для приварювання люк-горловини, зливного пристрою, патрубків, підсилювальних накладок, кронштейнів, драбини та майданчика обслуговування доцільно застосувати сучасне джерело для механізованого MAG-зварювання Kemppi X8 MIG Welder 500 A (рис. 2.5)



Рис. 2.5 Джерело для MAG-зварювання Kemppi X8 MIG Welder 500 A [21]

Це обладнання доцільне для прийнятих режимів зварювання, оскільки розрахункова сила струму для з'єднання Н1 становить 210 А, а для з'єднання Т1 — 320 А. Джерело Kemppi X8 Power Source 500 має діапазон MIG-зварювання до 500 А / 55 В при живленні 380 В, що повністю перекриває необхідні режими для зварювання допоміжних вузлів цистерни. Також у технічних даних вказано ККД 89–91 % і робочий температурний діапазон від -20 до $+40$ °С, що є важливим для промислового виробництва металоконструкцій [21].

Перевагою Kemppi X8 MIG Welder є наявність цифрового керування та можливість роботи з програмним забезпеченням WeldEye для контролю зварювальних процедур, якості та виробничого аналізу. Це доцільно для виготовлення цистерни, оскільки для відповідальних вузлів необхідно забезпечити повторюваність режимів і документування параметрів зварювання. Для зварювання коротких або криволінійних швів горловини, патрубків і накладок обладнання може працювати у напівавтоматичному режимі із пальником.

Таблиця 2.8 – Зварювальне устаткування для виготовлення цистерни 15-7076

Вид робіт	Спосіб зварювання	Режим за розрахунком	Рекомендоване устаткування
Поздовжні шви обичайок	Автоматичне під флюсом	650 А; 34 В; 28 м/год	ESAB A6 Mastertrac A6TF + Warrior 750i CC/CV
Кільцеві шви між обичайками	Автоматичне під флюсом	650 А; 34 В; 28 м/год	ESAB A6 Mastertrac A6TF
Шви приварювання днищ	Автоматичне під флюсом	650 А; 34 В; 28 м/год	ESAB A6 Mastertrac A6TF
Люк-горловина	MAG у Ar + CO ₂	210–320 А; 26–30 В	Kemppi X8 MIG Welder 500 А
Зливний пристрій і патрубки	MAG у Ar + CO ₂	210–320 А; 26–30 В	Kemppi X8 MIG Welder 500 А
Підсилювальні накладки	MAG у Ar + CO ₂	210–320 А; 26–30 В	Kemppi X8 MIG Welder 500 А
Кронштейни, драбина, майданчик	MAG у Ar + CO ₂	210–320 А; 26–30 В	Kemppi X8 MIG Welder 500 А

2.3 Вибір методу контролю якості виробу

Якість виготовлення вагона-цистерни моделі 15-7076 значною мірою залежить від надійності зварних з'єднань котла, оскільки саме котел є герметичною ємністю для перевезення наливного вантажу. У процесі експлуатації він сприймає навантаження від маси рідини, гідродинамічні удари, вібрації, температурні зміни та зусилля, що передаються через опорні зони. Тому контроль якості повинен забезпечувати виявлення як зовнішніх, так і внутрішніх дефектів зварних швів.

До найбільш відповідальних з'єднань цистерни належать:

- поздовжні стикові шви обичайок;
- кільцеві стикові шви між обичайками;

- шви приварювання торцевих днищ;
- шви люк-горловини;
- шви зливного пристрою і патрубків;
- шви підсилювальних накладок та опорних елементів.

Для оцінювання якості таких з'єднань доцільно застосовувати комплексний контроль, який включає візуально-вимірювальний контроль, ультразвуковий контроль, капілярний контроль і випробування котла на герметичність [22-24].

Першим і обов'язковим етапом перевірки є візуально-вимірювальний контроль. Він виконується після складання деталей, після прихвачування, після зварювання та після зачистки швів. Його метою є перевірка зовнішнього стану шва, правильності форми валика, плавності переходу до основного металу, відсутності підрізів, напливів, прожогів, кратерів, тріщин, пор, незаплавлених ділянок і значних відхилень геометрії.

Для реалізації візуально-вимірювального контролю доцільно застосовувати універсальний шаблон зварника WG-2, штангенциркуль ШЦ-1, металеву лінійку, рулетку, набір щупів, лупу з підсвічуванням і переносне освітлення. За допомогою цих засобів контролюють ширину шва, висоту посилення, катет кутового шва, зазор у стику, зміщення крайок і наявність зовнішніх дефектів. Візуальний контроль зварних з'єднань, виконаних зварюванням плавленням, регламентується ДСТУ EN ISO 17637:2017, а вимоги до рівнів якості зварних швів залежно від дефектів встановлює ДСТУ EN ISO 5817:2022.

Для відповідальних стикових швів котла цистерни найбільш доцільним є ультразвуковий контроль з використанням дефектоскопа Evident OmniScan X4 (рис. 2.6).

Його слід застосовувати для поздовжніх швів обичайок, кільцевих швів між обичайками та швів приварювання торцевих днищ. Саме ці з'єднання формують герметичну оболонку котла і сприймають основні експлуатаційні навантаження.

Ультразвуковий метод дозволяє виявляти внутрішні дефекти металу шва та зони термічного впливу: непровари, несплавлення, тріщини, шлакові включення, пори та розшарування. Його перевагою є можливість контролю товстолистових

з'єднань без руйнування виробу, висока чутливість до площинних дефектів і можливість виконання контролю без доступу до обох боків з'єднання.



Рис. 2.6 Дефектоскоп Evident OmniScan X4 [25]

Для цистерни 15-7076 цей метод є особливо раціональним, оскільки товщина листів котла становить орієнтовно 9–12 мм, а стикові шви мають значну довжину. Ультразвуковий контроль зварних швів регламентується ДСТУ EN ISO 17640:2022, який встановлює методи, рівні контролювання та оцінювання.

Для вузлів складної форми, де можливе утворення поверхневих мікротріщин або дрібних несучільностей, доцільно застосовувати капілярний контроль. Його варто використовувати для швів люк-горловини, зливного пристрою, патрубків, фланцевих елементів і підсилювальних накладок.

Капілярний метод базується на проникненні індикаторної рідини у відкриті поверхневі дефекти з подальшим проявленням їх на поверхні. Він дає змогу виявляти дрібні тріщини, пори, несучільності та дефекти, які можуть бути непомітними під час звичайного візуального огляду. У сучасній нормативній практиці капілярний контроль пов'язують із серією стандартів ДСТУ EN ISO 3452.

Для цистерни цей метод є доцільним саме в зонах локального послаблення оболонки: біля вирізу під горловину, у місці встановлення зливного патрубка та в ділянках приварювання підсилювальних накладок. У цих місцях концентрація напружень є вищою, тому навіть невеликі поверхневі тріщини можуть знижувати

довговічність конструкції. Для реалізації капілярного контролю застосовують комплект типу Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit (рис. 2.7).



Рис. 2.7 Комплект Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit [26]

Після завершення зварювання та неруйнівного контролю котел цистерни повинен пройти випробування на герметичність. Це завершальний і найбільш важливий етап контролю, оскільки цистерна призначена для перевезення рідких вантажів і не повинна допускати витікання продукту під час експлуатації.

Герметичність доцільно перевіряти гідравлічним або пневматичним способом відповідно до технічних умов на виріб. Під час випробування контролюють стан усіх швів котла, зокрема швів обичайок, днищ, горловини, зливного пристрою і патрубків. Не допускається поява течі, запотівання, залишкових деформацій, тріщин або інших ознак порушення цілісності оболонки.

Для котла цистерни цей вид контролю є обов'язковим, оскільки навіть якісно виконаний шов за результатами зовнішнього та ультразвукового контролю повинен бути додатково перевірений на фактичну герметичність у складі готової зварної оболонки.

З урахуванням конструкції цистерни, характеру зварних з'єднань і вимог до герметичності приймається схема контролю якості згідно табл. 2.9

Таблиця 2.9 – Методи та обладнання для контролю якості зварних з'єднань цистерни 15-7076

Елемент-/шов	Можливі дефекти	Метод контролю	Обладнання	Обсяг контролю
Поздовжні шви обичайок	Непровари, несплавлення, тріщини, пори, шлакові включення	Візуально-вимірювальний + PAUT	WG-2, ІІЦ-1, лупа, Evident OmniScan X4	100-%
Кільцеві шви між обичайками	Непровари, несплавлення, тріщини, пори	Візуально-вимірювальний + PAUT	WG-2, ІІЦ-1, Evident OmniScan X4	100-%
Шви приварювання торцевих днищ	Непровари, тріщини, порушення герметичності	Візуально-вимірювальний + PAUT	WG-2; Evident OmniScan X4	100-%
Люк-горловина	Поверхневі тріщини, пори, підрізи, нещільність	Візуально-вимірювальний + капілярний	WG-2; комплект Magnaflux SK-3	100-% або за ТУ
Зливний пристрій і патрубки	Тріщини, пори, нещільність, непровар	Візуально-вимірювальний + капілярний; за потреби PAUT	WG-2; Magnaflux SK-3; Evident OmniScan X4	100-%
Підсилювальні накладки та опорні зони	Підрізи, тріщини, несплавлення, місцеві деформації	Візуально-вимірювальний	WG-2	Вибірково або за ТУ
Ремонтні ділянки	Повторні тріщини, непровари, пори	Метод, яким виявлено дефект, + повторний контроль	Evident OmniScan X4, WG-2, капілярний комплект	100-% ремонтної ділянки
Готовий котел у зборі	Течі, запотівання, падіння тиску, порушення герметичності	Гідравлічне випробування	Насос високого тиску, манометр, заглушки, арматура	100-%

2.4 Опис запропонованого технологічного процесу виготовлення цистерни вагона 15-7076

Запропонований технологічний процес виготовлення котла вагона-цистерни моделі 15-7076 передбачає послідовне виконання заготівельних, формоутворювальних, складально-зварювальних, контрольних і завершальних операцій. Основним завданням процесу є отримання герметичної оболонкової

конструкції з мінімальними відхиленнями геометрії, якісними зварними з'єднаннями та стабільними експлуатаційними властивостями.

Основним вузлом виробу є котел цистерни, що складається з циліндричних обичайок, торцевих днищ, люк-горловини, зливного пристрою, патрубків, підсилювальних накладок та опорних елементів. Для підвищення якості виготовлення пропонується застосувати автоматичне зварювання під шаром флюсу для основних стикових швів і механізоване MAG-зварювання для допоміжних вузлів складної форми.

010. Транспортування листового прокату та вхідний контроль матеріалу

Листовий прокат зі сталі 09Г2С, торцеві днища, зварювальні матеріали та комплектувальні елементи транспортуються зі складу на заготівельну ділянку. Для переміщення великогабаритних листів застосовують мостовий кран, кран-балку, траверси, магнітні або вакуумні захвати, а також підкранові візки.

На цій операції перевіряють сертифікати якості, марку сталі, товщину листів, стан поверхні, наявність розшарувань, тріщин, корозії, вм'ятин та інших дефектів. Контроль здійснюють за допомогою рулеток, штангенциркулів, мікрометрів, лінійок і засобів візуального огляду.

015. Очищення та підготовка поверхні листів

Перед розкроєм листи очищають від окалини, пилу, мастила, поверхневої корозії та інших забруднень. Для підготовки листового металу доцільно використовувати дробоструминну лінію очищення листового прокату типу Wheelabrator Plate Preservation Line (рис. 2.8).



Рис. 2.8 – Дробоструминна лінія підготовки листового прокату [27]

Застосування дробоструминної обробки дає змогу отримати чисту поверхню металу, покращити якість подальшого різання та зменшити ризик появи пор і включень у зварному шві.

020. Правлення листового прокату

Після очищення виконується правлення листів для усунення хвилястості, серповидності, місцевих вм'ятин і залишкових деформацій після транспортування. Для цього доцільно застосувати листопрямильну машину Bendmak BPSM (рис 2.9).

Правлення забезпечує стабільну геометрію листів перед розкромом і вальцюванням. Це особливо важливо для обичайок котла, оскільки початкові відхилення форми можуть призвести до овальності, зміщення крайок і ускладнення складання поздовжнього стику.



Рис. 2.9 – Листопрямильна машина Bendmak BPSM для підготовки листового прокату [28]

025. Розкрій листів на заготовки

Розкрій листового металу виконують відповідно до карти розкрою та робочих креслень. Із листів вирізають заготовки для обичайок, підсилювальних накладок, елементів горловини, зливного пристрою, патрубків і допоміжних деталей.

Для операції доцільно застосовувати порталну машину плазмового різання з ЧПК MicroStep MG (рис. 2.10). Використання ЧПК-різання забезпечує точність контурів, повторюваність розмірів і зменшення припусків на подальшу механічну обробку.



Рис. 2.10 – Портальна установка для розкрою листового металу [29]

030. Зачищення та підготовка крайок

Після різання крайки заготовок очищають від ґрату, шлаку, напливів, бризок металу й окалини. Поверхні в зоні майбутнього шва зачищають до чистого металу на ширину не менше 20 мм з обох боків.

Для цієї операції застосовують:

- кутові шліфувальні машини;
- пневматичні зачистні машинки;
- щітки по металу;
- абразивні круги;
- кромкофрезерні або кромкостругальні машини.

Якісна підготовка крайок є обов'язковою умовою отримання повного провару, особливо для стикових швів обичайок і днищ.

035. Контроль розмірів заготовок

Після розкрою та зачищення виконується контроль геометрії деталей. Перевіряють довжину, ширину, прямолінійність крайок, кути, якість підготовки кромки і відповідність заготовок кресленню.

Для контролю використовують:

- рулетки;
- металеві лінійки;
- косинці;

- штангенциркулі;
- шаблони;
- щупи для перевірки зазорів.

Заготовки, що не відповідають кресленню, направляються на доопрацювання або бракуються.

040. Вальцювання обичайок котла

Заготовки обичайок після розкрою подаються на вальцювання. Для формування циліндричної оболонки котла доцільно використовувати чотиривалкову гідравлічну листозгинальну машину DAVI MCA (рис. 2.11).

Чотиривалкові машини забезпечують точне позиціонування листа, можливість попереднього підгинання крайок і високу повторюваність форми. У технічному описі DAVI зазначено, що 4-валкові машини дають змогу автоматизувати процес вальцювання, зменшити залежність від кваліфікації оператора та забезпечити високу точність формування оболонкових деталей.

Після вальцювання контролюють:

- діаметр обичайки;
- овальність;
- збіг крайок поздовжнього стику;
- прямолінійність кромки;
- відсутність місцевих деформацій.



Рис. 2.11 – Машина DAVI MCA для вальцювання обичайок котла [30]

045. Формування боковин цистерни

Окремою технологічною операцією передбачається формування боковин цистерни, які закривають торцеві частини котла та забезпечують просторову жорсткість оболонки. Боковини виготовляють із попередньо вирізаних листових заготовок зі сталі 09Г2С відповідної товщини. Після термічного різання та зачищення крайок заготовки подаються на формоутворювальне обладнання.

Формування боковин виконується шляхом холодного відбортювання кромek. Для забезпечення правильної геометрії доцільно застосовувати відбортювальну машину для формування днищ типу ВФМ (рис. 2.12), яка забезпечує плавний перехід від центральної частини днища до зони стику з обичайкою.

Під час формування боковин контролюють:

- відповідність зовнішнього контуру кресленню;
- симетричність форми;
- висоту та рівномірність відбортювання;
- відсутність тріщин, надривів і складок у зоні згину;
- якість крайок під подальше зварювання;
- збіг боковини з торцем обичайки під час контрольного встановлення.



Рис. 2.12 – Машина ВФМ для формування та відбортювання кромek боковин цистерни [31]

050. Складання поздовжніх стиків обичайок

Попередньо звальцьовану обичайку встановлюють на спеціальний складальний стенд або роликові опори. Крайки поздовжнього стику вирівнюють,

встановлюють необхідний зазор і контролюють зміщення кромок. Після цього виконують прихватки.

Прихватки доцільно виконувати механізованим МАG-зварюванням у суміші $Ar + CO_2$ із застосуванням дроту ОК AristoRod 12.50. Це забезпечує стабільне формування коротких швів і зменшує обсяг подальшого зачищення.

055. Контроль складеної обичайки

Перед основним зварюванням перевіряють якість складання поздовжнього стику. Контролюють:

- величину зазору;
- зміщення крайок;
- співвісність обичайки;
- правильність форми;
- якість прихваток.

Контроль виконують за допомогою шаблонів, лінійок, рулеток, щупів і візуального огляду. До зварювання допускаються лише обичайки, що відповідають вимогам креслення і технологічної карти.

060. Автоматичне зварювання поздовжніх швів обичайок

Поздовжні стикові шви обичайок виконують ESAB A6 Mastertrac A6TF + ESAB Warrior 750i CC/CV.

065. Очищення поздовжніх швів

Після автоматичного зварювання видаляють шлакову кірку, залишки флюсу, бризки металу, вступні й вивідні планки. За потреби виконується зачищення шва та навколошовної зони.

Для очищення застосовують:

- скребки для шлаку;
- кутові шліфувальні машини;
- металеві щітки;
- промислові пілососи;
- системи місцевої витяжки.

Після очищення шов готують до контролю якості.

070. Складання обичайок між собою та встановлення днищ

Після зварювання поздовжніх швів окремі обичайки встановлюють на роликовий складально-зварювальний стенд. За допомогою роликових опор і центраторів обичайки вирівнюють між собою, забезпечуючи співвісність, необхідний зазор і мінімальне зміщення крайок.

Після складання циліндричної частини котла виконують установлення сформованих боковин. Боковини центрують відносно осі котла, перевіряють рівномірність зазору по периметру, після чого виконують прихватки. Прихвачування проводять рівномірно по колу, щоб уникнути перекосу боковини та місцевих деформацій оболонки. Перед основним зварюванням обов'язково перевіряють співвісність, щільність прилягання та відповідність геометрії котла кресленню.

Для операції застосовують:

- роликові опори;
- гідравлічні центратори;
- складально-зварювальний стенд;
- притискні пристрої;
- шаблони для контролю зазорів.

Складання повинно виконуватися без примусового силового припасування, щоб не створювати додаткових залишкових напружень у металі котла.

075. Зварювання кільцевих швів обичайок і днищ

Кільцеві шви між обичайками та шви приварювання торцевих днищ виконують під флюсом. Для цього котел встановлюють на роликовий обертач, який забезпечує рівномірне обертання виробу і дає змогу виконувати шов у нижньому положенні.

Для зварювання застосовується:

- зварювальний трактор ESAB A6 Mastertrac A6TF;
- джерело живлення ESAB Warrior 750i CC/CV;
- роликовий обертач;
- флюсоподавач;

- система збору флюсу.

Застосування роликового обертача покращує формування кільцевого шва, стабілізує зварювальну ванну і зменшує ризик підрізів, непроварів та нерівномірного проплавлення.

080. Встановлення люк-горловини, патрубків і зливного пристрою

Після формування основної оболонки котла виконують розмічання і вирізання отворів під люк-горловину, патрубки та зливний пристрій. У місцях вирізів встановлюють підсилювальні накладки або кільця, оскільки ці зони є локально послабленими.

Після складання вузлів виконують прихватки, контролюють положення горловини та патрубків, після чого переходять до основного зварювання.

085. MAG-зварювання допоміжних вузлів

Люк-горловину, патрубки, зливний пристрій, підсилювальні накладки, кронштейни, драбину і майданчик обслуговування зварюють механізованим способом у суміші $Ar + CO_2$.

Для виконання цих робіт застосовують Kemppi X8 MIG Welder 500 A

090. Зачищення швів після MAG-зварювання

Після MAG-зварювання видаляють бризки металу, локальні напливи, дефектні кратери та гострі нерівності. Особливу увагу приділяють швам горловини, патрубків і зливного пристрою, оскільки ці вузли повинні забезпечувати герметичність і не мати поверхневих дефектів.

Зачищення виконують кутовими шліфувальними машинами, щітками та абразивним інструментом.

095. Контроль якості зварних з'єднань

Після завершення зварювання виконують комплексний контроль якості. Спочатку проводять візуально-вимірний контроль усіх швів із застосуванням шаблону WG-2, штангенциркуля, лінійок, щупів і лупи з підсвічуванням.

Відповідальні стикові шви обичайок і днищ контролюють ультразвуковим методом із фазованими решітками за допомогою Evident OmniScan X4.

Для швів горловини, патрубків і зливного пристрою додатково застосовують капілярний контроль комплектом Magnaflux SK-3 / Spotcheck Kit.

100. Випробування котла на герметичність

Після неруйнівного контролю котел цистерни проходить гідравлічне випробування. Для цього застосовують гідравлічну випробувальну установку, насос, контрольний манометр, заглушки, запірну арматуру і шланги високого тиску.

Під час випробування перевіряють відсутність течі, запотівання, падіння тиску, тріщин і залишкових деформацій. Особливу увагу приділяють поздовжнім і кільцевим швам, зоні днищ, люк-горловині, зливному пристрою та патрубкам.

105. Підготовка поверхні та нанесення захисного покриття

Після позитивних результатів контролю котел очищають від забруднень, пилу, залишків флюсу та продуктів корозії. Поверхню готують до нанесення ґрунтовки та лакофарбового покриття. Захисне покриття повинно забезпечити стійкість металу до атмосферного впливу, вологи та експлуатаційних забруднень.

110. Складування та передача на подальше складання вагона

Готовий котел після контролю, випробування та нанесення захисного покриття передається на ділянку остаточного складання вагона або на склад готових вузлів. При складуванні необхідно забезпечити захист поверхні від механічних пошкоджень і попадання вологи у внутрішню порожнину котла.

Таблиця 2.10 – Технологічний процес виготовлення котла цистерни 15-7076

№ операції	Найменування операції	Основне обладнання
010	Транспортування і вхідний контроль матеріалів	Кран-балка, траверси, штангенциркуль, мікрометр
015	Очищення листового прокату	Дробоструминна лінія Wheelabrator
020	Правлення листів	Листоправильна машина Bendmak BPSM
025	Розкрій заготовок	Портальна машина плазмового різання з ЧПК
030	Зачищення крайок	Кутові шліфувальні машини, кромкофрезерне обладнання
035	Контроль геометрії заготовок	Лінійки, рулетки, косинці, шаблони

040	Вальцювання обичайок	4-валкова листозгинальна машина DAVI MCA
045	Формування боковин цистерни	Відбортювальна машина BFM
050	Складання поздовжніх стиків	Складальний стенд, роликові опори, центратори
055	Контроль складеної обичайки	Щупи, шаблони, рулетка, лінійка
060	Зварювання поздовжніх швів	ESAB A6 Mastertrac A6TF + Warrior 750i
065	Очищення швів	Шліфувальні машини, щітки, скребки
070	Складання обичайок і днищ	Роликовий стенд, гідравлічні центратори
075	Зварювання кільцевих швів	ESAB A6 Mastertrac A6TF, роликовий обертач
080	Встановлення горловини і патрубків	Складальні шаблони, Kemppi X8 MIG Welder 500 A
085	MAG-зварювання допоміжних вузлів	Kemppi X8 MIG Welder 500 A
090	Зачищення MAG-швів	Кутові шліфувальні машини
095	Контроль якості	WG-2, Evident OmniScan X4, Magnaflux SK-3
100	Гідравлічне випробування	Насос, манометр, заглушки, арматура
105	Фарбування і захист	Фарбувальна камера, розпилювальне обладнання
110	Складування	Кран-балка, підставки, транспортні візки

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок роликового стенду-обертача для котла цистерни 15-7076

Для виконання кільцевих швів між обичайками та швів приварювання торцевих боковин котла цистерни необхідно застосувати роликовий стенд-обертач. Його використання дає змогу рівномірно обертати котел під час автоматичного зварювання під флюсом і підтримувати зварювальну ванну в нижньому положенні [32].

Вихідні дані для розрахунку приймаємо: $D = 3200 \text{ мм} = 3,2 \text{ м}$; $R = 1,6 \text{ м}$; $G = 160000 \text{ Н}$; $e = 0,02R = 0,02 \cdot 1,6 = 0,032 \text{ м}$; $D_p = 500 \text{ мм} = 0,5 \text{ м}$; $R_p = 0,25 \text{ м}$ $\alpha = 60^\circ$

де D — зовнішній діаметр котла цистерни;

R — радіус котла;

G — розрахункова вага котла з урахуванням технологічного запасу;

e — ексцентриситет від можливої незбалансованості виробу;

D_p — діаметр роликоопори;

α — центральний кут між роликоопорами.

Маса тари вагона-цистерни 15-7076 у відкритих технічних даних становить близько 26 т, а повний об'єм котла — $85,6 \text{ м}^3$; для розрахунку стенду приймається не повна маса вагона, а розрахункова вага котла з технологічним запасом $G = 160000 \text{ Н}$. Це дозволяє врахувати масу оболонки, днищ, горловини, патрубків, підсилювальних елементів і частини складального оснащення.

Визначення відстані між роликоопорами. Конструктивно приймаємо роликовий стенд із центральним кутом між роликоопорами: $\alpha = 60^\circ$

Відстань між осями роликоопор визначаємо за формулою:

$$L = (D + D_p) \sin \frac{\alpha}{2} = (3,2 + 0,5) \sin 30^\circ = 3,7 \cdot 0,5 = 1,85 \text{ м}$$

Приймаємо конструктивну відстань між роликоопорами: $L = 1,85 \text{ м}$

Така схема забезпечує достатню стійкість котла на стенді та зручні умови для виконання кільцевих зварних швів.

Критичне значення ексцентриситету для забезпечення стійкості виробу на роликовому стенді визначаємо за формулою:

$$e_{кр} = R \sin \frac{\alpha}{2} = 1,6 \sin 30^\circ = 1,6 \cdot 0,5 = 0,8 \text{ м}$$

Фактичний ексцентриситет: $e = 0,032 \text{ м}$

Оскільки

$$e < e_{кр}$$

$$0,032 < 0,8$$

то статична стійкість котла цистерни на роликовому стенді забезпечується.

Опорні реакції роликоопор у статичному стані без урахування дисбалансу визначаємо за формулою:

$$Q = \frac{G}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{160000}{2 \cos 30^\circ} = \frac{160000}{2 \cdot 0,866} = 92376 \text{ Н}$$

Отже, статична реакція на одну сторону стенду становить: $Q = 92,4 \text{ кН}$

Попередньо визначаємо діаметр осі роликоопори від реакції Q . Приймаємо відстань між осями підшипників: $l = 350 \text{ мм} = 0,35 \text{ м}$

Згинальний момент в осі роликоопори визначаємо як для двохопорної балки з навантаженням посередині:

$$M_3 = \frac{Q \cdot l}{4} = \frac{92376 \cdot 0,35}{4} = 8083 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Діаметр осі роликоопори визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M_3}{\pi [\sigma]}}$$

Для сталі 35 приймаємо допустиме напруження: $[\sigma] = 60 \text{ МПа} = 60 \cdot 10^6 \text{ Па}$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 8083}{3,14 \cdot 60 \cdot 10^6}} = 0,111 \text{ м} = 111 \text{ мм}$$

Приймаємо попередній діаметр осі роликоопори: $d = 120 \text{ мм}$

Дотична сила, необхідна для обертання котла, складається з кількох складових: сили від ексцентриситету, сили опору коченню та сили тертя в опорах роликів.

Складова дотичної сили від незбалансованості:

$$T_e = G \frac{e}{R} = 160000 \frac{0,032}{1,6} = 3200 \text{ Н}$$

Сила опору коченню:

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

де $\mu = 0,0025$ м

— коефіцієнт тертя кочення для обгумованих роликоопор.

$$T_\mu = 160000 \frac{0,0025}{0,25} = 1600 \text{ Н}$$

Сила тертя в підшипникових вузлах роликоопор:

$$T_f = G \frac{f \cdot d}{2R_p}$$

де $f = 0,1$ — коефіцієнт тертя для підшипників ковзання;

$d = 0,111$ м — попередньо визначений діаметр осі ролика.

$$T_f = 160000 \frac{0,1 \cdot 0,111}{2 \cdot 0,25} = 3556 \text{ Н}$$

Загальна дотична сила на приводних роликоопорах:

$$T_1 = T_e + T_\mu + T_f = 3200 + 1600 + 3556 = 8356 \text{ Н}$$

Отже, для обертання котла цистерни необхідна дотична сила: $T_1 = 8,36$ кН

Опорні реакції роликоопор під час обертання. Під час обертання котла через дію дотичної сили навантаження на роликоопори розподіляється нерівномірно.

Реакція більш навантаженої роликоопори:

$$Q_1 = Q + \frac{T_1}{2\sin \frac{\alpha}{2}} = 92376 + \frac{8356}{2\sin 30^\circ} = 92376 + \frac{8356}{1} = 100732 \text{ Н}$$

Реакція менш навантаженої роликоопори:

$$Q_2 = Q - \frac{T_1}{2\sin \frac{\alpha}{2}} = 92376 - \frac{8356}{1} = 84020 \text{ Н}$$

Отже:

$$Q_1 = 100,7 \text{ кН}$$

$$Q_2 = 84,0 \text{ кН}$$

Визначення кількості роликоопор. Приймаємо допустиме навантаження на одну роликоопору: $P_p = 30000 \text{ Н}$

Кількість роликоопор у більш навантаженому ряду визначаємо за формулою:

$$z = \frac{Q_1}{P_p} = \frac{100732}{30000} = 3,36$$

Приймаємо: $z = 4$

Отже, в одному ряду необхідно встановити 4 роликоопори. Загальна кількість роликоопор стенду: $z_{\Sigma} = 8$

Розрахункове навантаження на одну приводну роликоопору:

$$P_1 = \frac{Q_1}{z} = \frac{100732}{4} = 25183 \text{ Н}$$

Розрахункове навантаження на одну холосту роликоопору:

$$P_2 = \frac{Q_2}{z} = \frac{84020}{4} = 21005 \text{ Н}$$

Отже, прийнята кількість роликоопор задовольняє умову міцності, оскільки:

$$P_1 < P_p$$

$$25183 < 30000 \text{ Н}$$

Уточнення діаметра осі холостої роликоопори. Згинальний момент для холостої роликоопори:

$$M_{32} = \frac{P_2 \cdot l}{4} = \frac{21005 \cdot 0,35}{4} = 1838 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Діаметр осі холостої роликоопори:

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{32M_{32}}{\pi[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1838}{3,14 \cdot 60 \cdot 10^6}} = 0,068 \text{ м} = 68 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр осі холостої роликоопори: $d_2 = 70 \text{ мм}$

Вал приводної роликоопори працює на сумісну дію згинального та крутного моментів.

Згинальний момент:

$$M_{31} = \frac{P_1 \cdot l}{4} = \frac{25183 \cdot 0,35}{4} = 2204 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Крутний момент на одному приводному ролику:

$$M_{\text{кр}} = \frac{T_1}{z} R_p = \frac{8356}{4} \cdot 0,25 = 522 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Еквівалентний момент:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M_{31}^2 + 0,75 M_{\text{кр}}^2} = \sqrt{2204^2 + 0,75 \cdot 522^2} = 2249 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Діаметр вала приводного ролика:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{32 M_{\text{екв}}}{\pi [\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 2249}{3,14 \cdot 60 \cdot 10^6}} = 0,073 \text{ м} = 73 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартний діаметр приводного вала: $d_1 = 75 \text{ мм}$

Швидкість зварювання кільцевого шва за раніше виконаним розрахунком приймаємо: $V_{\text{зв}} = 28 \text{ м/год}$

Довжина одного оберту котла:

$$l_0 = \pi D = 3,14 \cdot 3,2 = 10,05 \text{ м}$$

Кількість обертів котла за годину:

$$n_{\text{год}} = \frac{V_{\text{зв}}}{l_0} n_{\text{год}} = \frac{28}{10,05} = 2,79 \text{ об/год}$$

Частота обертання в об/хв:

$$n = \frac{2,79}{60} = 0,0465 \text{ об/хв}$$

Для зварювання кільцевого шва приймаємо робочу частоту обертання: $n = 0,05 \text{ об/хв}$

Для налагодження, центрування і повороту котла стенд повинен мати регульований діапазон швидкостей, тому приймаємо конструктивний діапазон:

$$n = 0,05 \dots 0,5 \text{ об/хв}$$

Кутова швидкість обертання котла для розрахункового режиму позиціонування: $n = 0,5 \text{ об/хв}$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5}{60} = 0,0523 \text{ рад/с}$$

Крутний момент, необхідний для обертання котла:

$$M = T_1 R = 8356 \cdot 1,6 = 13370 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Потужність приводного двигуна:

$$N = \frac{M\omega}{\eta}$$

де $\eta = 0,75$

— приведений ККД приводу.

$$N = \frac{13370 \cdot 0,0523}{0,75} = 933 \text{ Вт} = 0,93 \text{ кВт}$$

З урахуванням пускових навантажень, нерівномірності обертання, можливого збільшення маси виробу та запасу потужності приймаємо електродвигун: $N = 1,5 \text{ кВт}$

3.2 Опис конструкції і роботи складально-зварювального обладнання

Для складання та зварювання котла вагона-цистерни моделі 15-7076 застосовуємо спеціалізовану складально-зварювальну установку (рис. 3.1), яка забезпечує центрування обичайок, встановлення торцевих боковин, вирівнювання крайок стиків, виконання прихваток і подальше зварювання кільцевих швів у найбільш сприятливому просторовому положенні. Застосування такого обладнання обумовлене значними габаритами котла, великою довжиною кільцевих швів і підвищеними вимогами до герметичності зварної оболонки.

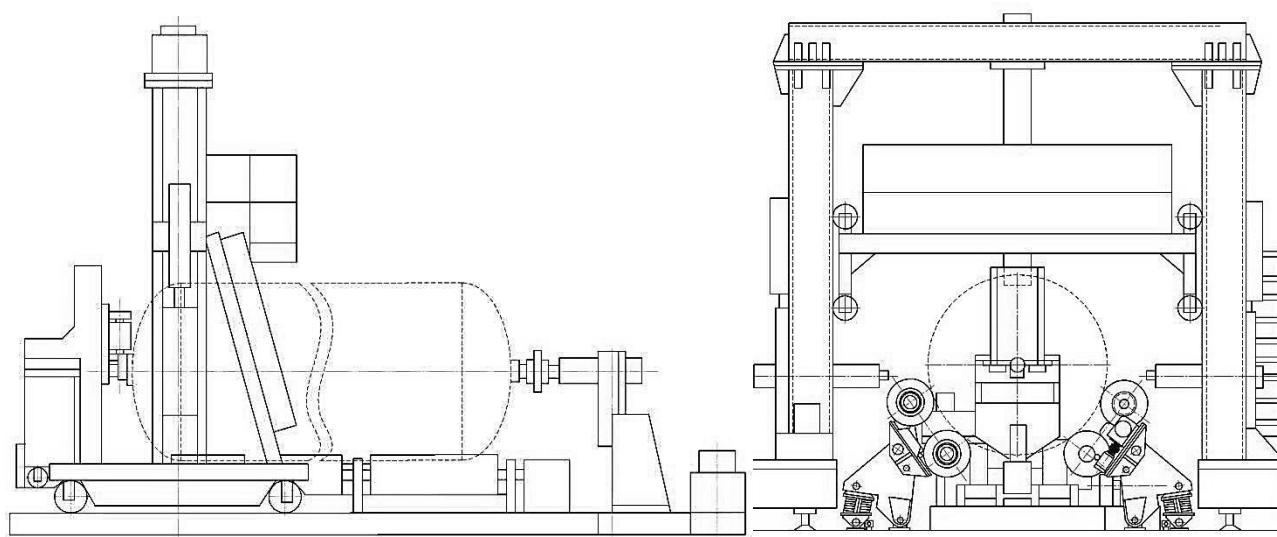


Рис. 3.1 – Спеціалізована складально-зварювальна установка зварювання котла вагона-цистерни моделі 15-7076 [1]

Конструктивно установка складається з роликового стенда-обертача, центрувально-притискного порталу, осьових упорів, приводних і холостих роликоопор, гідравлічних притискних циліндрів, напрямних для переміщення порталу та пульта керування. Основним несучим елементом є зварна рама, на якій встановлюються роликоопори та механізми регулювання їх положення. Рама сприймає навантаження від маси котла, зусилля притискання та динамічні навантаження, що виникають під час обертання виробу.

Роликовий стенд виконує функцію опори та маніпулятора. На нього встановлюють попередньо звальцьовані обичайки котла, а також зібрану частину цистерни під час стикування з наступною обичайкою або торцевою боковиною. Роликоопори поділяються на приводні та холості. Приводні ролики забезпечують обертання котла з регульованою частотою, а холості підтримують виріб і рівномірно розподіляють навантаження. Робоча поверхня роликів має гумове або поліуретанове покриття, що запобігає пошкодженню металу котла і зменшує проковзування під час повороту.

Для котла цистерни 15-7076 застосовуємо роликовий стенд із діаметром роликоопор 500 мм. Центральний кут розміщення роликів становить 60° , а відстань між роликооперами — близько 1,85 м. Така схема забезпечує стійке положення котла на стенді та дозволяє виконувати його поворот без додаткового кантування. У кожному ряду встановлюється по кілька роликоопор, що знижує навантаження на кожний ролик і підвищує надійність роботи установки.

Центрувально-притискний портал застосовуємо для складання кільцевих стиків. Він переміщується вздовж роликового стенда і встановлюється безпосередньо над зоною стикування обичайок або обичайки з торцевою боковиною. На порталі монтуються вертикальні та горизонтальні гідроциліндри. Вертикальний циліндр використовується для вирівнювання крайок за висотою, якщо одна частина стику розташована вище іншої. Горизонтальні циліндри забезпечують бокове підтискання, усунення зміщення крайок та встановлення рівномірного зазору по периметру стику.

Для встановлення торцевих боковин у склад установки вводиться осьовий упорний диск. Він розміщується по осі котла і використовується для притискання боковини до торця обичайки. Положення упорного диска регулюється залежно від діаметра котла, висоти осі виробу та конструктивної форми боковини. Завдяки цьому забезпечується щільне прилягання боковини до обичайки, зменшується перекіс торцевого елемента і створюються умови для рівномірного кільцевого зварного шва.

У вихідному положенні портал відводиться в крайнє положення, а звальцьована обичайка за допомогою мостового крана і траверси встановлюється на роликові опори. Після встановлення обичайка центрується відносно осі стенда. Далі до неї подається наступна обичайка або сформована торцева боковина. За допомогою роликоопор і осьового упора деталі зближуються до отримання необхідного зазору в стику. Після цього портал переміщується до місця стикування, і притискні циліндри виконують остаточне вирівнювання крайок.

Якщо під час складання виявляється перевищення однієї крайки над іншою, вирівнювання виконується вертикальним гідроциліндром. Якщо спостерігається бокове зміщення або нерівномірний зазор, застосовуються горизонтальні притиски. Після досягнення необхідного положення крайок виконується прихвачування з'єднання механізованим зварюванням у середовищі захисних газів. Далі котел повертається роликовим стендом на певний кут, і операція вирівнювання та прихвачування повторюється по всьому периметру стику.

Після завершення прихвачування складений вузол залишається на роликовому стенді для виконання основного зварювання. Кільцеві шви обичайок і торцевих боковин виконуємо автоматичним зварюванням під шаром флюсу. Зварювальний трактор встановлюється нерухомо в зоні шва, а котел обертається роликовим стендом із заданою швидкістю. Така схема забезпечує виконання шва в нижньому положенні, стабільне формування зварювальної ванни, рівномірну глибину проплавлення і зниження ймовірності дефектів.

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Вплив електромагнітного випромінювання на організм людини

Під час виконання зварювальних робіт працівники можуть перебувати в зоні дії електромагнітних полів, джерелами яких є зварювальні джерела живлення, електричні кабелі, трансформатори, перетворювачі, електродвигуни, установки автоматичного та механізованого зварювання. Вплив електромагнітного випромінювання на організм людини залежить від частоти поля, інтенсивності випромінювання, тривалості перебування у зоні його дії, відстані до джерела, площі опромінюваної поверхні тіла, а також від індивідуального стану організму працівника.

Електромагнітне поле може спричиняти як теплову, так і біологічну дію. Тепловий вплив пов'язаний із поглинанням енергії тканинами організму, унаслідок чого відбувається їх нагрівання. Особливо чутливими до такого впливу є органи та тканини з недостатньо розвиненою системою кровообігу, зокрема очі, мозок, нирки, шлунок, жовчний та сечовий міхур. При значному опроміненні організм не завжди здатний своєчасно відводити надлишкове тепло, що може призводити до локального перегрівання окремих органів.

Найбільш небезпечним є тривалий вплив електромагнітних полів підвищеної інтенсивності. За таких умов можливі функціональні зміни в центральній нервовій і серцево-судинній системах. У працівників можуть виникати головний біль, швидка втомлюваність, зниження працездатності, порушення сну, дратівливість, зміни артеріального тиску, погіршення загального самопочуття. При довготривалому впливі також можливі зміни складу периферичної крові, послаблення імунних реакцій та розвиток нервово-психічних розладів.

У виробничих умовах особливу увагу необхідно приділяти джерелам електромагнітних полів промислової частоти. До них належать силові електроустановки, трансформатори, кабельні лінії, електродвигуни, зварювальні випрямлячі та інше обладнання, що використовується у складально-зварювальному виробництві. Тривале перебування працівників поблизу такого

обладнання без дотримання вимог безпеки може спричинити погіршення самопочуття, зниження уваги, втому та функціональні порушення нервової системи[33-34].

Для зменшення негативного впливу електромагнітного випромінювання необхідно забезпечувати раціональне розміщення електрообладнання, скорочувати час перебування працівників у зоні підвищеної напруженості поля, застосовувати екрани, захисні огороження, дистанційне керування обладнанням і справну систему заземлення. Також необхідно регулярно контролювати технічний стан зварювальних установок, кабелів, джерел живлення та електричних з'єднань.

Нормування електромагнітних випромінювань здійснюється відповідно до чинних санітарних норм і правил. Дотримання цих вимог дозволяє знизити ризик професійних захворювань, забезпечити безпечні умови праці та підтримувати стабільну працездатність працівників зварювального виробництва. [33].

4.2 Організаційно-технічні заходи щодо поліпшення умов праці зварника

Умови праці зварника значною мірою впливають на якість виконання зварних з'єднань, продуктивність роботи та рівень виробничої безпеки. Під час виготовлення котла цистерни працівник виконує роботи з великогабаритними металевими деталями, використовує електродугове обладнання, працює в зоні дії високої температури, випромінювання, зварювальних аерозолів, шуму та електричного струму. Тому організація робочого місця повинна забезпечувати не лише технологічну зручність, а й належний рівень охорони праці.

Одним із важливих напрямів поліпшення умов праці є механізація та автоматизація складально-зварювальних операцій. Використання роликів, стендів, обертачів, кантувачів, маніпуляторів, кондукторів, затискачів і центрувальних пристроїв дає змогу зменшити фізичне навантаження на працівника, підвищити точність складання деталей і забезпечити зручне просторове положення зварюваного шва. При виготовленні цистерни це особливо важливо, оскільки обичайки, боковини, горловина та інші елементи мають значні габарити й масу.

Застосування механізованого транспорту також є важливим заходом безпеки. Переміщення листів, обичайок і зібраних вузлів повинно виконуватися за допомогою мостових кранів, кран-балок, траверс, підкранових візків або спеціальних транспортних пристроїв. Це знижує ризик травмування працівників, полегшує подавання деталей на робочі позиції та скорочує допоміжний час у технологічному процесі.

Значну небезпеку для зварника становить випромінювання електричної дуги. У процесі зварювання виникає інтенсивне ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, яке може негативно впливати на очі та відкриті ділянки шкіри. Для захисту зору необхідно використовувати зварювальні маски або щитки зі світлофільтрами відповідного ступеня затемнення. Шкіра працівника повинна бути захищена спеціальним одягом, рукавицями, взуттям і засобами індивідуального захисту, виготовленими з матеріалів, стійких до іскор, бризок розплавленого металу та теплового впливу.

Під час очищення швів від шлаку, флюсу, бризок металу та окалини зварник повинен користуватися захисними окулярами або щитком. Це дає змогу запобігти потраплянню твердих частинок в очі та зменшити ризик механічного травмування. У разі ураження очей випромінюванням або потрапляння сторонніх частинок працівникові необхідно надати першу допомогу та за потреби направити його до медичного пункту.

Важливим фактором безпечної праці є вентиляція робочої зони. У процесі зварювання утворюються зварювальні аерозолі, оксиди металів, гази та пари, які можуть негативно впливати на органи дихання. При зварюванні в захисних газах, зокрема в середовищі CO_2 або сумішей $\text{Ar} + \text{CO}_2$, можливе накопичення газів у нижніх частинах приміщення або всередині замкнених ємностей. Тому виробниче приміщення повинно бути обладнане загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією, а робочі місця — місцевими відсмоктувачами.

У разі виконання робіт усередині котла цистерни або в обмеженому просторі необхідно застосовувати примусову вентиляцію, переносні витяжні пристрої, газоаналізатори та засоби індивідуального захисту органів дихання. Роботи в

замкнених порожнинах повинні виконуватися за нарядом-допуском із постійним контролем стану повітряного середовища та наявністю страхувального працівника.

Не менш важливим є правильне освітлення робочої зони. Недостатня освітленість ускладнює складання деталей, контроль зазорів, виявлення дефектів і виконання якісного зварювання. У виробничих приміщеннях повинно застосовуватися природне та штучне освітлення, а в місцях виконання точних складально-зварювальних операцій — додаткове місцеве освітлення. Світильники мають бути розташовані так, щоб не створювати різких тіней і засліплення працівника [34].

Для підтримання працездатності зварника необхідно також передбачати раціональний режим праці та відпочинку. Тривала робота в незручному положенні, у зоні підвищеної температури або при високій концентрації зварювальних аерозолів знижує увагу і може стати причиною помилок або травм. Тому робоче місце повинно бути організоване так, щоб зварник мав зручний доступ до шва, міг безпечно переміщуватися та виконувати операції без зайвого фізичного напруженн.

4.3 Забезпечення електробезпеки при експлуатації зварювального обладнання

Експлуатація зварювального та технологічного обладнання під час виготовлення цистерни повинна здійснюватися з дотриманням вимог електробезпеки. Зварювальні джерела живлення, електродвигуни, кабельні лінії, пульти керування, приводи роликів стендів, вентиляційні установки та інше електрообладнання становлять потенційну небезпеку ураження електричним струмом, особливо в умовах підвищеної вологості, запиленості, наявності металевих конструкцій і роботи в обмеженому просторі.

Електротравматизм найчастіше виникає внаслідок пошкодження ізоляції, відсутності або несправності заземлення, порушення правил експлуатації обладнання, неправильного підключення джерел живлення, використання несправних кабелів, а також через помилкові дії персоналу. Тому всі

електроустановки повинні експлуатуватися відповідно до вимог правил улаштування електроустановок, інструкцій з охорони праці та технологічної документації підприємства.

До основних заходів електробезпеки належать надійна ізоляція струмопровідних частин, захисне заземлення, занулення, використання пристроїв захисного вимкнення, блокування, огороження небезпечних зон, попереджувальна сигналізація та застосування засобів індивідуального захисту. Доступ до відкритих струмопровідних частин повинен бути обмежений захисними кожухами, огороженнями або розміщенням обладнання у спеціально відведених місцях.

Перед початком роботи зварник повинен перевірити справність зварювального апарата, цілісність кабелів, надійність контактних з'єднань, стан електродотримача або зварювального пальника, наявність заземлення та справність органів керування. Забороняється працювати з обладнанням, яке має пошкоджену ізоляцію, оголені струмопровідні частини, несправні вимикачі або ненадійне заземлення.

Особливу увагу слід приділяти роботам усередині котла цистерни або в інших замкнених металевих ємностях. У таких умовах небезпека ураження електричним струмом зростає, оскільки працівник може одночасно контактувати з металевою поверхнею виробу та елементами зварювального кола. Для освітлення всередині ємності необхідно використовувати переносні світильники безпечної напруги. Зварювальне обладнання повинно розміщуватися поза ємністю, а кабелі необхідно прокладати так, щоб вони не пошкоджувалися об гострі краї та не заважали переміщенню працівника.

Під час експлуатації роликів, стендів, обертачів, приводних механізмів і зварювальних автоматів необхідно забезпечувати справність електричних блокувань, аварійних кнопок зупинки, кінцевих вимикачів і систем сигналізації. Рухомі частини обладнання повинні мати захисні огороження. Пуск обладнання дозволяється лише після перевірки відсутності людей у небезпечній зоні та після подавання попереджувального сигналу.

Контроль стану ізоляції є одним із важливих профілактичних заходів. Він передбачає періодичне вимірювання опору ізоляції кабелів, електродвигунів, трансформаторів і зварювальних джерел живлення. Виявлені пошкодження повинні усуватися до початку роботи. Не допускається експлуатація електрообладнання з несправною ізоляцією або ознаками перегрівання.

Для захисту працівників використовують діелектричні рукавиці, гумові килимки, ізолювальні підставки, інструмент з ізольованими ручками, захисне взуття та інші засоби індивідуального захисту. Працівники, які обслуговують електрообладнання, повинні пройти навчання, інструктаж і мати відповідну групу з електробезпеки.

У разі виникнення аварійної ситуації обладнання необхідно негайно вимкнути від мережі. Якщо працівник потрапив під дію електричного струму, його потрібно якнайшвидше звільнити від контакту зі струмопровідними частинами, використовуючи безпечні ізолювальні засоби, після чого надати першу домедичну допомогу та викликати медичних працівників. [33-34].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра розроблено технологічний процес виготовлення цистерни вагона моделі 15-7076. У процесі виконання роботи проаналізовано конструкцію виробу, матеріал котла, технічні умови виготовлення, базовий технологічний процес, способи зварювання, методи контролю якості та складально-зварювальне обладнання.

Проведено аналіз конструкції вагона-цистерни моделі 15-7076. Встановлено, що основним і найбільш відповідальним елементом виробу є котел, який являє собою зварну циліндричну оболонку з торцевими днищами, люк-горловиною, зливним пристроєм, опорними зонами та підсилювальними елементами. Якість виготовлення котла визначає герметичність, міцність і безпечність експлуатації цистерни.

Обґрунтовано вибір сталі 09Г2С для виготовлення основних елементів котла цистерни. Цей матеріал має достатню міцність, пластичність, опір крихкому руйнуванню та добру зварюваність, що є важливим для відповідальної оболонкової конструкції, яка працює під дією статичних, динамічних, температурних і гідродинамічних навантажень.

Сформульовано технічні умови на виготовлення цистерни, у яких визначено вимоги до листового прокату, підготовки кромek, точності вальцювання обичайок, складання стиків, якості прихваток, виконання зварних швів і контролю готового виробу. Особливу увагу приділено забезпеченню стабільного зазору, мінімального зміщення крайок і відсутності дефектів у відповідальних зварних з'єднаннях котла.

Проаналізовано базовий технологічний процес виготовлення цистерни. Встановлено, що він забезпечує можливість виготовлення котла з необхідною міцністю та герметичністю, однак має низку недоліків: значну трудомісткість, велику кількість переміщень і кантувань, можливість виникнення залишкових деформацій, залежність якості зварювання від точності складання та тривалий цикл контролю якості.

Запропоновано вдосконалений технологічний процес виготовлення котла цистерни, який передбачає послідовне виконання операцій вхідного контролю

матеріалу, очищення і правлення листового прокату, розкрою заготовок, підготовки кромek, вальцювання обичайок, формування боковин, складання стиків, зварювання, очищення швів, неруйнівного контролю та випробування котла на герметичність.

Для виконання основних поздовжніх і кільцевих стикових швів котла прийнято автоматичне зварювання під шаром флюсу. Такий спосіб забезпечує високу продуктивність, стабільне формування шва, достатню глибину проплавлення і зменшення впливу людського фактора. Для приварювання люк-горловини, патрубків, зливного пристрою, накладок і допоміжних вузлів прийнято механізоване зварювання в середовищі захисних газів.

Обґрунтовано вибір методів контролю якості зварних з'єднань. Для всіх швів передбачено візуально-вимірювальний контроль, для відповідальних стикових швів котла — ультразвуковий контроль із застосуванням Evident OmniScan X4, для швів горловини, патрубків і зливного пристрою — капілярний контроль. Завершальним етапом перевірки є випробування котла на герметичність.

У конструкторській частині описано складально-зварювальну установку роликового типу, яка застосовується для складання та зварювання котла цистерни. Установка забезпечує центрування обичайок, встановлення торцевих боковин, вирівнювання крайок стиків, виконання прихваток і подальше зварювання кільцевих швів у нижньому положенні.

Проведено розрахунок роликового станду-обертача, за результатами якого визначено основні конструктивні параметри установки: діаметр роликоопор, центральний кут їх розміщення, відстань між роликами, навантаження на роликоопори, діаметри осей і приводного вала, а також потужність електродвигуна. Застосування такого станда дозволяє зменшити кількість переміщень котла і забезпечити стабільне обертання виробу під час зварювання.

Розглянуто питання безпеки життєдіяльності та охорони праці під час виконання зварювальних робіт. Запропоновано організаційно-технічні заходи для поліпшення умов праці зварника та забезпечення електробезпеки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кривов Г. О., Зворикін К. О. Виробництво зварних конструкцій : підручник. Київ : КВІЦ, 2012. 896 с.
2. https://kvsz.com/index.php/ua/produktsiya/vantazhne-vagonobuduvannya/vagoni-tsisterni/item/2256-vahon-tsysterna-model-15-7076?utm_source=chatgpt.com
3. https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s?utm_source=chatgpt.com
4. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізовуглецевих сплавів : навч. посіб. Львів : КІНПАТРІ ЛТД, 2003. 263 с.
5. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник / за ред. В. М. Плєскача. Київ : Либідь, 2010. 424 с.
6. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / О. А. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. Київ : Політехніка, 2001. 375 с.
7. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
8. ДСТУ EN ISO 3834-3:2015. Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 3. Стандартні вимоги до якості. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
9. ДСТУ EN 15085-2:2022. Залізничний транспорт. Зварювання залізничних транспортних засобів та їхніх частин. Частина 2. Вимоги до виробника щодо виконання зварювальних робіт. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
10. ДСТУ EN ISO 15614-1:2019. Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталей і дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
11. ДСТУ EN ISO 9606-1:2018. Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 1. Сталі. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
12. ДСТУ EN ISO 5817:2022. Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів. Рівні якості залежно від дефектів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
13. 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. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. Стандарт визначає класифікацію дротів і наплавленого металу для газозахисного дугового зварювання нелегованих і дрібнозернистих сталей.
14. ДСТУ EN ISO 14341:2022. Витратні матеріали для зварювання. Дротяні електроди та зварні наплавлення для дугового зварювання нелегованих та

- дрібнозернистих сталей у захисному газі. Класифікація. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022
15. ДСТУ EN ISO 14175:2014. Матеріали зварювальні. Захисні гази для дугового зварювання та різання. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.
 16. Биковський О. Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій : підручник. Київ : Основа, 2021. 400 с.
 17. <https://eweld.com.ua/ua/svarochnaya-himiya/svarochnyj-flyus-esab-ok-flux-1071-25-kg>
 18. <https://paton.ua/svarochnaya-provoloka/omednennaya-provoloka/zvaryuvalniy-dr-t-er70-s6-sv-08g2s-0-8-mm-5-kg/>
 19. 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.
 20. https://esab.com/bg/eur_en/products-solutions/product/welding-automation/submerged-arc-welding/welding-tractors/a6-mastertrac-a6tf-single-twin-saw/?utm_source=chatgpt.com
 21. https://www.oxibras.com.br/wp-content/uploads/2019/09/kemppi_x8-mig-welder_en_US.pdf?utm_source=chatgpt.com
 22. ДСТУ EN ISO 17637:2017. Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. ISO 17637 встановлює вимоги до візуального контролю зварних швів у металевих матеріалах.
 23. ДСТУ EN ISO 17640:2018. Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролю та оцінювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
 24. Камель Г. І. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.
 25. https://ims.evidentscientific.com/en/news/evident-announces-release-of-omniscan-x4?utm_source=chatgpt.com
 26. https://magnaflux.eu/EU/EN/Products/Liquid-Penetrant-Testing/Consumables/SK-3-Kit.htm?utm_source=chatgpt.com
 27. https://cdn.thomasnet.com/ccp/20020926/192190.pdf?utm_source=chatgpt.com
 28. https://svartech.com.ua/ua/p1183680545-listopravilnaya-mashina-bendmak.html?utm_source=chatgpt.com
 29. https://www.microstep.eu/machines/plasma-and-oxyfuel-machines/mg/?utm_source=chatgpt.com
 30. https://www.davi.com/int/en/plate-roll/4-roll-plate-roll/mca?utm_source=chatgpt.com

31. https://liag.com.ua/product/flanging-machine-bendmak-bfm-30xd/?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

ДОДАТОК