

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній рівень)

на тему: Вдосконалення технології виготовлення корпусу стратифікаційної ємності об'ємом 400 л для геліоколекторів та дослідження дефектності й міцнісних властивостей зварних з'єднань

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи МПм

Спеціальності “Прикладна механіка” 131

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Ващук С. Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Лазарюк В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Ткаченко І. Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедрою

(підпис)

Окіпний І.Б.

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2025

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТ
доц., кт.н. Окіпний І.Б.

«___» _____ 2025__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 131 "Прикладна механіка"
(шифр і назва спеціальності)
студенту Ващуку Станіславу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вдосконалення технології виготовлення корпусу стратифікаційної ємності об'ємом 400 л для геліоколекторів та дослідження дефектності й міцнісних властивостей зварних з'єднань

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

Затверджені наказом по університету від «14» листопада 2025 року № 4/7-977

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 26 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) креслення виробу; технічні умови на виготовлення; базовий технологічний процес виготовлення виробу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. Аналітична частина. Технологічна частина. Науково-дослідна частина.
Конструкторська частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.
Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Установка для підготовки кромок. Установка для зварювання кільцевих швів. Роликовий стенд.
План дільниці. Розрахунок роликового стенду. Матеріали та режими зварювання. Вплив імпульсного режиму зварювання на структуру зварного шва. Аналіз очікуваних структур.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Ткаченко І. Г., доцент. каф. МТ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стадник І. Я., професор кафедри ОХ</i>		

7. Дата видачі завдання «1» жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(підпис)

Вашук С. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лазарюк В.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра, на тему: «Вдосконалення технології виготовлення корпусу стратифікаційної ємності об'ємом 400 л для геліоколекторів та дослідження дефектності й міцнісних властивостей зварних з'єднань» складається із 5 частин розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 84 - аркушів формату А4 та графічної частини об'ємом 7 аркушів формату А1. Записка складається із таких частин: аналітичний, технологічний, науково-дослідний, конструкторський, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Мета кваліфікаційної роботи – підвищення якості зварних швів тонкостінної циліндричної ємності; дослідження впливу імпульсного зварювання в захисній суміші газів $\text{Ar}+18\% \text{CO}_2$ на структуру та властивості зварного шва; прогнозування структури та механічних властивостей ділянки перегрівання ЗТВ; покращення якості операцій зварювання; впровадження безпечних методів праці та організації цивільного захисту на підприємстві.

Для висвітлення питань, які розглядаються в даному дипломному проекті, розрахунково-пояснювальна записка містить 31 рисунок, 6 таблиць та додатки. При написанні записки використано 36 літературних джерел.

У даній кваліфікаційній роботі розроблено складальні та зварювальні операції виготовлення стратифікаційної ємності геліоколектора. Запропоновано складання та зварювання корпусу ємності проводити на одній установці; зварювання проводити автоматизовано в імпульсному режимі у суміші газів $\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$; розраховано режим зварювання; запропоновано раціональне обладнання і пристосування; досліджено вплив частоти імпульсів на структуру зварного шва; проведено прогнозування структурно-фазових перетворень в ЗТВ, розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: ІМПУЛЬСНЕ ЗВАРЮВАННЯ В СУМІШІ $\text{Ar}+ \text{CO}_2$, СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 Аналітична частина	8
1.1 Опис конструкції виробу	8
1.2 Характеристика матеріалу стратифікаційної ємності	11
1.3 Технічні умови на виготовлення стратифікаційної ємності	16
1.4 Аналіз базового техпроцесу виготовлення стратифікаційної ємності	20
2 Технологічна частина	18
2.1 Підготовка заготовок під зварювання	22
2.2 Вибір способу та матеріалів для зварювання	26
2.3 Розрахунок режимів зварювання	29
2.4 Вибір устаткування для складально-зварювальних операцій	31
2.5 Особливості складально-зварювальної технології корпусу стратифікаційної ємності	38
2.6 Контроль якості зварювання стратифікаційної ємності	39
3. Науково-дослідна частина	44
3.1 Дослідження впливу імпульсного зварювання на структуру та властивості металу шва	43
3.1.1 Умова формування бездефектного зварного шва	43
3.1.2 Сили, що діють на рідкий метал у зварювальній ванні	45
3.1.3 Перенесення електродного металу та його вплив на зварювальну ванну	48
3.1.4. Імпульсне живлення дуги як засіб керування зварювальною ванною	50
3.1.5 Експериментальне дослідження впливу імпульсного живлення дуги на мікроструктуру зварного шва	53
3.2 Вплив термічного циклу на структуру та механічні властивості зони термічного впливу зварного з'єднання	58

3.3 Аналіз очікуваної структури зони термічного впливу	61
4. Конструкторська частина	65
4.1 Вибір та розрахунок зварювальних пристосувань	65
4.2. Розрахунок роликового стенду	66
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	71
5.1 Аналіз потенційних шкідливостей на зварювальній ділянці.	
Заходи щодо їх зниження	71
5.2 Розрахунок захисного заземлюючого пристрою	74
5.3 Організація цивільного захисту на об'єктах господарської діяльності	77
Загальні висновки	79
Перелік посилань	81
Додатки	85

ВСТУП

Підвищення надійності та довговічності зварних металевих конструкцій, зокрема корпусів стратифікаційних ємностей геліоколекторів, є одним із ключових чинників розвитку автономних систем теплозабезпечення в Україні. Такі ємності є невід'ємною складовою сонячних теплових установок та іншого енергоефективного обладнання, що працює в умовах тривалої статичної експлуатації, циклічних теплових навантажень і підвищених вимог до герметичності. Відтак актуальною є задача створення зварних виробів, здатних безаварійно функціонувати протягом 25–30 років без проведення ремонтних робіт, водночас залишаючись доступними за собівартістю та виготовленими з вітчизняної сировини.

Найбільш уразливим елементом таких конструкцій є зварні з'єднання, властивості яких значною мірою визначають загальну міцність і ресурс виробу. При використанні конструкційних маловуглецевих сталей дія традиційного зварювального теплового циклу може призводити до формування зон термічного впливу з підвищеними залишковими напруженнями, структурною неоднорідністю та локальним розміцненням, що стає причиною зародження й розвитку руйнувань.

Застосування застарілих технологій ручного дугового або напіваавтоматичного зварювання в середовищі вуглекислого газу не забезпечує стабільної повторюваності параметрів процесу, що підвищує ймовірність появи дефектів зварних швів і зниження їхніх міцнісних характеристик.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження автоматизованого імпульсного зварювання в захисних середовищах аргону та вуглекислого газу, яке дозволяє точно керувати тепловкладенням, стабілізувати перенесення металу електрода, зменшити рівень залишкових напружень, покращити структуру зварного шва і забезпечити високу якість зварних з'єднань. Реалізація таких технологічних рішень у виробництві стратифікаційних ємностей геліоколекторів та іншого подібного обладнання сприятиме підвищенню їх експлуатаційної надійності, розвитку енергоощадних технологій та створенню сучасних, безпечних робочих місць у вітчизняному промисловому секторі.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис конструкції виробу

Стратифікаційна ємність (далі бак-акумулятор) об'ємом близько 400 літрів у системах з геліоколекторами є вертикальним теплоакумулювальним баком, призначеним для накопичення теплової енергії та її збереження у вигляді пошарового розподілу за температурою. Основою її роботи є природна стратифікація: тепліший теплоносіє, маючи меншу густину, піднімається у верхню частину бака, тоді як холодніший залишається внизу, [1]. Завдяки цьому формується стабільний температурний градієнт, який дозволяє відбирати гарячу воду з верхніх шарів для гарячого водопостачання або опалення, а холодніші нижні шари використовувати для повернення теплоносія в контур геліоколекторів. Такий принцип, описаний у загальних оглядах стратифікованих теплових акумуляторів, зменшує теплові втрати та підвищує ефективність використання сонячної енергії за рахунок мінімізації перемішування шарів, [1, 2].

Конструктивно така ємність являє собою теплоізолюваний сталевий або корозійностійкий циліндричний корпус із системою патрубків на різних висотах та пристроями для м'якого введення і відбору теплоносія. На входах зазвичай застосовують дифузори або спеціальні насадки, які знижують швидкість потоку і спрямовують його у відповідний температурний шар, не руйнуючи стратифікацію. У поєднанні з геліоколекторами нагрітий теплоносіє подається у верхню зону бака, а охолоджений відводиться знизу, що забезпечує ефективні цикли заряджання та розряджання. Практичні рекомендації виробників і інженерні огляди підкреслюють, що саме така організація потоків і якісна теплоізоляція дозволяють підтримувати чітку стратифікацію, підвищувати корисний відбір тепла і зменшувати потребу в додаткових джерелах енергії.

Для геліоколекторів стратифікаційна ємність потрібна тому, що сонячний колектор працює ефективніше при якнайнижчій температурі зворотного теплоносія.

Розглянемо робочий приклад. У сонячний день геліоколектор нагріває теплоносії до 60–70 °С. У стратифікаційній ємності цей теплоносії надходить у верхню частину бака і формує гарячий шар з температурою, скажімо, 60 °С, який відразу придатний для ГВП. Нижня частина бака при цьому може залишатися на рівні 25–30 °С. Колектор знову отримує знизу саме цю холодну воду, тому різниця температур між колектором і теплоносієм залишається великою, а ККД — високим. У звичайному, нестратифікованому баку весь об'єм швидко перемішується, середня температура піднімається до 45–50 °С, і колектор починає працювати значно гірше або взагалі переходить у режим стагнації. Отже, стратифікація дозволяє одночасно мати високу температуру для споживання зверху і низьку температуру для ефективної роботи геліоколектора знизу, що і є ключовою причиною застосування таких ємностей саме в сонячних теплових системах.

Якісна термічна стратифікація в баку-акумуляторі досягається насамперед геометрією ємності, а вже потім внутрішніми елементами. Ключова вимога — бак має бути високим і відносно вузьким, тобто з великим відношенням висоти до діаметра. Практика сонячних теплових систем показує, що для стабільної стратифікації оптимальним є співвідношення H/D не менше 2,5–3, а краще 3–4, [1-3]. Така форма мінімізує вертикальне перемішування, зменшує конвективні вихори і дозволяє чітко сформувати температурні шари по висоті. Другою критичною вимогою є площа горизонтального перерізу та швидкість потоку. Чим більша площа перерізу, тим менша допустима швидкість входу теплоносія без руйнування шарів. У підсумку, висота бака визначає кількість і стабільність температурних шарів, а діаметр — схильність системи до перемішування; саме тому для геліосистем завжди рекомендують вузькі вертикальні баки, рис. 1.

Ринок буферних і стратифікаційних ємностей в Україні наразі характеризується обмеженою номенклатурою спеціалізованих рішень для систем сонячного теплопостачання, тоді як більшість наявних теплоакумуляторів орієнтована на універсальне застосування без урахування вимог геліоколекторів до стабільного температурного шарування та мінімізації теплових втрат. Пропозиція зосереджена перева-

жно на ємностях малих і середніх об'ємів, що обмежує ефективність акумуляції сонячної енергії та ускладнює інтеграцію геліосистем із системами опалення і гарячого водопостачання. Відсутність стратифікаційних ємностей достатнього об'єму змушує використовувати надлишково масивні теплоакумулятори або багатобакові схеми, що погіршує умови збереження температурного шарування та знижує загальну енергоефективність геліотеплових установок, обумовлюючи актуальність розроблення спеціалізованих конструкцій для сонячних колекторів.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд стратифікаційної ємності геліоколектора

Стратифікаційна ємність номінальним об'ємом 400 л виконана у вигляді вертикального циліндричного резервуара з внутрішнім діаметром $D = 600$ мм та розрахунковою висотою робочої зони $H \approx 1420$ мм, що забезпечує заданий об'єм теплоносія. Конструкція включає зварну обичайку сполучену з холодноформованими днищами, а також систему входних і вихідних патрубків, розміщених по висоті відповідно до зон температурної стратифікації, з метою мінімізації перемішування теплоносія. Корпус виготовляється зі сталевих листів, товщина якого обирається відповідно до розрахункового тиску та температури експлуатації, у практиці європейських виробів зазвичай у межах 4–5 мм для резервуарів такого об'єму. Зовнішня

поверхня оснащується теплоізоляцією товщиною 80–90 мм, що відповідає вимогам до зниження теплових втрат і енергоефективності геліотеплових систем.

У європейській практиці проєктування геліотеплових систем робочий тиск теплоносія зазвичай перебуває в межах 1,5–2,5 бар, що відповідає нормальним умовам експлуатації сонячних контурів і систем акумуляції тепла. Для захисту обладнання від перевищення допустимого тиску застосовуються запобіжні клапани з номіналом спрацювання 3 бар, які є типовим стандартним рішенням для таких систем. Відповідно, буферні та стратифікаційні ємності проєктуються з урахуванням допустимого робочого або короткочасного тиску не менше 3 бар, тоді як випробувальний тиск приймається підвищеним і, як правило, становить 4,5–6 бар, що забезпечує необхідний запас міцності та безпечну тривалу експлуатацію обладнання.

Стратифікаційна ємність проєктується для роботи в заданих температурних і тискових режимах із урахуванням тривалих теплових навантажень, характерних для сонячних теплових установок, при цьому конструкція розраховується на достатню механічну міцність і стійкість до експлуатаційних навантажень, а вибір матеріалів і виконання зварних з'єднань відповідають вимогам до довготривалої роботи в умовах водяних та геліотеплових систем. Захист від корозійних впливів і збереження цілісності конструкції забезпечуються конструктивними та матеріальними рішеннями, прийнятими у європейській практиці, за умови дотримання вимог монтажу та режимів експлуатації.

1.2 Характеристика матеріалу стратифікаційної ємності

Матеріал бака-акумулятора працює в специфічних умовах і повинен забезпечувати поєднання достатньої міцності та пластичності для експлуатації посудини під тиском до 6 атм, надійну зварюваність, корозійну стійкість у робочих середовищах теплоносіїв при тривалих температурах 30–90 °С, а також придатність до холодної й гарячої обробки тиском. Важливими чинниками є також доступність матеріалу та його економічна доцільність. Зазначеним вимогам відповідають малоуглецеві сталі, що застосовуються для виготовлення котельного обладнання і посудин, призначених для роботи під тиском за підвищених температур. До таких

матеріалів належать сталі радянської номенклатури типу 16К і 20К, а також сучасні європейські марки S235JR, S355JR згідно з EN 10025-2 та P235GH, P265GH, P295GH за EN 10028-2. Для теплоаккумуляторів геліосистем, які в нормативній документації класифікуються як посудини під тиском, виробники зазвичай декларують саме котельні сталі групи P-GH.

Днище резервуара зазнає підвищених локальних навантажень, пов'язаних із внутрішнім тиском, пластичними деформаціями під час штампування та напруженим станом у зоні зварних з'єднань. У зв'язку з цим у ряді випадків доцільним є застосування матеріалу з вищою межею плинності або кращими деформаційними властивостями для днища порівняно з обичайкою, наприклад: обичайка зі сталі S235JR при днищі зі сталі S355JR або обичайка з P235GH у поєднанні з днищем із P265GH.

Таблиця 1.1 - Механічні властивості котельних сталей

Марка сталі (за стандартом)	Тимчасовий опір σ_b , Н/мм ²	Мінімальна межа плин- ності $\sigma_{0.2}$, Н/мм ²	Мінімальне відносне ви- довження, δ_5 , %	Ударна в'яз- кість КСУ при температурі 20 °C, Дж/см ² , не менше
16К (ДСТУ 8804), [4]	400-490	255	22	34
20К (ДСТУ 8804), [5]	400-510	225	25	59
P265GH (EN 10028-2), [6]	410...530	265	22	40
P235GH (EN 10028-2), [7]	360–480	≥ 235	≥ 24	-

Сталь P235GH належить до маловуглецевих котельних сталей із мінімальним вмістом вуглецю та обмеженим легуванням. Її еквівалент вуглецю, як правило, не перевищує 0,40, що забезпечує дуже добру зварюваність. Зварювання виконується

без попереднього підігріву для більшості товщин, ризик утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу мінімальний. Структурні перетворення в ЗТВ обмежуються феритно-перлітною областю, без схильності до утворення загартованих структур. P235GH добре підходить для серійного виготовлення баків і теплоаккумуляторів із мінімальними вимогами до спеціальних зварювальних заходів.

Сталь P265GH має підвищену міцність порівняно з P235GH, що досягається дещо більшим вмістом марганцю та загальним рівнем зміцнення. Зварюваність оцінюється як добра, однак сталь є більш чутливою до тепловкладення та швидкості охолодження. Для середніх і великих товщин може бути рекомендований помірний попередній підігрів, особливо за низьких температур навколишнього середовища. У зоні термічного впливу можливе формування більш дрібнозернистої або частково загартованої структури, тому контроль режимів зварювання та використання низьководневих матеріалів є бажаними. У промисловій практиці P265GH широко застосовується для днищ і вузлів із підвищеними напруженнями.

Сталь 20K є класичною котельною сталлю радянської номенклатури з дещо вищим вмістом вуглецю та менш жорстко нормованим хімічним складом порівняно з EN-сталями. Її зварюваність вважається задовільною, але більш залежною від технологічної дисципліни. Підвищений ризик утворення холодних тріщин і зниження ударної в'язкості у ЗТВ вимагає обов'язкового контролю вологості, застосування сухих електродів і, для більших товщин, попереднього підігріву. Сталь чутливіша до водню та до різких теплових циклів, особливо при ручному дуговому зварюванні.

У практиці виготовлення теплоаккумуляторів і посудин під тиском це часто приводить до комбінованих рішень: обичайка з P235GH, днище з P265GH, тоді як використання 20K потребує підвищеного технологічного контролю зварних з'єднань.

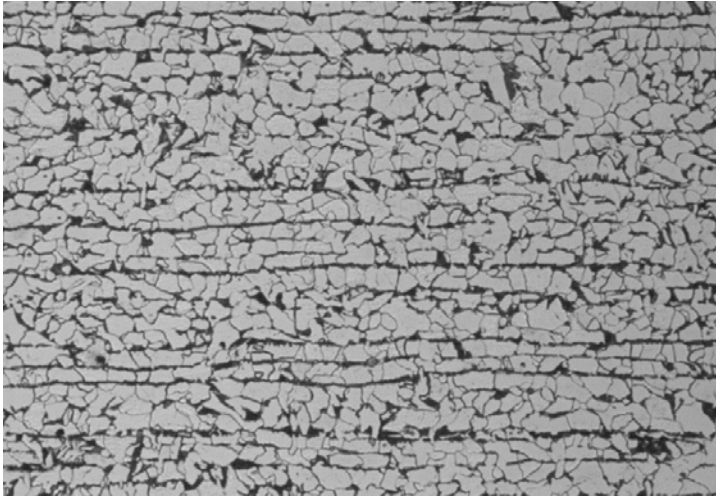


Рисунок 1.2 – Вихідна мікроструктура сталі P265GH, [8]



Рисунок 1.3 – Вихідна мікроструктура сталі P235GH, [9]

Сталь P265GH у вихідному стані має феритно-перлітну структуру, проте з більшою часткою перліту порівняно з P235GH, рис. 1.2. Феритні зерна дещо дрібніші, перлітні колонії щільніші та чіткіше окреслені. Мікроструктура залишається рівноважною, без деформаційної текстури, але вже спостерігається більша щільність меж зерен. Це відображає вищу міцність і твердість за збереження достатньої пластичності для холодного формування.

У постачальному стані сталь P235GH має класичну феритно-перлітну мікроструктуру з вираженим переважанням фериту, рис.1.3. Перліт присутній у вигляді дрібних колоній, рівномірно розподілених у феритній матриці. Зерна фериту, як правило, відносно крупні, що зумовлено низьким вмістом вуглецю та орієнтацією

сталі на пластичність і стабільну зварюваність. Текстура зерен ізотропна, залишкові деформації мінімальні. Така структура забезпечує добру формоздатність, але обмежує рівень міцності.

Після обробки тиском мікроструктура P265GH істотно змінюється залежно від режиму формування. При холодному деформуванні феритні та перлітні зерна стають витягнутими у напрямку деформації, формується деформаційна текстура. Зростає щільність дислокацій у фериті, перлітні колонії частково спотворюються. Це призводить до наклепу: підвищення межі текучості та твердості при одночасному зниженні запасу пластичності. Мікроструктура стає анізотропною, що важливо враховувати для днищ, які працюють під циклічним тиском. При гарячому формуванні або формуванні з подальшою нормалізацією відбувається рекристалізація. Феритні зерна знову стають рівновісними та дрібнішими, перліт розподіляється більш рівномірно. Така структура близька до рівноважної, з мінімальними залишковими напруженнями, що є оптимальним для посудин під тиском.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад котельних сталей, мас.%, [5-7]

Сталь	Стандарт	C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Al (min)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)
20К	ГОСТ 5520 - 1050	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,035	0,035	—	0,25	0,30	0,30
P235GH	EN 10028-2	≤0,16	≤0,35	0,60–1,20	0,025	0,015	≥0,02	≤0,3	≤0,3	≤0,3
P265GH	EN 10028-2	≤0,20	≤0,4	0,80–1,40	0,025	0,015	≥0,02	≤0,3	≤0,3	≤0,3

За оцінкою зварюваності за еквівалентом вуглецю CEV, від Міжн-ого інст. зварювання [9], виконаною для максимальних допустимих значень хімічного складу, котельні сталі P235GH, P265GH та 20К демонструють помітні відмінності.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}. \quad (1.1)$$

Для сталі P235GH максимальне значення CEV становить приблизно 0,41, що відповідає добрій зварюваності й, у більшості випадків, не потребує попереднього підігріву при зварюванні типових товщин. Сталь P265GH має дещо вищий еквівалент вуглецю - близько 0,43, що зберігає її в зоні доброї зварюваності, але робить більш чутливою до тепловкладення та може вимагати підігріву при зварюванні товстостінних елементів. Для сталі 20K максимальний CEV досягає 0,49, що відповідає граничному рівню зварюваності для низьковуглецевих сталей і зумовлює підвищені вимоги до технології зварювання, контролю водню та режимів охолодження.

Таким чином, навіть за найгіршого допустимого хімічного складу P235GH і P265GH мають кращі умови зварювання, ніж 20K, що дозволяє рекомендувати їх вибір для стратифікаційних ємностей сучасних геліосистем.

1.3 Технічні умови на виготовлення стратифікаційної ємності

Стратифікаційна ємність класифікується як зварна посудина під тиском тривалої дії, призначена для роботи у складі теплотехнічних установок з контрольованими температурними та тисковими режимами. Проєктування, виготовлення та контроль виконуються відповідно до вимог Директиви 2014/68/EU (PED) із застосуванням гармонізованих стандартів EN 13445-3 «Design» (ДСТУ EN 13445-3:2022) та EN 13445-4 «Fabrication», що регламентують розрахунок міцності, конструктивні рішення та технологію виробництва. Вимоги EN 13445 та Директиви 2014/68/EU функціонально відповідають європейській системі регулювання безпеки посудин під тиском і не є прямими аналогами українських ДНАОП 000 – 1.08 – 94: “Правила, пристрої та умови безпечної експлуатації водонагрівних котлів” та “Правила пристроїв та безпечної експлуатації посудин, які працюють під тиском”, але охоплюють ті самі базові принципи забезпечення міцності та безпеки конструкцій. ці стандарти не є тотожними. Вони частково перекривають одні й ті самі аспекти безпеки, але належать до різних регуляторних систем і мають іншу логіку застосування.

Європейські стандарти EN 13445 -3, -4 разом із Директивою 2014/68/EU і українські нормативи ДНАОП регулюють одну сферу — безпечну роботу обладнання під тиском, але не є взаємозамінними й не є еквівалентними документами.

Українські ДНАОП належать до національної системи охорони праці пострадянського типу. Вони поєднують у одному документі вимоги до проєктування, виготовлення, монтажу, експлуатації, ремонту, нагляду та відповідальності персоналу. Їхня логіка — адміністративно-технічна: хто відповідає, як допускати до експлуатації, як проводити нагляд і які заборони діють.

Директива PED 2014/68/EU є законодавчим актом, що встановлює суттєві вимоги безпеки (Essential Safety Requirements), але не містить технічних деталей. Технічна реалізація цих вимог винесена у гармонізовані стандарти, зокрема EN 13445: EN 13445-3 регламентує розрахунок і проєктування; EN 13445-4 - виготовлення, зварювання, контроль, випробування.

Матеріали корпусу та днищ повинні відповідати вимогам EN 10028 (Flat products made of steels for pressure purposes) та забезпечувати стабільні механічні властивості при робочому тиску до 3 бар і температурах, характерних для теплових насосів і сонячних теплових систем. При виборі сталі враховують її зварюваність, опір корозії у водних теплоносіях, придатність до холодного формування та довготривалу експлуатаційну надійність. Конструктивні та матеріальні рішення приймаються з урахуванням циклічності навантажень, можливих залишкових напружень після формоутворення та зварювання, а також вимог до ремонтпридатності виробу.

Зварні з'єднання проєктуються та виконуються за принципом рівномірності відповідно до EN 13445-3. Усі шви мають забезпечувати повне проплавлення по всій товщині з'єднаних елементів. Прихватки виконують з використанням тих самих зварювальних матеріалів і режимів, що й основні шви. Зварювання дозволяється проводити лише в умовах виробничого приміщення з контрольованими кліматичними параметрами, що виключають вплив низьких температур, вологи та конденсату на зону зварювання.

Технологічний процес виготовлення регламентується EN 13445-4 і спрямований на обмеження утворення дефектів зварювання та несприятливих структур у зоні термічного впливу. Підготовка кромки здійснюється механічним способом із забезпеченням заданої геометрії, точності зазорів і чистоти поверхонь. Наявність окалини, мастил, фарб, корозійних продуктів або вологи на кромках не допускається. Складальні операції рекомендується виконувати у фіксуєчих пристосуваннях, що забезпечують збереження геометрії до завершення основних зварювальних робіт.

Розташування зварних з'єднань визначається з урахуванням доступності для зварювання, неруйнівного контролю, можливого післязварювального оброблення, монтажу та подальшого технічного обслуговування. При вхідному контролі матеріалів перевіряють відповідність сертифікатів вимогам стандартів, а також граничний вміст елементів, що впливають на схильність до утворення загартованих структур і холодних тріщин.

З метою обмеження водневого впливу застосовують попередню підготовку зварювальних матеріалів відповідно до рекомендацій виробника, забезпечують сухість і чистоту зони зварювання, а захисні гази подають з контролем вологості та складу. Режим зварювання обирають таким чином, щоб знизити ризик пористості, непроварів і тріщин у шві та пришовній зоні.

Контроль геометрії та розмірів проводять на всіх стадіях виготовлення. Допуски на овальність циліндричних обичайок, відхилення форми та геометрію еліптичних днищ приймають відповідно до EN 13445-4. Після завершення зварювання поверхню швів обробляють до плавного переходу з основним металом без утворення концентраторів напружень, після чого виконують підготовку під нанесення захисних покриттів згідно з робочою документацією.

Оцінювання якості зварних з'єднань включає візуальний контроль та застосування неруйнівних методів випробувань відповідно до EN ISO 17635 (Non-destructive testing of welds), ДСТУ EN ISO 17635:2018. Готову стратифікаційну ємність піддають гідравлічному випробуванню на міцність і герметичність у межах, встановлених EN 13445, з фіксацією результатів у технічній документації.

Контроль геометричних параметрів елементів конструкції здійснюють не епізодично, а системно — на кожному етапі виготовлення, починаючи з формування заготовок і закінчуючи остаточним складанням. Така організація контролю дає змогу запобігти накопиченню відхилень і забезпечити відповідність фактичних розмірів обичайок установленим граничним допускам за формою та лінійними параметрами відповідно до вимог ДСТУ 24.03039-80. Для циліндричних обичайок з номінальним розміром до 1000 мм допустиме відхилення лінійних розмірів не повинно перевищувати ± 5 мм.

Геометричні параметри еліптичних днищ контролюють окремо з урахуванням їх просторової форми. Відхилення основних розмірів таких днищ обмежуються значенням 1,25 % від номінального внутрішнього діаметра посудини, що дозволяє зберегти розрахунковий розподіл напружень у зоні переходу до корпусу. Овальність циліндричної обичайки після формування та зварювання не повинна перевищувати 1 % від її діаметра.

Після завершення зварювальних робіт усі зварні шви підлягають механічному зачищенню до рівня основної поверхні з допустимим відхиленням не більше 0,05 мм, з метою усунення локальних концентраторів напружень і підготовки поверхні до подальших операцій. Нанесення захисних і експлуатаційних покриттів на поверхню виробу виконують відповідно до вимог робочої конструкторської документації та креслень.

1.4 Аналіз базового техпроцесу виготовлення стратифікаційної ємності

Стратифікаційна ємність дл геліоколекторів є циліндричною закритою посудиною тонколистового класу з товщиною металу до 6 мм. Для даних виробів використовується в цілому стандартна технологія виготовлення обичайки та приварювання днищ.

Обичайка формується на вальцах, рис. 1.4, вальцювальної машини. Вирізаний лист металу на різакі встановлюють у машину та приводять в рух центральний

нижній валець. На верхньому вальці регулюють величину прогинання листа, а бічні вальцями рівномірно регулюють ступінь прогину. Для зменшення напружень у сформованому згині металі, операцію вальцювання проводять декілька разів.

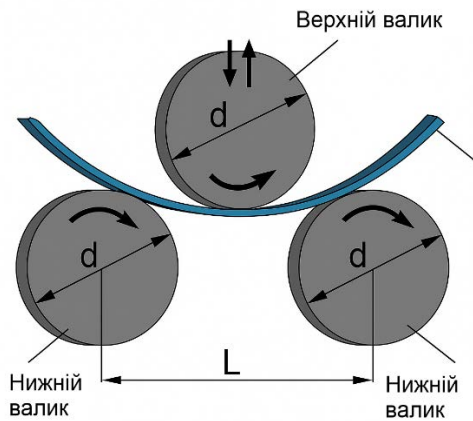


Рисунок 1.4 - Формування обичайки на вальцях

Недоліком базового технологічного процесу є значна кількість ручної немеханізованої праці. У базовому технологічному процесі використовується затискна струбцина, що допомагає вирівняти кромки та стягнути у певному положенні. Починають від центру і до країв, використовуючи точки – прихватки з кроком біля 200 мм. При цьому постійно проводять контроль симетрії, зазорів та геометрії.

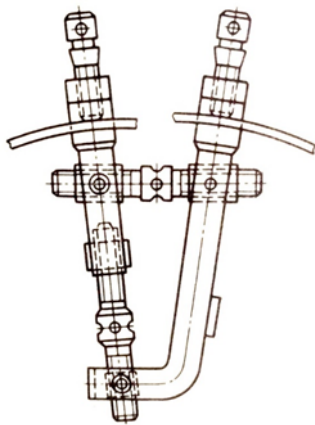


Рисунок 1.5 – Гвинтова струбцина для вирівнювання кромки обичайки.



Рисунок 1.6 – Стикове кільцеве з'єднання обичайки

У базовому технологічному процесі для з'єднання обичайки та днищ використовують стикове кільцеве зварне з'єднання, рис. 1.6. При цьому беруть до уваги, що використовуються холоднокатані

днища. Обичайка використовується такого ж діаметру, що і днище. Для виготовлення обичайки використовується поздовжній зварний шов без розробки кромки. Проте недоліком ручної технології є нерівномірне нагрівання, викривлення та овальність обичайки. Тому додатково використовують обкатування вальцями для відновлення геометрії циліндричної посудини.

У існуючому варіанті використовується напівавтоматичне зварювання у активному CO_2 середовищі. Недоліком даного способу є необхідність зачищення кромки від значного розбризкування зварювального дроту. При цьому важко забезпечити високу проуктивність та безпеку праці монтажників та зварників через значну кількість робіт із виправлення дефектів.

У базовому технологічному процесі для дрібносерійного виготовлення подібних посудин не проводяться операція розконсервації металу заготовок та лист, що збільшує імовірність виникнення дефектів при зварюванні, конструкція стикового з'єднання обичайки та днища є нетехнологічною для масового виробництва, значною є частка внутріцехових переміщень габаритних деталей. Для високоефективного сучасного виробництва доцільно використовувати вищий рівень автоматизації базових процесів підготовки кромки, зварювання та монтажу. Кращим вибором є автоматизовані установки одного місця монтажу та зварювання у суміші активного та інертного газу з використанням імпульсних джерел живлення, що дозволить значно підвищити якість виробів. Потребує також уваги підбір спеціалізованих пальників для автоматичних установок зварювання для якісного, стабільного та повторюваного захисту зварної ванни при використанні імпульсних джерел живлення, а також наукове дослідження прогнозування структур та механічних властивостей зварного шва при уточнених режимах зварювання у сумішах газів.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Підготовка заготовок під зварювання

Підготовка заготовок та поверхонь під проведення зварювання прописана різними нормативними актами, зокрема: настановою щодо монтажу та зварювання посудин, що працюють під тиском, при будівництві будівель та споруд, технічним регламентом простих посудин високого тиску, правилами будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском та іншими.

Головним чином практично усі дані нормативні документи відзначають у вимогах щодо підготовки поверхонь та кромок: очищення від перше - окалини, друге - іржі, третє мастил. Зазначається також про необхідність обов'язкової механічної обробки після термічного різання, чи газополуменевим способом, чи кисневим різком чи лазером. Деколи у нормативних документах просто дають настанову очистити поверхню від забруднень.

Проте підготовка прокату чи готових металовиробів до використання у технологічному процесі передбачає як правило їх розконсервацію після транспортування. Рівень «загального зберігання пакування_транспортування_приймання» металопродукції регламентує ДСТУ 9129:2021 «Металопродукція. Правила приймання, маркування, пакування, транспортування та зберігання». Стандарти працюють для «виготовлення з нуля», а не для зберігання заготовок тривалий час. Для багатьох тех процесів це стало проблемою з погіршення якості, оскільки отримувач продукції не знає, чим був оброблений прокат.

Тому на практиці — «консервація / розконсервація» часто покладається або на «технічні умови постачальника», або на внутрішні технологічні регламенти підприємства, або на загальні правила зберігання та на загальну практику очищення перед зварюванням (механічна обробка, змив мастил, знежирення, очищення від окалини тощо).

Проте, консервація/розконсервація заготовок (листи, штамповані днища, обичайки) в частині вимог до стану металу перед зварюванням регламентується ДСТУ-Н Б А.3.1-32:2015 «Настанова_щодо_монтажу_та_зварювання_посудин, що

працюють_під_тиском, при_будівництві_будівель_та_споруд», [9]. розділах про підготовку до монтажу та зварювання там якраз і прописано, що заготовки після зберігання / консервації мають бути розконсервовані перед зварюванням, з поверхонь в зоні майбутнього шва треба повністю видалити консерваційні покриття (мастила, плівки, ґрунти, продукти корозії тощо), після розконсервації проводиться очищення й підготовка кромок під зварювання згідно з вимогами цього ж стандарту та ПТД підприємства.

Розконсервація — це обов’язковий етап технологічного циклу, і він не має «окремого стандарту», бо він уже інтегрований у Настанову про монтаж і зварювання. Під цей пункт підпадає будь-яка заготовка, яка: постачалась законсервованою (мастила, ВП-1, І-20А, технічні парафіни, полімерні плівки); зберігалась у складі/на відкритому майданчику; має окалину після гарячого прокату; має іржу чи вологу. Цей пункт поширюється на листи, штаповані днища, обичайки, незалежно від того, що в тексті згадані "труби та деталі". У Настановах такого типу згадування труб є типовим, бо більшість посудин складається з обичайок і штуцерів, але вимога однакова для всіх заготовок. Після розконсервації обов’язково виконується підготовка кромок під зварювання, згідно з розділами 7.1.2–7.1.5 Настанови, а саме механічне зачищення, знежирення, видалення окалини, контроль стану поверхні, вимоги до чистоти перед збиранням.

З Настанови у внутрішні технологічні регламенти можна зазначити розконсервацію як: первинне очищення, механічне доведення кромок, знежирення, візуальний контроль, вимоги до ширини зони очищення, заборонені дефекти, порядок усунення дефектів. Тому до переліку забруднень, що видаляються з заготовок можна дописати видалення консерваційних матеріалів, також додати способи їх видалення. За логікою технології розконсервація майже повністю відповідає першій фазі підготовки поверхні під фарбування (знежирення, очищення, сушіння, видалення корозії). Тоді до даної первинної технооперації додається також витримка в сухому приміщенні, видалення вологи, висушування, знежирення, пилевидалення (при потребі). Технологічна карта розконсервацій подана у Додатку А.

Проте гарячештамповані металеві заготовки днищ мають інший характер забруднення, ніж листовий прокат або холодногнуті елементи. Після деформації при 900–1200 °С на поверхні лишаються: пригорілі мастила та плівки мастильно-графітових складів; продукти термічного розкладу масел (коксоподібний вуглець); окалина з щільним сцепленням з металом; локальні «запекти» полімерних антифрикційних покриттів; залишки оксидів, які утворилися під дією високої температури й тиску. Після штампування деталі мають високе дифузійне водненасичення поверхні. Порівняно з листовим прокатом, окалина після гарячого штампування: товстіша; сильно приварена до металу; має вищу твердість; містить $\text{FeO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ у різних комбінаціях. Пригорілі мастила утворюють “композитний шар” з окалиною: (окалина) + (карбонізоване мастило) + (частинки графіту).

Розконсервація гарячештампованих металевих заготовок має спеціальний режим, відмінний від розконсервації листового прокату. Технологічно вона включає лужне/емульсійне розм'якшення пригорілих мастил, інтенсивну механічну очистку окалини, промивання гарячою водою та сушіння.

Слід зазначити, що розконсервація гарячештампованих металевих заготовок під зварювання проводиться не повністю, а лише 15–25 мм від кромки під зварювання. На практиці, наприклад у Німеччині, згідно рекомендацій DVS (Німецька асоціація зварювання), проводять наступні роботи: знежирення (розчинник або лужний мийний засіб), видалення окалини (найчастіше — дробеструм до рівня чистоти поверхні Sa 2–2½), повне висушування після будь-яких вологих процедур, перевірку чистоти та сухості.

Під час піскоструминної та дробоструминної підготовки кромки перед зварюванням використовують кварцовий пісок, купершлак, корунд або сталеву дріб типорозмірів S230–S330. Обробку ведуть під робочим тиском у межах 0,5–0,7 МПа для піскоструму та 0,6–0,8 МПа для дробоструминних установок, забезпечуючи швидкість абразивного потоку орієнтовно 60–90 м/с для піску і 55–75 м/с для сталевої дріб. Струмінь подають під кутом 70–90° з відстані 150–300 мм, найчастіше близько 200 мм, щоб гарантовано знімати окалину й іржу без утворення локальних

вибоїн. Тривалість обробки не задається фіксованим часом — зазвичай це 5–20 секунд на ділянку шириною 20–30 мм — і визначається моментом, коли поверхня досягає необхідної якості очищення відповідно до ступеня Sa 2 або Sa 2½.

Після обробки якість поверхні перевіряють візуально за еталонами ISO 8501-1: для Sa 2 допускаються легкі залишкові тіні, а для Sa 2½ поверхня повинна бути повністю чистою та однорідною. За потреби контролюють шорсткість за ISO 8503, орієнтуючись на типову величину профілю Rz у межах 30–75 мкм. Також перевіряють чистоту від розчинних солей згідно з ISO 8502-6/9 та відсутність вологи відповідно до ISO 8502-4, особливо коли очищення виконували після мокрих технологічних операцій. Кромку допускають до подальшої підготовки лише після підтвердження, що поверхня є сухою, рівномірно матовою, без пилу, мастильних залишків та продуктів корозії, а зварювання бажано виконати протягом найближчих 2–4 годин, щоб уникнути повторного окиснення.

Підготовка поверхні під зварювання є критично важливим етапом, який безпосередньо впливає на формування зварного шва, його структурну однорідність та довговічність конструкції. Однією з ключових операцій цього процесу є розконсервація — видалення консерваційних мастил, продуктів окиснення, вологи, забруднень та технологічних залишків, що накопичилися під час транспортування, зберігання або формоутворення деталі. Саме розконсервація створює умови для подальшої ефективної підготовки крайки, оскільки дає змогу усунути ті шари та плівки, які не можна зняти простим шліфуванням і які здатні спричинити пористість, включення або нестабільне проплавлення. Лише після повного очищення й висушування поверхні здійснюють механічну зачистку до металевго блиску, видаляючи окалину, іржу, локальні дефекти та всі залишки, що перешкоджають якісному зварюванню. Така послідовність — спочатку розконсервація, а потім абразивна обробка — забезпечує чисту, однорідну й суху металеву поверхню, оптимальну для формування бездефектного зварного шва.

2.2 Вибір способу та матеріалів для зварювання

Висока технологічну зварюваність та стабільність формування шва забезпечується використанням високого рівня автоматизації зварювальних процесів з доброю повторюваністю. Механічні властивості з'єднання значною мірою залежать від вмісту вуглецю в металі, характеристик дроту та параметрів тепловкладення. Правильно підібрані режими, зокрема співвідношення компонентів захисної суміші, дозволяють зменшити ризик пороутворення та утворення бризок, забезпечити металургійну чистоту наплавленого металу й контрольований характер охолодження. При виборі способу автоматичного зварювання ключовим критерієм є отримання шва з механічними властивостями, рівними або близькими до властивостей основного металу, та недопущення дефектів у шві та зоні термічного впливу, що і визначає надійність конструкції.

У виробках зі сталі P265GH товщиною близько 4 мм при зварюванні важливо запобігти кристалізаційним тріщинам, що можуть виникати внаслідок нерівномірного охолодження та невдалої форми проплавлення, особливо в зоні кореня одностороннього шва з повним проваром. Для з'єднання таких деталей застосовують різні способи: ручне дугове зварювання покритими електродами для прихоплювань, автоматичне зварювання під флюсом або напівавтоматичне зварювання суцільним дротом у середовищі активних чи змішаних захисних газів. Вибір конкретного способу визначається вимогами до продуктивності, тепловкладення, а також необхідністю отримання рівномірного і щільного шва без внутрішніх дефектів.

У зварному виробництві посудин і апаратів зі сталі P265GH, що працюють під тиском, застосовують декілька дугових процесів, кожен з яких має свої переваги та технологічні обмеження. Ручне дугове зварювання покритими електродами дає можливість точно керувати тепловкладенням та виконувати шви у складних положеннях, але характеризується низькою продуктивністю. Зварювання під флюсом забезпечує надійний захист зварювальної ванни та глибоке проплавлення, проте обмежується нижнім положенням та потребує спеціальної оснастки. Напіва-

втоматичне MAG-зварювання у газовому середовищі вуглекисного газу має перевагу у продуктивності й універсальності, однак є чутливим до складу газової суміші та параметрів режиму, що може спричинювати підвищене розбризкування.

Покращення стабільності дуги, перенесення металу та формування шва можливе через оптимізацію складу захисного середовища. З урахуванням вимог до рівномірності та щільності з'єднань у баку-акумуляторів геліосистеми для кільцевих та поздовжніх зварних швів доцільно рекомендувати автоматичне дугове зварювання у суміші аргону з додаванням близько 18% CO_2 . Такий склад газу знижує схильність до бризоутворення, підвищує глибину проплавлення та забезпечує кращу металургійну якість шва порівняно зі зварюванням у чистому CO_2 . Прихоплення та короткі шви можуть бути зварені ручним дуговим способом.

При виборі газового середовища для дугового зварювання сталей P235GH і P265GH важливо забезпечити стабільність перенесення електродного металу, контрольоване проплавлення і мінімізацію дефектності шва. Зварювання у чистому CO_2 дає високу теплову потужність дуги та глибоке проплавлення, проте супроводжується інтенсивним розбризкуванням, вигоранням легуючих елементів і ризиком пор за рахунок накопичення водню у ванні. Використання чистого аргону навпаки забезпечує м'яку і стабільну дугу, низький рівень бризок і мінімальне тепловкладення, однак через недостатню активність газу існує небезпека непровару та підрізів, що є критичним для посудин під тиском, [11, 13, 17].

Додавання кисню в концентраціях понад 1–2% до аргону або його сумішей сприяє покращенню формування валика, стабілізує крапельне перенесення, однак водночас підсилює окиснення фронту ванни й збільшує ймовірність включень оксидів та зниження ударної в'язкості, [17]. Суміші аргону з низьким вмістом CO_2 (8–12%) дійсно знижують бризоутворення та вигорання розкислювачів, проте для товщин порядку 4 мм їхня активність може бути недостатньою у режимах підвищеної швидкості, що створює ризик неповного проплавлення кореня шва або утворення підрізів за недостатнього тепловкладення.

З урахуванням цих факторів оптимальним компромісом між активністю і стабільністю дуги для сталей P235GH і P265GH є захисна атмосфера $\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$.

Аргон забезпечує плавність дуги та контроль перенесення, тоді як 18% CO₂ створює необхідну окиснювальну здатність для глибокого проплавлення та рафінування металу ванни без надмірного розбризкування, характерного для чистого CO₂. Для такої суміші доцільно застосовувати зварювальний дріт Св-08Г2С (за ГОСТ 2246-70 / ДСТУ), [14], або аналог ЄС марки SG2 / G3Si1 (EN ISO 14341-A), [15], вміст Si та Mn у якому компенсує окиснювальні процеси в дузі та зменшує ризик пористості у зварному металі. У таблицях 2.1-2.2 наведено порівняння марок.

Таблиця 2.1 Хімічний склад зварювальних дротів Св-08Г2С та SG2/G3Si1

Показник	Св-08Г2С (ГОСТ/ДСТУ)	SG2 / G3Si1 (EN ISO 14341-A)
Вуглець С, %	0.06–0.10	0.06–0.10
Марганець Mn, %	1.40–1.80	1.40–1.85
Кремній Si, %	0.70–1.00	0.80–1.15
Сірка S, % ≤	0.025	0.025
Фосфор Р, % ≤	0.030	0.030
Cu, %	до 0.30	до 0.50
Покриття	оміднений	оміднений

Таблиця 2.2 Склад наплавленого металу зварювальними дротами Св-08Г2С та SG2/G3Si1, [15, 16]

Елемент	Св-08Г2С наплавлений метал	SG2/G3Si1 наплавлений метал
С, %	0.07–0.09	0.07
Mn, %	1.20–1.60	1.45
Si, %	0.55–0.80	0.9
Оксиди Mn–Si	помірні	незначні
Вміст водню, мл/100г	4–6	3–5

У складі наплавленого металу SG2/G3Si1 зазвичай має дещо вищий рівень Si, що покращує розкислення ванни, формування валика і знижує пористість, особливо в сумішах Ar+CO₂. Св-08Г2С може давати більші коливання складу наплавленого металу залежно від виробника, але загалом є повним функціональним еквівалентом.

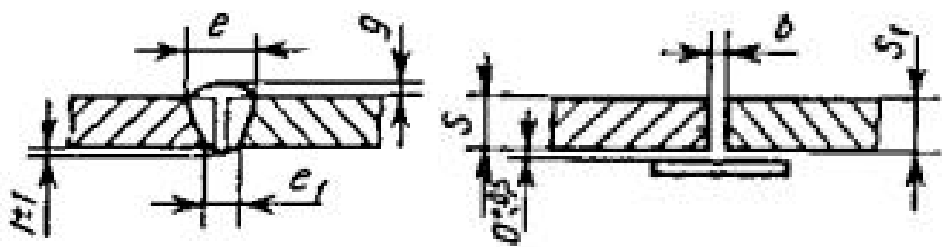
2.3 Розрахунок режимів зварювання

Серед параметрів режимів механізованого зварювання в захисних активних та інертних газах виділяють силу зварювального струму $I_{зв}$; допустиму густину струму в електроді j , напругу на дузі $U_{зв}$, швидкість зварювання $V_{зв}$, вид струму та його полярність. Також виділимо інші параметри які використовуються в розрахунку режимів зварювання: діаметр електродного дроту d_d ; глибину провару h ; виліт електродного дроту $L_{ел.др.}$; катет шва $K_{ш}$; витрати захисного газу $q_{з.г.}$; швидкість подачі для зварювального дроту $V_{пр}$; K_h – коефіцієнт пропорційності відносно умов зварювання, A – коефіцієнт геометричної подібності, погонна енергія $q_{п.}$, k' – коефіцієнт для розрахунку коефіцієнта форми проварювання $\psi_{пр}$.

Розрахунок проводимо за методикою та довідковими даними підручника «Технологія та обладнання зварювання плавленням» автора Акулова А.І., [17].

Для зварювання поздовжнього зварного шва обичайки стратифікаційної ємності приймаємо стандартне стикове одностороннє зварне з'єднання типу С4, виконане на знімній мідній підкладці без скосу кромки за ДСТУ EN ISO 9692-1:2015, товщиною 4 мм (рисунок 2.1).

Приводимо розрахункові режими зварювання з'єднання С4 поздовжнього зварного шва обичайки. Проплавлення відбувається на глибину $H = 4$ мм, зварювання проводиться на знімній мідній підкладці.



b (зазор у стикі): номінал 0, допускається до +2,0 мм (тобто фактично 0...2 мм)

e (ширина підсилення шва зверху), не більше: 12,0 мм; e_1 (ширина підсилення/валика з боку кореня): 6,0 мм; g (висота підсилення шва зверху): 1,5 мм; g_1 (висота підсилення з боку кореня): 0,5 мм, допуск $\pm 0,5$ мм.

Рисунок 2.1 – Конструктивні розміри шва С4

$$I_{ce} = \frac{H}{Kh} \cdot 100,$$

$Kh = 1,75$ для середовища вуглекислого газу

$$I_{ce} = \frac{4}{2,1} \cdot 100 = 190 \text{ (A)}$$

$$d_{\varphi} = 1,13 \sqrt{\frac{I_{ce}}{j}},$$

Приймаємо $j = 170 \text{ А/мм}^2$.

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{190}{170}} = 1,19 \text{ мм} \approx 1,2 \text{ мм}$$

$$V_{ce} = \frac{A}{I_{ce}}, \text{ де } A, \text{ м/год для зварного дроту } 1,2 \text{ мм}$$

$$A = (2 \div 5) 10^3 \text{ А} \cdot \text{м/год}$$

$$V_{ce} = \frac{3,7 \cdot 10^3}{190} = 19,5 \text{ м/год} = 0,54 \text{ см/с};$$

$$U_{\partial} = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_{\varphi}^{0,5}} \cdot I_{ce} \pm 1 \text{ (В)}$$

$$U_{\partial} = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{1,2^{0,5}} \cdot 190 \pm 1 = 27 \text{ (В)}$$

$$q_n = \frac{0,24 \cdot I_{ce} \cdot U_{\partial} \cdot \eta}{V_{ce}} = \frac{0,24 \cdot 190 \cdot 27 \cdot 0,8}{0,54} = 1824 \text{ (Дж/с)}$$

$$\psi_{np} = k'(19 - 0,01 I_{ce}) \frac{d_{\varphi} \cdot U_{\partial}}{I_{ce}},$$

$$k' = 0,367 \cdot j^{0,1925} = 0,367 \cdot 170^{0,1925} = 0,98$$

$$\psi_{np} = 0,98 \cdot (19 - 0,01 \cdot 190) \frac{1,2 \cdot 27}{190} = 2,86$$

$$H = 0,0165 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{np}}} = 0,0165 \sqrt{\frac{1824}{2,86}} = 0,42 \text{ (см)} \text{ для швидкості зварювання } 19,5 \text{ м/год}$$

$$F_{np} = \frac{\pi \cdot \psi \cdot H^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,86 \cdot 0,4^2}{4} = 0,36 \text{ (см}^2\text{)}$$

Повне проварювання як бачимо можливе у межах швидкості зварювання 19,5 м/год. При зварюванні кільцевих швів обичайки та днищ використовується з'єднання внахлест, тому для уникнення перепалу при даній силі струму корегують швидкість зварювання у приведеному розрахованому діапазоні.

У розрахунках використано експериментальні коефіцієнти для зварювання у вуглекислому газі. На практиці застосування суміші газів $Ar+18\%CO_2$ дещо змінює проплавлення. у CO_2 : ванна вужча, глибша, площа F трохи більша за рахунок глибини; у $Ar+18\%CO_2$: ванна ширша, трохи мілкіша, корінь формується стабільніше, менше ризиків припалу.

Згідно з експериментальними даними, [18, 19], застосування захисної газової суміші $Ar + 18\% CO_2$ при дуговому зварюванні маловуглецевої сталі призводить до формування більш стабільного, ширшого зварного шва з дещо меншою максимальною глибиною проплавлення порівняно з чистим CO_2 , при цьому загальна площа зони плавлення залишається близькою або дещо меншою, рис.2.2.

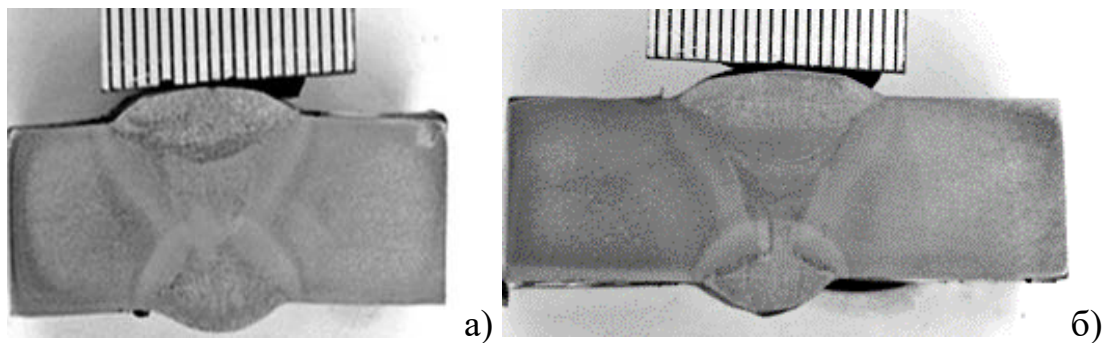


Рисунок 2.2 – Зразки зварних швів із низьковуглецевої сталі S235J2G3 з вмістом $C (\approx 0,17\%)$ виготовлені у чистому CO_2 (а) та у суміші $Ar+18\%CO_2$ (б), [19]

2.4 Вибір устаткування для складально-зварювальних операцій

Складально-зварювальні операції містять значну частину використання ручної праці при виготовленні корпусу циліндричної ємності. Стандарт визначає нульовий зазор при зварюванні поздовжнього стика. Тому підготовка листа та його кромки на лазерному верстаті є важливою задачею, оскільки можна у такому випадку дати не просто рівні кромки, а нанести зубці у місцях прихваток. Для даної те-

хнології підготовки листів необхідно використовувати лазерні верстати з ЧПК з робочим полем 2х6 м, наприклад LTC-Pro українського виробника, рис. 2.3, [22]. Зубці можуть мати глибину біля 0,5-1 мм. Зубці звичайно будуть переплавлені у ході зварювання, проте така операція повинна бути ретельно перевірена якщо це відповідальна конструкція і вимагає просвічування швів у Х-променях. Якісна підготовка кромки для зварювання на лазерному верстаті дозволяє уникнути операції термічного різання або обточування кромки обичайки та значно зменшує ручну працю.

Стягування відбувається за допомогою гідравлічних механізованих центраторів та стягувачів на установці складання обичайки, рис.2.4, яка складається з порталної рами та роликів опор. До даної установки яка містить роликові опори додається ще стенд для складання обичайки з днищами, рис.2.5.

Задача складання спрощується, оскільки днища мають «юбку» яка сформована з двох скосів. Такі днища виготовлені за стандартом DIN 28013 з вставним стиком під зовнішнє MAG зварювання, позначеним як профільована пряма відбортовка (beaded straight flange) з подвійним скосом ($45^\circ + 15^\circ$) і короткою юбкою 10 мм. Посадковий діаметр дорівнює мінус двом товщинам та 1 мм. Важливим розмірним елементом обичайки є контроль її овальності, адже зазор для з'єднання внапусток має бути не більше 1 мм.

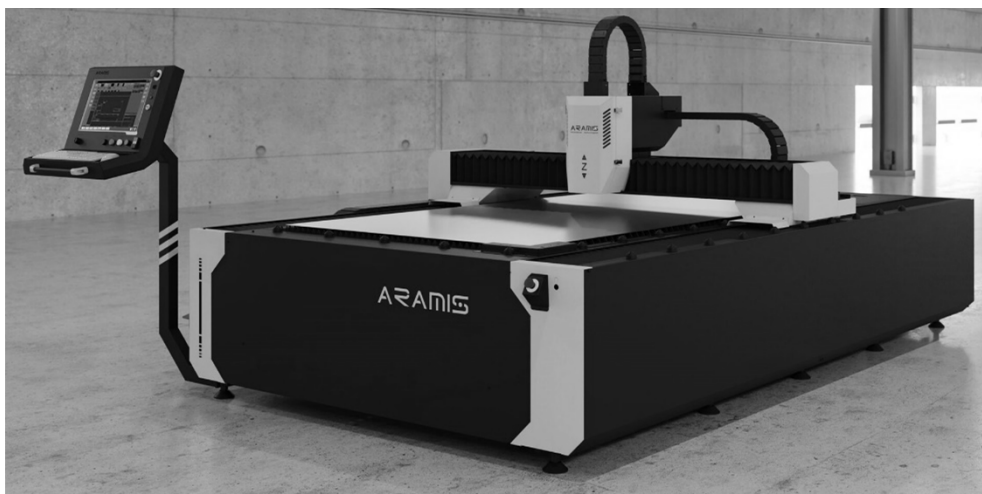
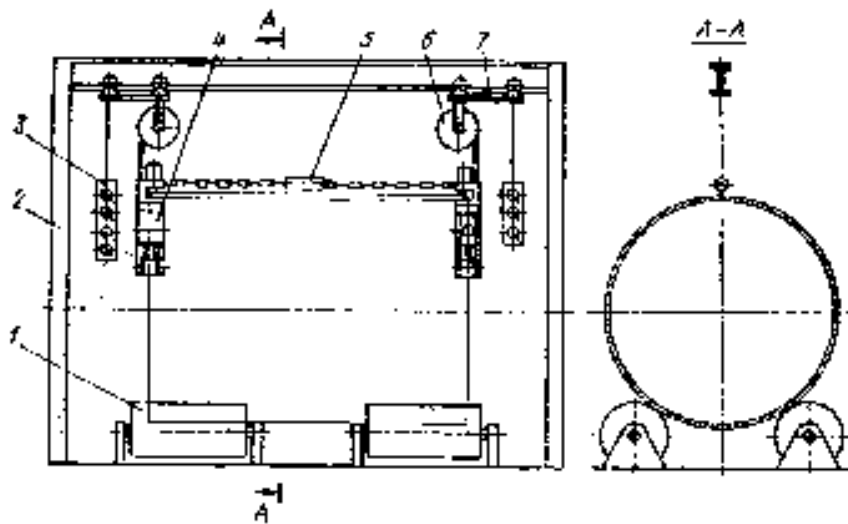


Рисунок 2.3 – Лазерний верстат LTC-Pro, [22]

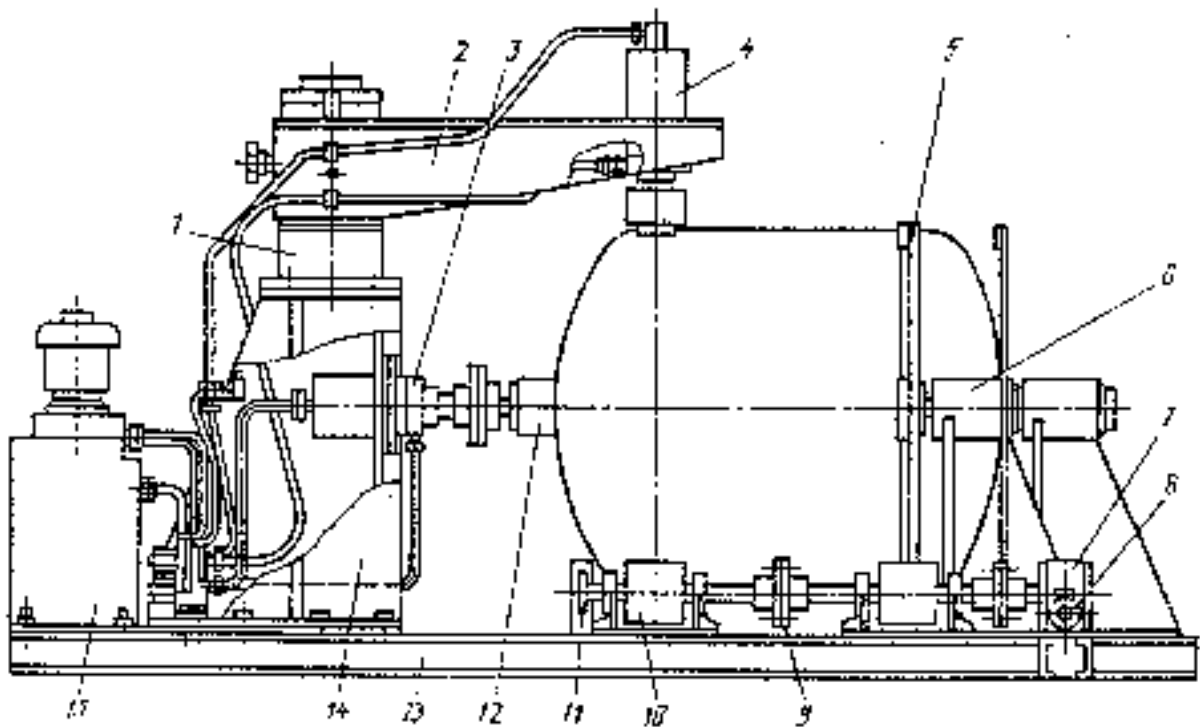


1 – роликова опора; 2 – портална рама; 3 – пульт керування;
4 – гідравлічна стяжка; 5 – гідроциліндр; 6 – підвіска; 7 – візок.
Рисунок 2.4 – Установка складання обичайки

Дана задача спрощується, оскільки днища мають «юбку» яка сформована з двох скосів: перший під 45° , а другий під 15° . Такі днища виготовлені за стандартом DIN 28013 з вставним стиком під зовнішній MAG як beaded straight flange (beaded skirt) — з подвійним скосом ($45^{\circ} + 15^{\circ}$) і короткою юбкою 10 мм. Посадковий діаметр дорівнює мніс двом товщинам та 1 мм. Важливим розмірним елементом обичайки є контроль її овальності, адже зазор для з'єднання внапусток має бути не більше 1 мм. Для складання корпусів стратифікаційних ємностей використовується стенд на роликових опорах 9 та осьових упорах 3, 4 у якому обичайка збирається з днищами (рис. 2.5).

Напівавтоматичне зварювання характеризується підвищеним рівнем механізації основних технологічних операцій, до яких належать процеси запалювання та стабілізації зварювальної дуги, механізоване подавання електродного дроту, автоматичне саморегулювання параметрів горіння дуги, а також виконання операцій заварювання зварювального кратера. Застосування зварювальних автоматів забезпечує подальше розширення ступеня автоматизації, оскільки вони здійснюють кероване спрямування та переміщення дуги вздовж кромки з'єднання і зварного шва, а також дозволяють повністю автоматизувати операції початку та завершення про-

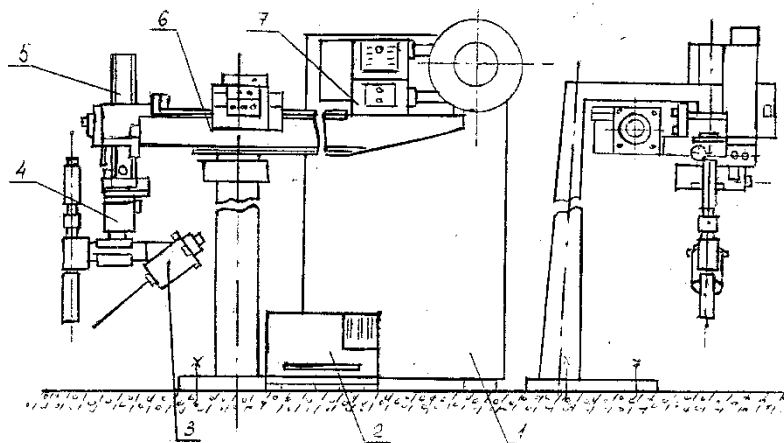
цесу зварювання. Разом з тим слід зазначити, що значна частина зварювальних автоматів, зокрема типів ТС та АДСП, конструктивно не передбачає реалізації функції коливального руху зварювального пальника з регламентованими значеннями амплітуди та частоти, що обмежує їх технологічні можливості під час формування зварних з'єднань певних типів.



- 1 – колона; 2 – поворотний хобот; 3,4 – гідроциліндри;
 5 – підтискний упор; 6 – черв'ячний редуктор; 7 – електродвигун;
 8 – муфта; 9 – роликова опора; 10 – ланцюгова передача;
 11 – опорний диск; 12 – рама; 13 – консоль; 14 – насосна установка.

Рисунок 2.5 – Стенд складально-зварювальних операцій

Установка автоматичного зварювання теплообмінників [23] має декілька важливих функцій з коливання пальником, а також має автоматичне регулювання руху вгору вниз при виникненні овальності обичайки, таблиця 3, додаток Б. Автоматичне зварювання ведеться у суміші газів. Установа має три колон, окремі приводи для зварювальних головок АД-135, випрямляч ВДУ-506 УЗ, рис.2.7. Обичайка приводиться в рух роликами.



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

Рисунок 2.6 – Автомат зварювання АД-135



Рисунок 2.7 – Зварювальний випрямляч ВДУ – 506



а)



б)

Рисунок 2.8 – Напівавтомат Fronius TransSteel 3000 C PULSE (а) та пальник MTW 400i, [24, 25]

При зварюванні вуглецевої сталі P265GH у з'єднанні внахлестку, зокрема при формуванні кільцевого шва по з'єднанню днища з обичайкою, до зварювального процесу висуваються підвищені вимоги щодо стабільності дуги, рівномірності провару та мінімізації теплового впливу на основний метал. Такі з'єднання є конструктивно відповідальними, оскільки працюють під внутрішнім тиском і піддаються дії циклічних навантажень, що вимагає забезпечення високої якості та повторюваності зварного шва по всьому периметру.

Щоб виконати зварювання днища та обичайки відповідно до розрахованих орієнтовних режимів зварювання до 300 А для напівавтоматичного зварювання використовуємо напівавтомат Fronius TransSteel 3000 C PULSE (рис. 2.8). Застосування імпульсного MIG/MAG-зварювання на апараті Fronius TransSteel 3000 C PULSE дозволяє ефективно вирішити зазначені технологічні завдання. В імпульсному режимі відбувається кероване чергування пікового та базового струмів, при якому піковий струм забезпечує формування і контрольований відрив краплі електродного металу, а базовий струм підтримує стабільне горіння дуги без надмірного тепловкладення. Такий підхід є особливо доцільним для з'єднань внахлестку, де необхідно уникнути пропалів тоншого елемента та надмірного перегріву кромок.

Для сталі P265GH імпульсний режим сприяє формуванню стабільної зварювальної ванни з достатнім проваром у зоні перекриття елементів. Завдяки зниженому середньому тепловкладенню зменшується ширина зони термічного впливу, що позитивно впливає на збереження механічних властивостей металу в околешовній зоні та знижує ризик виникнення залишкових напружень. Це має принципове значення при зварюванні днища з обичайкою, де геометрична жорсткість конструкції може сприяти накопиченню напружень і деформацій.

Імпульсний MIG/MAG-процес також забезпечує покращене формування валика шва по “юбці” днища. Керований перенос металу дозволяє отримати рівномірну ширину і висоту шва по всій довжині кільцевого з'єднання, що важливо як з точки зору міцності, так і з точки зору подальшого неруйнівного контролю. Змен-

шення кількості бризок і стабільність дуги знижують імовірність утворення поверхневих дефектів, які можуть негативно вплинути на результати візуального та капілярного контролю.

Крім того, застосування імпульсного режиму є доцільним при механізованому або автоматизованому виконанні кільцевого шва. Стабільність параметрів імпульсного процесу дозволяє підтримувати однакову якість зварювання при постійній швидкості переміщення пальника навколо обичайки, незалежно від просторового положення дуги. Це особливо важливо для з'єднання днища з обичайкою, де протягом одного обороту шов може виконуватися у різних просторових положеннях.

Дане обладнання добре підходить для виконання прихоплювання у точковому режимі з контролем пауз між імпульсами, що є важливим на етапі складання та фіксації зварних елементів. Fronius TransSteel 3000 C PULSE дозволяє задавати тривалість подачі зварювального струму та інтервали пауз, завдяки чому забезпечується формування рівномірних прихваток з повторюваною геометрією та стабільною глибиною провару. Контроль пауз сприяє зменшенню тепловкладення та частковому охолодженню металу між точками, що знижує ризик перегріву, деформацій і зміщення деталей, зокрема при складанні з'єднань внахлестку днища та обичайки. Використання такого режиму забезпечує надійну фіксацію елементів по всьому периметру конструкції та створює сприятливі умови для подальшого виконання суцільного імпульсного MIG/MAG-зварювання з високою якістю шва.

Пальник серії MTW 400i виробництва Fronius [25] було обрано з урахуванням застосування зварювального дроту діаметром 1,2 мм у діапазоні струмів приблизно 190–280 А та використання імпульсного MIG/MAG-процесу. За таких режимів теплове навантаження на контактний наконечник, газовий вузол і сопло є суттєвим, особливо при механізованому або автоматичному виконанні шва. Водохолоджувана конструкція пальника забезпечує стабільне відведення тепла, що дозволяє підтримувати постійні умови горіння дуги, зменшити знос витратних частин і уник-

нути перегріву при тривалій роботі на верхній межі струмів. Це є принципово важливим для забезпечення повторюваності параметрів зварювання та стабільної якості шва.

Для виконання зварювання кільцевого шва в нижньому положенні на обичайці діаметром 600 мм зі з'єднанням типу нахлестове з'єднання (при входженні юбки в обичайку) та допустимим відхиленням зазору до 1 мм, при використанні пальника Fronius MTW/MTB 400i, зварювального дроту діаметром 1,2 мм і захисної газової суміші $\text{Ar} + 18 \% \text{CO}_2$ у діапазоні струмів 190–280 А, доцільно застосовувати газове сопло діаметром 15 мм у поєднанні з багатоканальним газорозподільним дифузором Fronius. Обираємо сопло, дифузор, наконечник з серії Fronius - wear parts MTG 400i / MTB 400i G ML - Gas nozzle $\varnothing 15 / \varnothing 25 \times 75$ СТ М23 х 2 [26]. Обрана конфігурація забезпечує рівномірний ламінарний розподіл захисного газу, стабільність дуги та надійний захист зварювальної ванни по всій довжині автоматичного кільцевого шва, що є критичним за умов змінної геометрії з'єднання та тривалого безперервного зварювання.

2.5 Особливості складально-зварювальної технології корпусу стратифікаційної ємності

Складально-зварювальна технологія корпусу стратифікаційної ємності проо- водиться відповідно нормативної технологічної документації та креслень. При цьому враховуються заходи щодо енерго та матеріало збереження, а також безпека праі на робочих місцях. Технологія складається з наступних операцій: для обичайки складально-зварювальна для подовжнього стику, зварювальна поздовжнього стику; складально-зварювальна ємності з днищ та обичайки, зварювання кільцевих швів днищ та обичайки, зварювання деталей ємності, контроль якостівиготовлення та випробування ємності, виправлення дефектів.

У зв'язку з використанням прокату та днищ від поставників металопродукції у консерваційних та технологічних забруднення, доцільно провести розконсервацію металу перед виготовленням ємності за попередніми зауваженнями.

Зачистку кромок перед зварювання проводимо за декілька годин до зварювання механічним способом дробеструминною обробкою до металевого блиску та обезжиренням на відстані 20 мм від краю кромок.

При складанні кромок витримуємо зазори $0+1.0$ мм. Прихоплення довжиною 20 мм проволінься на відстані 200 мм. Обичайку та днища збираємо з попереднім натягом, проводимо ретельно контроль зазору.

Зварні з'єднання піддаються очищенню, а внутрішні поверхні корпусу звільняються від забруднень і слідів корозії. Виконується перевірка геометричних параметрів, якості монтажу та виконання зварювання. Після складання виріб приєднується до установки для пневматичних випробувань, де під тиском 0,05 МПа здійснюється контроль герметичності зварних швів. Далі корпус проходить гідравлічне випробування на міцність із застосуванням води під тиском $P_{\text{макс}}=0,9$ МПа. У разі виявлення дефектів зварних швів вони підлягають виправленню.

2.6 Контроль якості зварювання стратифікаційної ємності

Для забезпечення належної якості зварних з'єднань та оцінки результатів виконання технологічних операцій зварювання проводиться обов'язковий контроль зварного шва і прилеглої до нього зони. Метою такого контролю є своєчасне виявлення дефектів, визначення їх характеру й розмірів, а також аналіз причин їх виникнення. Отримані результати дозволяють не лише ідентифікувати непридатні ділянки, але й внести корективи в параметри зварювального процесу та впровадити профілактичні заходи, спрямовані на запобігання повторній появі дефектів у майбутньому.

Оцінювання якості зварних з'єднань здійснюється із застосуванням руйнівних і неруйнівних методів контролю, серед яких найбільш поширеними є візуальний, радіаційний, магнітний та ультразвуковий контроль. Провідне місце на практиці займають візуально-оптичний і вимірювальний методи, що дають змогу перевірити відповідність зварного шва вимогам технічної документації, оцінити геометрію з'єднання та виявити поверхневі пошкодження. За допомогою візуального огляду та простих оптичних засобів атестований фахівець може зафіксувати такі

дефекти, як відхилення розмірів і співвідношення катетів шва, нерівномірність ширини та висоти наплавленого металу, пропали, відкриті кратери, напливи й підрізи, ознаки непровару, тріщини, розшарування, пористість, корозійні ураження, неметалеві включення, порожнини, зміщення шва відносно стику, а також пошкодження захисного покриття.

Контрольні вимірювання зварних швів і з'єднань виконують з метою оцінювання їх відповідності встановленим вимогам та геометричним параметрам. Під час перевірки визначають фактичну ширину зварного шва, форму і висоту підсилення, розміри катета, а також довжину та крок переривчастих ділянок. Окрему увагу приділяють вимірюванню глибини й протяжності підрізів, зміщенню вершини стикового шва відносно осі з'єднання та величині неспівпадання поверхонь деталей у стикових з'єднаннях.

У зварних з'єднаннях не допускається наявність поодиноких пор, розміри яких перевищують 10 % мінімальної товщини елементів, що зварюються. Також вважаються неприпустимими підрізи основного металу глибиною від 0,5 до 1,0 мм за довжини понад 15 мм, а підрізи глибиною більше 1 мм — незалежно від їх протяжності. Дотримання зазначених обмежень є обов'язковою умовою забезпечення міцності, герметичності та надійної експлуатації зварних конструкцій.

Капілярний метод неруйнівного контролю застосовується для перевірки якості поверхні зварних з'єднань та основного металу стратифікаційної ємності, виготовленої з вуглецевої сталі товщиною 4 мм і призначеної для роботи під надлишковим тиском. Основною метою контролю є виявлення відкритих на поверхню дефектів, зокрема тріщин, пор, непроварів і мікроканалів, які можуть призвести до втрати герметичності або зниження міцності оболонки ємності. Вибір класу чутливості капілярного методу здійснюється з урахуванням умов експлуатації виробу та вимог до безпеки обладнання, що працює під тиском; при цьому визначальним параметром є ширина розкриття дефекту, а не його глибина. Для вуглецевих сталей характерна наявність технологічних мікродефектів у зоні термічного впливу зварного шва, які ефективно виявляються завдяки проникненню індикаторної рідини в дефектні порожнини під дією капілярних сил.

Процес капілярного контролю стратифікаційної ємності включає ретельну підготовку поверхні, після чого на контрольовану ділянку наносять пенетрант і витримують його протягом встановленого часу для заповнення можливих дефектів. Після видалення надлишків проникаючої рідини наноситься проявник, який забезпечує візуалізацію дефектів у вигляді контрастних індикаторних слідів. Огляд поверхні проводять при нормованому освітленні, з повторною перевіркою через збільшений інтервал часу для виявлення дрібних дефектів. За результатами контролю складається протокол із зазначенням характеру, розмірів та розташування виявлених дефектів, після чого поверхню ємності очищають від залишків дефектоскопічних матеріалів. Застосування капілярного методу на даному етапі виготовлення стратифікаційної ємності дозволяє своєчасно виявити критичні поверхневі дефекти та забезпечити відповідність виробу вимогам герметичності й надійної експлуатації під тиском, [26].

Таку перевірку можна провести відчизняним інструментальним набором «КОЛОРАН», [27]. Набір кольорової капілярної дефектоскопії включає «Пенетрант малиновий», «Проявник» та «Очищувач», виявляє дефекти більше 1 мкм.

Під час ультразвукового контролю зварних з'єднань малої товщини (близько 4 мм) виникають суттєві труднощі, пов'язані з обмеженим доступом до зони контролю, малою товщиною стінки, різномірністю хімічного складу матеріалів і значною кількістю стиків, що підлягають обстеженню. Ефективне вирішення цих завдань забезпечується застосуванням сучасного ультразвукового методу з використанням технології фазованих решіток, яка дозволяє здійснювати електронне відхилення та кероване переміщення ультразвукового променя без механічної зміни положення датчика, виконувати фокусування сигналу в заданій зоні контролю та забезпечувати безперервну реєстрацію даних під час сканування.

Рекомендується застосовувати портативну систему ультразвукового контролю TOPAZ32, [28], рис. 2.9, що працює за технологією фазованих решіток (PAUT), для контролю зварних з'єднань товщиною 4 мм із використанням високо-частотних малогабаритних РА-перетворювачів та малих клинів, із виконанням секторного сканування (S-scan) для покриття кореня, границь сплавлення та тіла шва.

Налаштування затримки клина, швидкості та чутливості слід виконувати на еталонному зразку, наближеному до об'єкта контролю, із застосуванням корекції підсилення (TCG/DAC) за штучними відбивачами малих розмірів. Для зниження впливу геометричних відбиттів і мертвої зони рекомендовано обмежувати розгортку по глибині під товщину виробу, застосовувати малий крок сканування та виконувати контроль з двох сторін шва (за можливості). Індикації підлягають підтвердженню перехресним скануванням/зміною кута та аналізом А-, S- та (за потреби) В/С-сканів. За наявності підозри на поверхневі дефекти або складну геометрію з'єднання рекомендується доповнювати РАУТ відповідними поверхневими методами контролю.



Рисунок 2.9 - Портативний високопродуктивний дефектоскоп TOPAZ32 із фазованою антенною решіткою, [28]

Візуальний, капілярний та ультразвуковий контроль проводимо на поздовжніх стикових та кільцевих накладних швах обичайки. Під час гідравлічних випробувань, призначених для оцінки міцності зварних з'єднань, ємність заповнюють водою та створюють у ній надлишковий тиск близько 6 бар. Після досягнення заданого тиску його витримують протягом не менше 5 хвилин. У процесі витримки виконують візуальний контроль зварних швів з метою виявлення можливих підтікання або появи крапель рідини, зокрема під час легкого простукування швів спеціальним молотком із заокругленою бойковою частиною.

3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Дослідження впливу імпульсного зварювання на структуру та властивості металу шва

3.1.1 Умова формування бездефектного зварного шва

Зварювання сталей у середовищі вуглекислого газу та його сумішах з аргонном є одним із найбільш поширених способів дугового зварювання завдяки високій продуктивності, широким можливостям механізації й автоматизації, а також відносній простоті технологічної реалізації. Разом із тим, даний спосіб зварювання характеризується підвищеною чутливістю до виникнення дефектів формування та структури зварного шва, що обумовлено як активною природою захисного газового середовища, так і складною фізичною картиною процесів у зварювальній ванні.

Серед найбільш характерних дефектів зварних швів, виконаних у CO_2 та газових сумішах, слід відзначити пористість, осьову лускатість, хімічну та структурну неоднорідність металу шва, а також зниження експлуатаційних властивостей з'єднань. Значна частина цих дефектів має не лише металургійне, але й виражене гідродинамічне походження, що пов'язано з особливостями руху рідкого металу у зварювальній ванні та умовами її кристалізації.

Ключову роль у формуванні якості зварного шва відіграє гідродинаміка зварювальної ванни, яка визначається сукупною дією сил дуги, електромагнітних сил, поверхневого натягу, гравітації та теплових потоків. Рух рідкого металу у ванні безпосередньо впливає на розподіл температури, швидкість і напрямок кристалізації, а також на перенесення хімічних елементів і домішок у процесі твердіння.

Для з'ясування причин виникнення дефектів зварного шва необхідно розглянути поведінку розплавленого металу у зварювальній ванні. Саме характер руху рідкого металу, умови його утримання та рівноваги визначають стабільність процесу зварювання і формування шва без дефектів

Зварювальна ванна є складною гідродинамічною системою, у якій на рідкий метал діє сукупність сил різної природи. Їх співвідношення визначає форму ванни,

розподіл металу в її об'ємі та умови твердіння. Для аналізу цих процесів у дисертації використовується умовний поділ зварювальної ванни на окремі характерні частини, а також розглядається баланс тисків у системі «дуга – ванна».

Зварювальну ванну умовно поділяють на дві основні частини: кратерну (головну) та хвостову. Кратерна частина розташована безпосередньо під електродом і перебуває під прямим впливом зварювальної дуги, плазмових потоків і газового середовища. Хвостова частина знаходиться позаду електрода і є зоною перерозподілу та твердіння рідкого металу.

Розташування рідкого металу в зварювальній ванні визначається різницею тисків, що створюються в цих двох частинах. У кратерній зоні метал зазнає дії сумарного тиску дуги, плазмових потоків і газів, тоді як у хвостовій частині визначальними є гідростатичні та внутрішні об'ємні сили. Такий поділ дозволяє розглядати процес формування ванни як результат взаємодії локальних зон з різними умовами силового та теплового впливу.

Для формування бездефектного зварного шва необхідно, щоб у зварювальній ванні дотримувалася рівновага між тиском дуги та гідростатичним тиском рідкого металу. Сумарний тиск дуги, плазмових потоків і газів має врівноважуватися тиском шару рідкого металу в кратерній частині ванни з урахуванням максимального тиску, створюваного стовпом рідкого металу на дно ванни. Виконання цієї умови забезпечує утримання рідкого металу у зварювальній ванні та стабільність її форми в процесі зварювання. Порушення балансу зазначених тисків призводить до зміни геометрії ванни, витікання металу або нестійкого формування шва, що створює передумови для виникнення дефектів.

Процес підтримання цієї рівноваги має саморегулювальний характер. Зміна тиску дуги або гідростатичного тиску призводить до відповідної зміни товщини шару рідкого металу під дугою. Таким чином, система «дуга – ванна» автоматично реагує на збурення, однак за певних умов це саморегулювання може порушуватися, що створює передумови для виникнення дефектів формування зварного шва.

3.1.2 Сили, що діють на рідкий метал у зварювальній ванні

Характер руху та розподілу рідкого металу у зварювальній ванні визначається дією комплексу сил різної природи. Залежно від характеру впливу на метал зварювальної ванни ці сили поділяють на поверхневі та об'ємні

До поверхневих сил належать сили, що діють безпосередньо на поверхню рідкого металу зварювальної ванни. Основними з них є: тиск гальмування плазмового струменя дуги; електромагнітний тиск; реактивний тиск струменів парів металу; сили поверхневого натягу на межі «газ – метал»; сили тертя плазми об поверхню рідкого металу зварювальної ванни.

Сукупна дія цих сил визначає форму поверхні ванни, глибину кратера та умови утримання рідкого металу під дугою. До об'ємних сил належать сили, що діють у всьому об'ємі рідкого металу зварювальної ванни. До них відносять: електродинамічні сили в рідкому металі; гравітаційні сили; сили внутрішнього тертя рідкого металу; центробіжні сили, що виникають при русі розплаву по криволінійній поверхні дна ванни. Об'ємні сили визначають характер внутрішніх потоків рідкого металу, інтенсивність його перемішування та перерозподіл металу між кратерною і хвостовою частинами зварювальної ванни.

Аналіз сил, що діють на рідкий метал у зварювальній ванні, зумовив появу великої кількості моделей, які описують характер його руху. Дослідниками запропоновано різні підходи до моделювання гідродинамічних процесів у ванні, однак дотепер не сформовано єдиної загальноприйнятої моделі руху рідкого металу при дуговому зварюванні. Це пояснюється різноманіттям режимів зварювання та складністю фізичних процесів, що відбуваються у ванні

Шар рідкого металу, який переміщується у хвостову частину зварювальної ванни вздовж її дна, обмеженого ізотермічною поверхнею, здійснює незгасаючі гармонійні коливання, рис.3.1. Такі коливання пов'язані з періодичним порушенням рівноваги у ванні та можуть проявлятися у вигляді хвиль і нерівностей поверхні зварного шва.

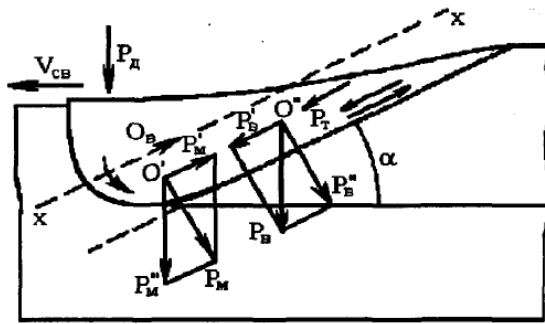


Рисунок 3.1 – Схема дії сил у зварювальній ванні

У циркуляційних моделях основною причиною руху рідкого металу вважається дія електромагнітних сил. Внаслідок взаємодії магнітного поля струму з вектором густини струму у ванні виникають замкнені циркуляційні потоки. Рідкий метал рухається від електрода до дна ванни, далі — у хвостову частину, а поблизу поверхні — у зворотному напрямку до дуги. У хвостовій частині ванни рух металу має несиметричний циркуляційний характер

У межах гідравлічної моделі зварювальну ванну поділяють на кілька характерних зон: зону плавлення, перехідну зону та зону формування шва. Рідкий метал у хвостовій частині ванни рухається по каналу, конфігурація якого визначається поверхнею кристалізації. На відміну від відкритих потоків, метал у хвостовій частині ванни зазнає значного впливу об'ємних електродинамічних сил, а в перехідній зоні може додатково піддаватися дії тиску дугової плазми

Динамічні моделі враховують реактивний тиск плазмового струменя на дно кратера та можливе відхилення осі дуги від осі електродного дроту. Активна пляма нагріву при цьому може переміщуватися по передній стінці кратера, що призводить до нестаціонарності процесу формування ванни

Аналіз моделей руху рідкого металу у зварювальній ванні показує, що виникнення дефектів формування шва тісно пов'язане з порушенням гідродинамічної рівноваги та нестаціонарністю руху розплаву

У хвостовій частині ванни можливе зіткнення потоків рідкого металу, спрямованих від дуги та зворотних циркуляційних потоків. Таке зіткнення порушує рівновагу у ванні та може супроводжуватися локальними збуреннями поверхні металу, рис.3.2.

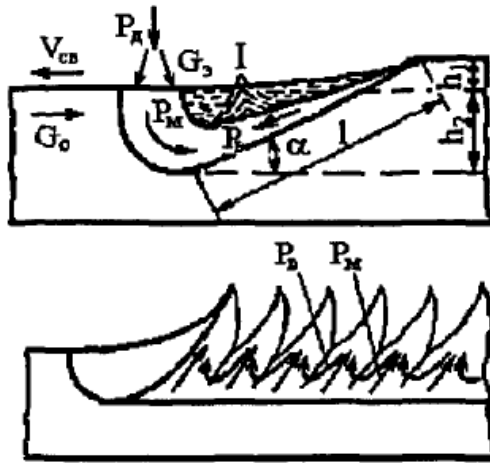


Рисунок 3.3 – Схема утворення локальних збурень у зварювальній ванні

За умов нестационарного горіння дуги та періодичного порушення гідродинамічної рівноваги зварювальна ванна може формуватися дискретно, окремими порціями рідкого металу, рис. 3.3. Такий характер формування шва створює передумови для появи внутрішніх дефектів і зниження якості зварного з'єднання.

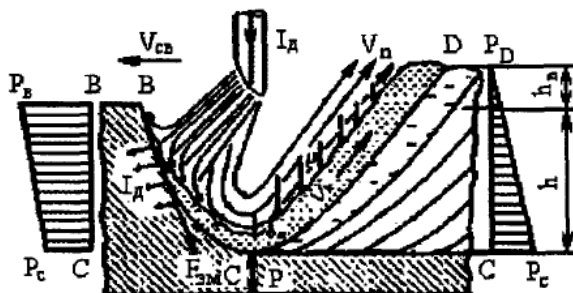


Рисунок 3.3 – Схема динамічного формування зварювальної ванни

Однією з найбільш небезпечних форм структурної неоднорідності металу шва є зональна ліквіація, яка виникає внаслідок нерівномірного розподілу легувальних і домішкових елементів під час кристалізації. У зварювальній ванні, що має складну форму та інтенсивні внутрішні потоки, формуються зони з різними умовами тепловідведення та різною швидкістю росту дендритів. У процесі дендритної

кристалізації домішки, що мають обмежену розчинність у твердому металі, витісняються з об'єму зростаючих кристалів і концентруються в міждендритному просторі.

Додатковим чинником, що суттєво впливає на формування дефектів структури, є скрита теплота кристалізації. Виділення теплоти під час фазового переходу рідкого металу в твердий супроводжується локальним уповільненням процесу охолодження та періодичною стабілізацією фронту кристалізації. За умов нестационарного теплового режиму це може призводити до пульсацій процесу твердіння та формування характерної лускатої структури шва.

Лускатість зварного шва, особливо виражена в осевій зоні, є наслідком чергування ділянок інтенсивного росту та тимчасового пригальмовування кристалізації. У проміжках між окремими «лусками» зберігаються тонкі прошарки рідкого або напіврідкого металу, в яких концентруються гази та домішки. За несприятливих умов дегазації ці прошарки можуть перетворюватися на пори, розташовані вздовж осі шва, що істотно знижує його щільність і механічні властивості.

Таким чином, дефекти, що виникають при зварюванні в CO_2 та газових сумішах, мають складну природу, в якій тісно переплітаються гідродинамічні, теплові та металургійні процеси. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до аналізу зварювальної ванни як динамічної системи, у якій керування рухом розплаву та умовами кристалізації є ключем до підвищення якості зварних з'єднань.

3.1.3 Перенесення електродного металу та його вплив на зварювальну ванну

Перенесення електродного металу при зварюванні в CO_2 та газових сумішах є одним із визначальних чинників, що впливають на стабільність дуги, характер збурення зварювальної ванни та умови формування шва. За класифікацією, наведеною в роботах Потап'євського [17], характер переносу визначається силою струму, напругою дуги, діаметром електродного дроту та складом захисного газу, рис.3.4.

Короткозамкнене перенесення металу характерний для зварювання в CO_2 при відносно малих і середніх струмах. У цьому режимі крапля електродного металу періодично замикає дуговий проміжок, утворюючи металевий місток між електродом і зварювальною ванною. Руйнування містка відбувається внаслідок дії електромагнітних сил та випаровування металу в зоні перетяжки.

Для короткозамикального перенесення характерні значні коливання струму і напруги, що зумовлює імпульсний характер теплового та силового впливу на зварювальну ванну. У CO_2 цей режим часто супроводжується підвищеним розбризкуванням електродного металу та нестабільністю процесу

Крупнокрапельне перенесення спостерігається при підвищенні сили струму, але за відсутності умов для струменевого переносу. Краплі формуються на кінці електрода, досягають значних розмірів і відриваються під дією гравітаційних та електромагнітних сил.

Такий характер перенесення супроводжується значним механічним впливом крапель на зварювальну ванну. Удар крапель викликає локальні збурення поверхні ванни, сплески та додаткове розбризкування, що негативно впливає на формування шва та його поверхневу якість.

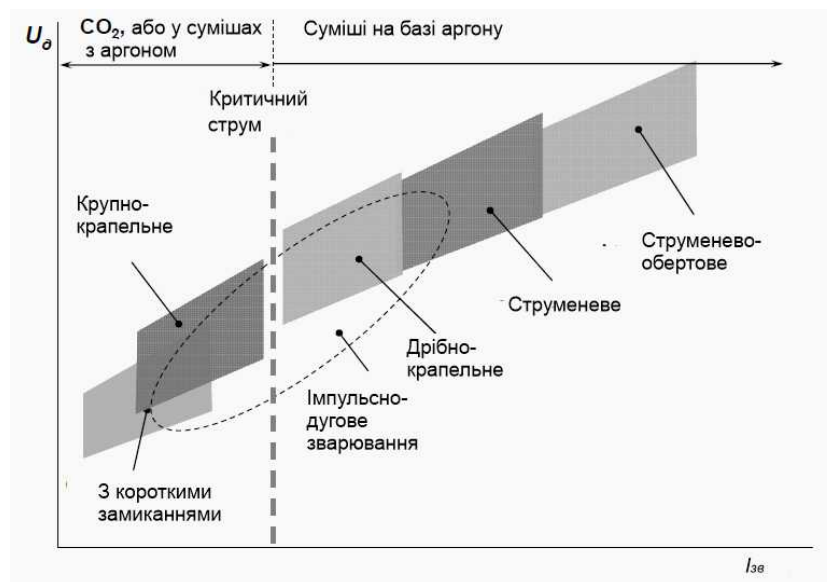


Рисунок 3.4 – Види перенесення металу в зварювальній ванні, [17]

Імпульсне перенесення металу реалізується при застосуванні імпульсних джерел живлення. У цьому режимі формування та відрив краплі керуються імпульсами струму, що дозволяє забезпечити контрольований перенос електродного металу, часто за принципом «один імпульс — одна крапля».

Імпульсне перенесення характеризується зменшенням розбризкування, стабілізацією дуги та більш рівномірним тепловим і силовим впливом на зварювальну ванну. За даними Потапівського та співавторів, цей режим є найбільш перспективним для керування процесами формування шва, особливо при зварюванні у просторових положеннях, відмінних від нижнього

Характер переносу електродного металу безпосередньо визначає рівень збурення зварювальної ванни. Короткозамикальний і крупнокрапельний перенос супроводжуються різкими імпульсами сил і тепла, що сприяє порушенню гідродинамічної рівноваги ванни, утворенню хвиль, сплесків і дефектів формування шва.

Імпульсне перенесення, навпаки, дозволяє зменшити амплітуду збурень та створити більш керований режим взаємодії краплі зі зварювальною ванною. Це створює передумови для стабілізації гідродинамічних процесів у ванні та зниження ймовірності виникнення дефектів.

3.1.4. Імпульсне живлення дуги як засіб керування зварювальною ванною

Застосування імпульсного живлення зварювальної дуги розглядається як ефективний спосіб активного впливу на гідродинамічні процеси у зварювальній ванні. На відміну від стаціонарних режимів, імпульсний режим дозволяє цілеспрямовано змінювати співвідношення сил, що діють на рідкий метал, у часі та керувати характером переносу електродного металу .

При імпульсному зварюванні періодичне зростання сили струму призводить до короткочасного посилення тиску дуги, електромагнітних сил і теплового впливу на зварювальну ванну. У паузах між імпульсами інтенсивність цих впливів зменшується, що створює нестационарний режим існування ванни та змінює умови руху рідкого металу

Імпульси струму супроводжуються періодичним зростанням електромагнітних сил у рідкому металі та інтенсифікацією плазмових потоків дуги. Це викликає короткочасне посилення циркуляційних потоків у зварювальній ванні та зміну характеру взаємодії дуги з поверхнею розплаву, що не реалізується при стаціонарному живленні

В імпульсному режимі створюються умови для керованого переносу електродного металу, за якого відрив краплі синхронізується з імпульсом струму. Реалізація принципу «один імпульс — одна крапля» дозволяє стабілізувати процес переносу, зменшити розбризкування та обмежити збурення зварювальної ванни

Зміна характеру гідродинамічних процесів у зварювальній ванні при імпульсному зварюванні створює передумови для впливу на процеси кристалізації та формування структури металу шва

Нестационарний характер руху рідкого металу при імпульсному живленні дуги змінює умови існування фронту кристалізації. Періодичні збурення ванни впливають на форму та стабільність фронту твердіння, що відрізняє імпульсний режим від стаціонарного. Посилення електромагнітних і гідродинамічних потоків у фазі імпульсу сприяє інтенсифікації перемішування рідкого металу у ванні. Це призводить до більш рівномірного розподілу температури та хімічних елементів у зоні кристалізації.

Частота імпульсів визначає періодичність збурень зварювальної ванни та характер взаємодії між гідродинамічними процесами і кристалізацією. Зміна частоти імпульсів дозволяє впливати на умови росту кристалів і, відповідно, на формування структури металу шва.

Для дослідження впливу імпульсного перенесення металу імпульсне живлення зварювальної дуги реалізовано на базі стандартного джерела постійного струму ВДУ-506 шляхом застосування зовнішнього електронного модулятора струму, виконаного у вигляді приставки до зварювального джерела. Як блок формування керуючих імпульсів в експериментальній системі імпульсного живлення зварювальної дуги використано універсальний PWM-контролер Elecbec PWM

Signal Controller. Зазначений модуль застосовується виключно для генерації керуючих сигналів заданої частоти та тривалості і не бере безпосередньої участі у комутації силового зварювального струму. Силова модуляція струму здійснюється за допомогою швидкодіючого напівпровідникового тиристорного ключа, який керується сигналами PWM-контролера.

З метою забезпечення необхідної швидкодії системи та формування крутого фронту імпульсу зварювального струму у силовій частині джерела живлення відключаються згладжувальні елементи, зокрема дросель та урівнювальний реактор. Зменшення загальної індуктивності зварювального кола дозволяє забезпечити швидке наростання струму в імпульсі та підвищує точність відтворення заданої імпульсної програми.

Основним елементом системи є модулятор імпульсного живлення, який функціонально являє собою керований імпульсний опір, рис. 3.5. Модулятор виконаний на базі тиристорного ключа, увімкненого послідовно в зварювальне коло. Керування тиристорним ключем здійснюється від блока управління, який формує сигнали відкривання відповідно до заданої програми імпульсів.

Функціональна схема системи імпульсного живлення включає такі основні елементи: джерело постійного струму, баластний реостат, тиристорний ключ, дросель та блок керування. Баластний реостат визначає величину струму паузи, що протікає через зварювальну дугу в непровідному стані тиристорного ключа. Наявність струму паузи забезпечує стабільність горіння довгої дуги та запобігає її згасанню.

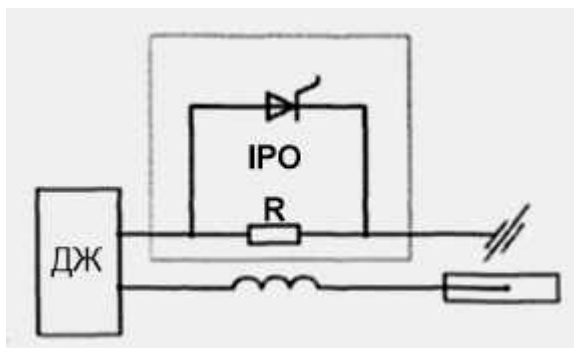


Рисунок 3.5 – Система імпульсного живлення

При подачі керуючого імпульсу з блока управління тиристорний ключ переходить у провідний стан, унаслідок чого баластний реостат частково або повністю виключається з кола, і через зварювальну дугу протікає імпульс зварювального струму підвищеної амплітуди. Максимальна величина струму імпульсу обмежується параметрами дроселя та тривалістю імпульсу, що задається системою керування.

Таким чином, зварювальна дуга живиться послідовністю імпульсів струму, розділених паузами з пониженим рівнем струму. Зміною тривалості імпульсів, пауз та частоти їх повторення здійснюється регулювання тепловкладення, стабільності дуги та процесу перенесення електродного металу.

3.1.5 Експериментальне дослідження впливу імпульсного живлення дуги на мікроструктуру зварного шва

Метою експериментального дослідження є встановлення впливу імпульсного живлення зварювальної дуги, зокрема частоти імпульсів струму, на формування мікроструктури металу зварного шва. Дослідження спрямоване на перевірку припущення про можливість керування процесами кристалізації металу шва шляхом зміни гідродинамічних умов у зварювальній ванні при імпульсному зварюванні.

Експерименти виконувалися методом дугового зварювання плавким електродом у захисному газі (CO_2 або його сумішах). Як основний матеріал використовували сталеві зразки, що відповідають умовам промислового зварювання. Зварювання проводили з використанням серійного електродного дроту відповідного хімічного складу.

Захисне газове середовище, просторове положення зварювання та геометрія з'єднань у межах серії дослідів залишалися незмінними з метою виключення їх впливу на результати експерименту. Зварювання виконували в імпульсному режимі живлення дуги. Основними змінними параметрами імпульсного режиму були: частота імпульсів струму; амплітуда імпульсного струму; тривалість імпульсу та паузи між імпульсами.

Середні значення струму та напруги підтримувалися на одному рівні для всіх режимів з метою забезпечення порівнянності результатів і виключення впливу сумарного тепловкладення на формування структури металу шва.

Після зварювання зразки піддавали механічній обробці з метою виготовлення металографічних шліфів. Шліфи вирізали в поперечному напрямку до осі шва. Підготовка зразків включала стандартні операції шліфування та полірування, після чого проводилося травлення для виявлення мікроструктури металу шва.

Мікроструктуру металу зварного шва досліджували за допомогою оптичної металографії. Аналіз проводили в різних зонах шва, зокрема в осьовій частині та поблизу межі сплавлення. Основну увагу приділяли характеру кристалічної структури, розміру та формі зерен, а також наявності структурної неоднорідності.

Оцінку впливу імпульсного живлення дуги на мікроструктуру металу шва здійснювали шляхом порівняння зразків, отриманих при різних частотах імпульсів, між собою, а також із зразками, виконаними в стаціонарному режимі зварювання.

Експериментальні дослідження впливу імпульсного живлення дуги на структуру зварного шва проводилися на зразках зі сталі Ст3 подібної якісній сталі P265GH розмірами $300 \times 150 \times 12$ мм. Зварювання виконували в середовищі вуглекислого газу електродним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм у щільну розробку шириною 10 мм. Витрата захисного газу, виліт електрода, швидкість зварювання та швидкість подачі електродного дроту підтримувалися постійними і становили відповідно 15 л/хв, 20 мм, 20 м/год та 270 м/год. Частоту накладених імпульсів струму змінювали ступінчасто в діапазоні 40–120 Гц.

Аналіз макроструктури зварних з'єднань показав, що зміна частоти імпульсного живлення в досліджуваному діапазоні не чинить суттєвого впливу на загальну макрогеометрію зварного шва, рис.3.6. Форма шва, глибина та характер проплавлення залишаються загалом стабільними, що свідчить про відсутність різкого перерозподілу сумарного тепловкладення при зміні частоти імпульсів за сталих середніх параметрів режиму.

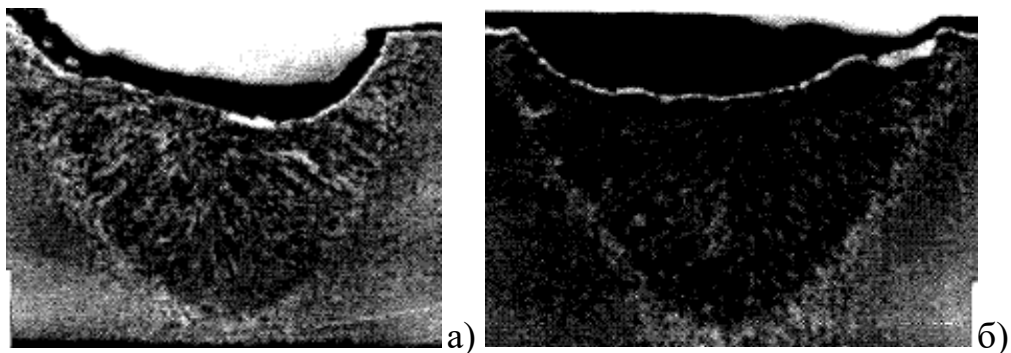


Рисунок 3.6 – Макроструктура зварного шва при різній частоті імпульсів:
а) 40 Гц, б) 70 Гц

Разом з тим, при підвищенні частоти імпульсів відмічається підвищення стабільності процесу зварювання та покращення зовнішнього вигляду шва. Шов набуває більш рівномірної, дрібнолускатої поверхні, що свідчить про зменшення амплітуди гідродинамічних збурень зварювальної ванни.

Зона термічного впливу при імпульсному живленні дуги у щілинну розділку в середньому не перевищує 1,0 мм. Лінія сплавлення виражена неяскраво, а укрупнення зерна в зоні термічного впливу є відносно незначним.

Зміна частоти імпульсів струму суттєво впливає на мікроструктуру металу шва. При частоті 40 Гц структура металу шва характеризується відносно крупнозернистою будовою та наявністю зерен фериту неправильної, осколкової форми з невеликою кількістю перліту.

З підвищенням частоти імпульсів спостерігається пропорційне подрібнення структури металу шва, рис.3.7. При частоті 120 Гц формується дрібнозерниста рівносна структура, представлена переважно феритними зернами з незначною кількістю перліту, розташованого у вигляді дрібних включень по межах зерен фериту. Така структура є більш однорідною та стабільною порівняно зі структурою, сформованою при низьких частотах імпульсів.

Безпосередньо перед лінією сплавлення у всіх досліджуваних режимах спостерігається напрямлений ріст і укрупнення кристалів наплавленого металу, що пов'язано з орієнтацією теплового потоку та умовами кристалізації поблизу основного металу.

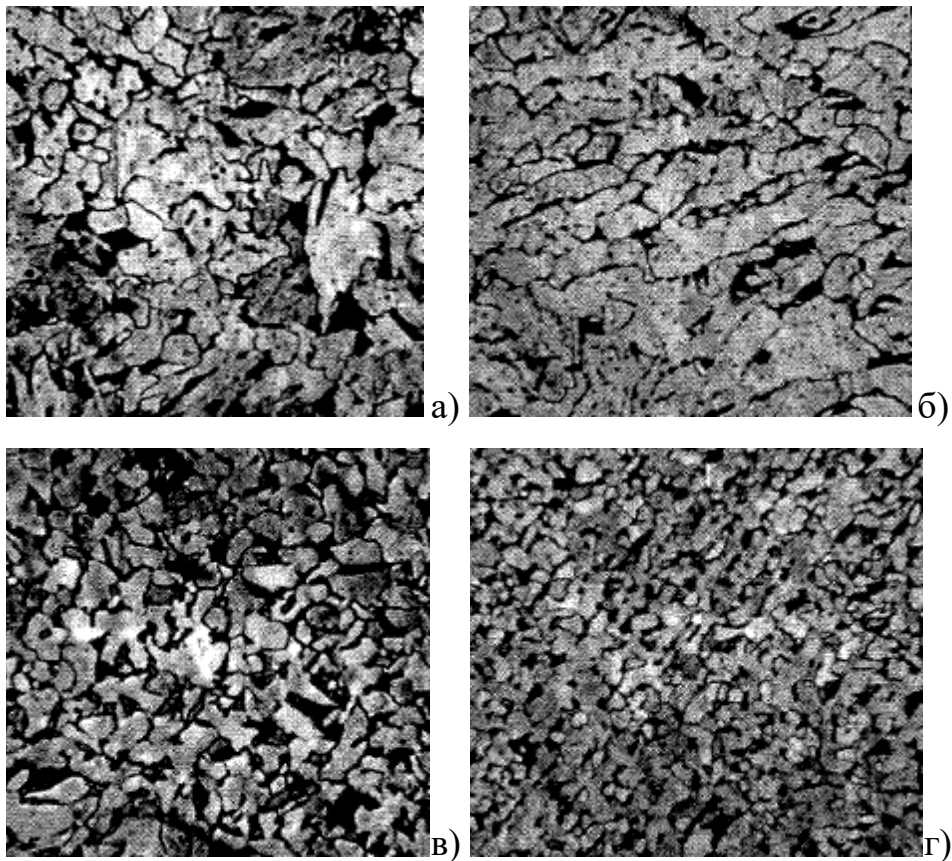


Рисунок 3.7 – Мікроструктура зварного шва при різній частоті імпульсів:
а) 40 Гц, б) 60 Гц, в) 80 Гц, г) 120 Гц

Водночас встановлено, що зі зростанням частоти імпульсів має місце тенденція до укрупнення зерна в зоні термічного впливу, що пов'язано зі зміною теплового циклу та тривалості перебування металу в інтервалі високих температур.

Динамічний характер сил, що діють на зварювальну ванну при імпульсному живленні дуги, зумовлює зміну параметрів проплавлення. У момент дії імпульсу відбувається підвищення тиску дуги, внаслідок чого рідкий метал витісняється у хвостову частину зварювальної ванни. Це призводить до зменшення товщини рідкого прошарку металу під дугою та, відповідно, до збільшення глибини проплавлення основного металу.

Суттєвий вплив на проплавлення має середнє значення зварювального струму, рис.3.8. Зі збільшенням середнього струму зростає силовий тиск дуги та швидкість перенесення електродних крапель, що сприяє збільшенню глибини і

площі проплавлення. Однак надмірне збільшення амплітуди імпульсів призводить до порушення формування металу шва у вигляді виплесків і напливів.

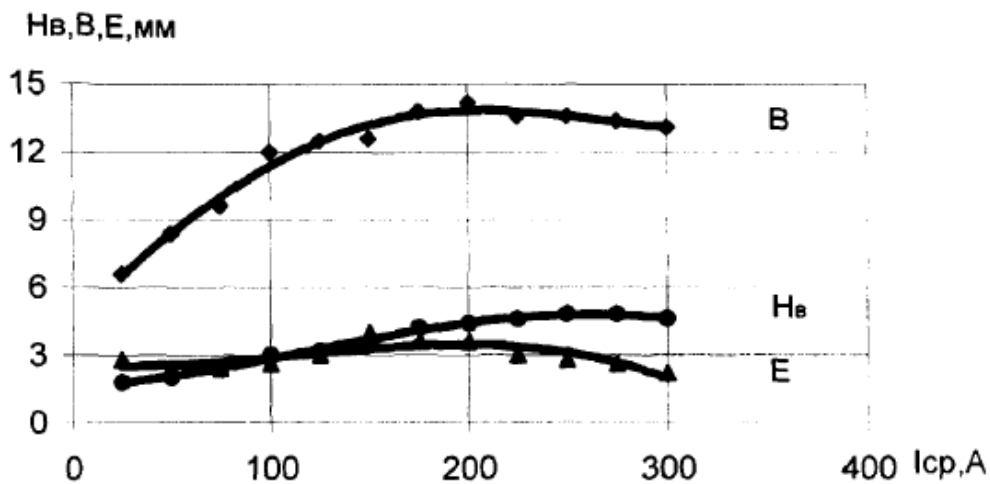


Рисунок 3.8 – Вплив середнього значення сили струму на глибину проплавлення (Нв), ширину шва (В) та підсилення шва (Е) при $V_{\text{подачі}}=500\text{м/год.}$; $V_{\text{зв}}=25\text{м/год}$

Вплив середнього значення струму є особливо суттєвим при зварюванні у вертикальному та стельовому положеннях. У цих умовах збільшення струму може призвести до досягнення такої погонної енергії, за якої рідкий метал зварювальної ванни під дією сили тяжіння починає стікати, випереджаючи дугу. У результаті збільшується товщина рідкого шару металу під дугою, що знижує проплавляючу здатність дуги.

Імпульсне живлення створює періодичні збурення ванни (чергування посилення/послаблення тиску дуги та електромагнітних сил), через що в розплаві виникають коливальні напруження та інтенсивніші потоки. Ці циклічні “стиски–розтягнення” діють на кінці зростаючих дендритів у зоні кристалізації й можуть відламувати їхні фрагменти. Частина уламків у гарячіших ділянках ванни оплавляється або повністю розчиняється, але фрагменти критичного розміру, які залишаються або знову потрапляють у зону твердіння, стають додатковими центрами кристалізації. У результаті зростає кількість зародків перед фронтом стовпчастих кристалітів, їхній подальший ріст пригнічується, і загалом формується дрібніша, більш рівносна первинна структура.

Це узгоджується з результатами мікроструктури: при 40 Гц спостерігається грубіша феритна структура, а при 120 Гц — дрібнозерниста рівноосна (ферит + невелика кількість перліту по межах зерен). Пояснення впливу частоти тут пряме: чим вища частота імпульсів, тим більше циклів збурення за однаковий час, тобто тим частіше відбувається механічний вплив на дендрити і тим більше утворюється центрів кристалізації, що й дає пропорційне подібнення структури металу шва.

Додатково запропонований механізм узгоджується з тим, що зі збільшенням частоти процес стає стійкішим, а шов з дрібною лускою: менші “порції” збурення і більш регулярний перенос металу роблять гідродинаміку ванни керованішою, що покращує кристалізацію та зменшує неоднорідність зварного шва.

3.2 Вплив термічного циклу на структуру та механічні властивості зони термічного впливу зварного з’єднання

Сталь P265GH характеризується доброю зварюваністю, що зумовлено її низьковуглецевим складом і спеціальним призначенням для виготовлення зварних елементів апаратів, що працюють під тиском. Її вуглецевий еквівалент знаходиться на рівні приблизно 0,35–0,40, що істотно знижує схильність до утворення гартівних структур і холодних тріщин. Під час зварювання в зоні термічного впливу в сталі P265GH формуються переважно феритно-перлітні структури з можливими незначними кількостями бейніту.

Сталь має низьку схильність до холодних і гарячих тріщин, добре переносить стандартні термічні цикли зварювання та не вимагає обов’язкового попереднього підігріву при товщинах до приблизно 20 мм. Післязварювальна термообробка, як правило, не є необхідною і застосовується лише у випадках підвищених вимог до зняття залишкових напружень або ударної в’язкості.

P265GH добре зварюється всіма поширеними способами зварювання — ручним дуговим, MAG/MIG, TIG — із застосуванням стандартних зварювальних матеріалів типу Св-08Г2С або аналогів. У результаті за дотримання звичайної технології формуються рівномічні та надійні зварні з’єднання з добрим поєднанням міцності, пластичності та в’язкості.

Аналіз фазових і структурних перетворень, що відбуваються під час охолодження аустеніту, здійснюють з використанням С-подібної (ССТ) діаграми анізотермічного розпаду аустеніту сталі P265GH. З огляду на низький вміст вуглецю та відносно невеликий вуглецевий еквівалент, критична швидкість охолодження для утворення мартенситу в цій сталі є досить високою.

Ділянка перегрівання поблизу лінії сплавлення є найбільш ослабленою через утворення крупнозернистої структури та невеликої кількості бейніту. У цих місцях можливе пластичності та ударної в'язкості металу.

Для побудови ССТ діаграми з накладеним термічним циклом використаємо розв'язок диференціального рівняння теплопровідності для випадку поширення теплоти за умови нагрівання пластини швидкорухомим потужним джерелом без врахування підігрітої ділянки перед даним джерелом за залежністю:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c\gamma \cdot t}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t\right) + T_0$$

δ – товщина зварних листів, см;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/см К;

$c\gamma$ – об'ємна теплоємність, Дж/см³ К;

y_0 – відстань від джерела до розглянутої точки, см;

b – коефіцієнт температуровіддачі, $b = \frac{2 \cdot \alpha}{c\gamma \cdot \delta}$;

α – коефіцієнт теплообміну поверхні пластини з навколишнім середовищем;

T_0 – початкова температура виробу.

Розрахунки проводимо для крупнозернистої перегрітої ділянки від температури ліквідусу $T_m = T_l = 1350^\circ\text{C}$.

$$y_0 = \frac{0.484 \cdot q}{2 \cdot \delta \cdot c\gamma \cdot v(T_m - T_0)}$$

Для розрахунку ключової величини режиму тривалості охолодження від 800 до 500 °C τ (абл $t_{8/5}$) для випадку зварювання за один прохід:

$$\tau = \frac{q^2}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \gamma \cdot v^2 \cdot \delta^2} \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(850 - T_0)^2} \right]$$

Режим зварювання встановлено у технологічному розділі. Отже для розрахунку стикового з'єднання без підігрівання використаємо наступні величини:

У таблиці 3.1.наведені дані термічного циклу. За даними термічного циклу, рис. 3.9, будуємо також термокінетичну діаграму, рис. 3.10, побудовані за результатами зміни твердості. Миттєва швидкість охолодження 6,77 град/с є низькою для утворення гартівних структур. Тому розрахунки часу охолодження від 800 до 500 °С дозволять передбачити кількісні параметри структури у таблиці 3.2.

коефіцієнт тепловіддачі, Дж/см ² с К	0,00188
коефіцієнт теплопровідності, Вт/см К	0,4
об'ємна теплоємність, Дж/см ³ К	5,0
температура, °С	1350
початкова температура виробу, °С	20
коефіцієнт температуропровідності	0,08
ефективний коефіцієнт нагрівання	0,7
товщина листів, що зварюються, см	0,4,
величина струму дуги, А	190
напруга дуги, В	27
ефективна теплова потужність джерела, Дж	3591
швидкість зварювання, см/с	0,54
миттєва швидкість охолодження, град/с,	6,77
відстань від джерела до точки макс. темп., см	0,61

Таблиця 3.1 Значення термічного циклу

час, с	0,3	0,5	1	2	4	5	10	50	100	200
стиковий без піді- риву	154	496	1075	1339	1257	1189	938	437	292	180

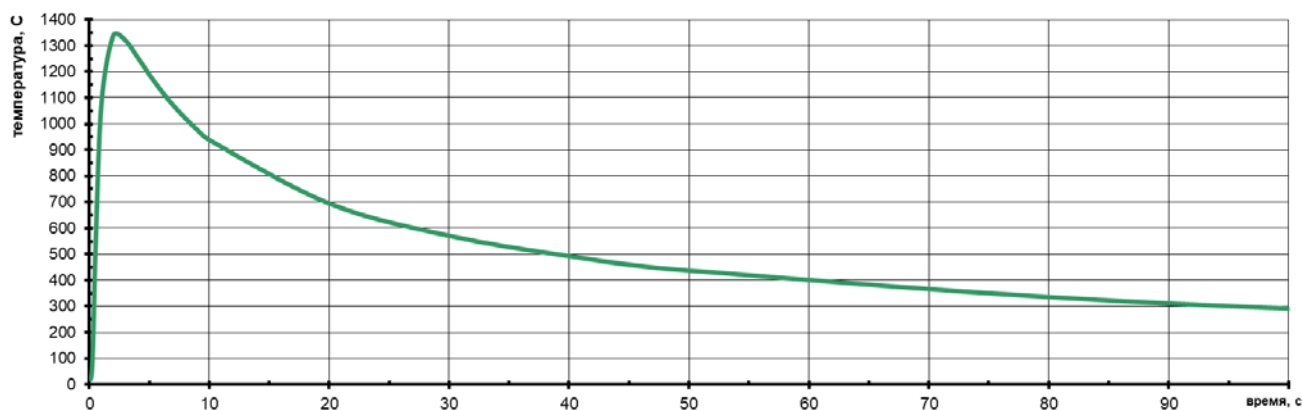


Рисунок 3.9 – Термічний цикл для стикового ЗЗ без підігрівання

3.3 Аналіз очікуваної структури зони термічного впливу

Металургійні перетворення у зоні термічного впливу при зварюванні сталі Р265GH відбуваються в умовах короткочасного нагрівання та прискореного охолодження, характерного для анізотермічних процесів. Після нагрівання металу вище температури $A_{с3}$ формується аустеніт, який при подальшому охолодженні зазнає фазових перетворень відповідно до ССТ-діаграми даної сталі, рис. 3.10.

У випадку, коли лінія термічного циклу перетинає 100 % лінію завершення феритно-перлітного перетворення при температурі 927 К, аустеніт повністю розпадається дифузійним механізмом ще у верхньому температурному інтервалі. Спочатку відбувається виділення фериту, а в залишкових збагачених вуглецем ділянках аустеніту формується цементит з подальшим утворенням перлітних колоній. Тому прогнозована структура перліту має порівняно крупну дисперсність, що зумовлює формування феритно-перлітної структури з твердістю 170-190 HV і задовільною пластичністю.

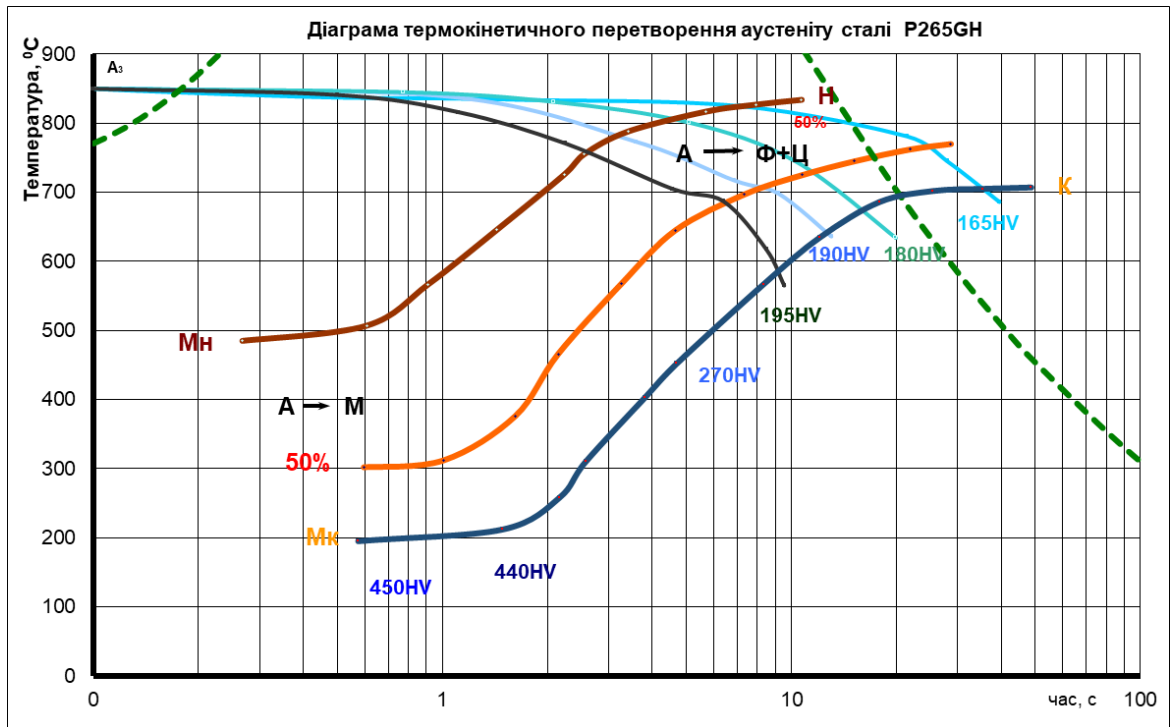


Рисунок 3.10 – CCT термокінетична діаграма для сталі P265GH (термічний цикл показано штриховою зеленою лінією).

З метою кількісного аналізу аусенітних перетворень визначимо їх прогнози величини фазових складових $S_{\Phi+П}$, τ_{Φ} , τ_M , S_M , $\tau_{\Phi+П}$, S_{Φ} , за методикою [31]:

$$\ln \tau_M = -2,1 + 15,5 C + 0,96 Mn + 0,84 Si + 0,65 Cr + 0,74 Mo + 0,55 Ni + 0,3 V$$

$$+ 4,0 Al + 0,5 W + 0,8 Cu - 0,25 Nb - 13,5 C2 - 0,8 Si2;$$

$$\ln S_M = 0,56 - 0,41 C + 0,1 Mn + 0,14 Cr - 0,3 Mo + 2,7 Ti - 1,1 Nb + 0,5 Cu + 1,7 C Mo;$$

$$\ln \tau_{\Phi} = 0,66 + 10 C + 1,3 Mn - 0,48 Si + 1,3 Cr + 1,5 Mo + 0,8 Ni - 1,4 W + 3,5 C Mn - 50 C V - 5,9 C2 + 0,8 Si2 ;$$

$$\ln S_{\Phi} = 1,23 + 0,17 Mn - 0,34 Si + 0,3 Cr - 0,5 Mo + 0,31 Ni + 0,09 Nb - 0,43 W - - 0,3 Cu;$$

$$\ln \tau_{\Phi+П} = 0,34 + 5,2 C + 1,8 Mn + 0,53 Si + 0,33 Cr + 2,9 Mo + 0,86 Ni + 1,5W + + 1Cu - 60 C V - 5,1 C2 + 0,7 Si2;$$

$$\ln S_{\Phi+П} = 0,91 - 0,9 C + 0,09 Mn + 0,08 Cr + 0,34 Mo + 0,15 Ni + 0,85 V + + 2,2Ti + 0,43 W;$$

Кількісний вміст фазових складових:

$$\text{мартенситу } M(\tau) = 100 \left[1 - \Phi \left(\frac{\ln \tau - \ln \tau_m}{\lg s_m} \right) \right], \%$$

τ - тривалість охолодження, що відповідає утворенню структури металу з 50% – м змістом мартенситу;

s_m - константа, що характеризує крутість спаду кривої змісту мартенситу в міру збільшення тривалості τ .

$$\text{- к-сть фериту [27]: } \Phi(\tau) = \Phi_{\max} \Phi \left(\frac{\ln \tau - \ln \tau_\phi}{\ln s_\phi} \right), \%$$

$\Phi_{\max}$ - максимальна кількість фериту, що може виділитися з аустеніту при дуже повільному охолодженні $\Phi_{\max} = 100 \left[\frac{1 - (C - 0,02)}{0,81 - 0,11Mn - 0,05Mo} \right], \%$;

$$\text{- сумарна кількість фериту і перліту } [\Phi + \Pi](\tau) = 100 \Phi \left(\frac{\ln \tau - \ln \tau_{\phi+\Pi}}{\ln s_{\phi+\Pi}} \right) \%;$$

$$\text{- кількість бейніту: } B(\tau) = 100 - M(\tau) - [\Phi + \Pi](\tau), \%;$$

$$\text{- кількість перліту: } \Pi(\tau) = [\phi + \Pi](\tau) - \phi(\tau), \%;$$

Результати розрахунку зведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Складові структури для різних зварних з'єднань

Найменування	Стикове без підігріву
Тривалість охолодження, с	32
Кількість мартенситу, %	0
Макс. кількість фериту, %	76
Кількість фериту, %	26
Кількість фериту та перліту, %	87
Кількість бейніту, %	13
Кількість перліту, %	61

Даний аналіз підтвердив ферито перлітну структуру на ділянці перегрівання у ЗТВ. Кількісний аналіз фазових змін при застосуванні підігрівання підтвердив гіпотезу про перлітний характер структури критичних ділянок ЗТВ. Прогнозовані

розраховані за методикою [31] величини міцності для даної ділянки становлять близько 420 МПа для тимчасового опору R_m , та 171 HV для твердості.

Отримані значення міцності свідчать про можливе локальне розміцнення металу в зоні перегрівання, що зумовлено крупнозернистою будовою та дещо підвищеною часткою бейніту (близько 13 %) порівняно з очікуваним діапазоном 5–10 %. З метою зменшення зернистості структури та стабілізації фазового складу доцільно застосовувати імпульсний режим зварювання з використанням джерела Fronius TransSteel 3000C Pulse при частоті імпульсів понад 100 Гц.

Застосування імпульсного режиму дозволить сформувати дрібнозернисту феритно-перлітну структуру, зменшити дендритну неоднорідність у зоні сплавлення та забезпечити підвищення ударної в'язкості й експлуатаційної надійності зварних з'єднань стратифікаційної ємності.

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Вибір та розрахунок зварювальних пристосувань

Для складально-зварювальних робіт при виготовленні тонковлистових циліндричних ємностей застосовують фіксувально-затискні та стяжні пристосування, що забезпечують суміщення кромки і стабільний зазор у стиках. До них належать гвинтові та ексцентрикові притиски, струбцини, притискні скоби, мостові притиски, а також стяжки клинового або гвинтового типу. Для стягування обичайки по колу й усунення овальності використовують зовнішні центратори стяжного типу: ланцюгові та поясні центратори з натяжним механізмом.

Для складання обичайки з днищами застосовують центрувально-установчі пристосування, які забезпечують співвісність і рівномірний зазор по колу стику. Типові засоби цієї групи: центрувальні кільця, установчі/напрямні пояси, торцеві упори, монтажні шаблони, що задають положення днища відносно торця обичайки. Такі пристосування виконують саме установчу й центрувальну функцію перед прихватками; контроль геометрії підтримують калібрами і шаблонами.

Для переміщення та повороту заготовок і виробів застосовують кантувальні й позиціювальні пристрої: кантувачі, поворотні траверси, струбцинні захвати та ложементи для безпечного перевертання циліндрів без зминання стінки. Для обертання під час складання та зварювання використовують роликові стенди і зварювальні обертачі.

Для забезпечення співвісності обичайок і встановлення необхідного зазору між кромками перед виконанням зварювальних операцій застосовують центрувальні ланцюгові механізми - центратори (рис. 4.1). Пристрій накидають на циліндричну конструкцію та за допомогою натяжного вузла виконують її обтискання. Симетрично розташовані притискачі забезпечують рівномірний тиск по колу, надійно фіксують виріб і зводять кромки до заданого зазору [32]. Після суміщення кромки виконують прихватки, після чого обтискання продовжують уздовж стику.

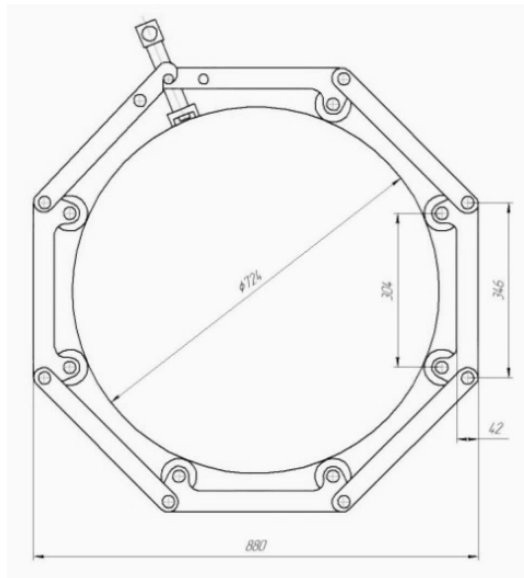


Рисунок 4.1 – Центрувальний ланцюговий механізм

Визначимо діаметр гвинтів з перевіркою допустимого напруження $\sigma_d = 600 \text{ кг/см}^2$ [11]:
$$d_{\text{гн}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot P_0}{\tau_k}}, \quad d_{\text{гн}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 1,4 \cdot 50000}{70}} = 36 \text{ мм}$$

Перевіримо максимальне напруження стиску у гвинтовому з'єднанні.

$$\sigma_z = \frac{1,27 \cdot P}{d_{\text{гн}}^2}, \quad \sigma_z = 1,27 \cdot 5000 / 3,6^2 = 490 \text{ (кг/см}^2\text{)}.$$

Визначене напруження σ менше 600 кг/см^2 .

Для надійної роботи гвинти у центраторях самогальмівні тобто $\alpha < \rho$ кут піднімання гвинтової лінії завжди менший за кут тертя. Для центраторів і силових притискачів доцільно застосовувати гвинти М36 з нормальним кроком $p=4 \text{ мм}$, виготовлені зі сталі середньої міцності, з помірним змащенням різьби. Використання дрібного кроку ще більше підвищує запас самогальмування, тоді як застосування різьб із великим кроком, оскільки вони втрачають властивість самофіксації.

4.2. Розрахунок роликового стенду

Роликові опори, що застосовуються під час зварювальних робіт, слугують надійними засобами позиціювання циліндричних виробів і забезпечують раціональне

підведення зварювального інструмента до кромки шва. Використання обертальних пристроїв відзначається простотою конструкції та економічною доцільністю, водночас вони підвищують продуктивність і якість зварювання та дають змогу скоротити тривалість використання кранового обладнання. Для зручності експлуатації привідні та холості роликові опори зазвичай монтують у лінії на загальних несучих рамах або стендах.

Привідні роликові опори, як правило, встановлюють на спільний приводний вал, оснащений вбудованим черв'ячним редуктором, що забезпечує плавне обертання виробу. Робочі поверхні роликів покривають гумовими або полімерними накладками з метою підвищення коефіцієнта зчеплення з поверхнею виробу та запобігання його проковзуванню. Для оперативної зміни відстані між опорами застосовують переставні холості роликові вузли, що дозволяє адаптувати установку до різних габаритів виробів.

Під час установлення виробів на роликові опори необхідно дотримуватися низки технічних вимог: торці виробу не повинні виступати за межі опор більше ніж на 100 мм, центр мас має розташовуватися в межах стенда, а маса виробу — відповідати допустимому навантаженню роликпопор.

Схема для розрахунку навантаження на опори роликів приведено на рисунку 4.2. Візьмемо центральний кут $\alpha = 92^\circ$.

Розрахуємо зусилля T_1 [32]:

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

вала ролика під підшипники;

$$f = 0,02, \text{ для сталі } \mu = 0,08, \text{ для гуми } \mu = 0,35.$$

Приймаємо стандартні розміри роликів та діаметри під підшипники для роликпопори Т30: $D_p = 41$, $d_p = 7$ (см), з рисунку 4.3.

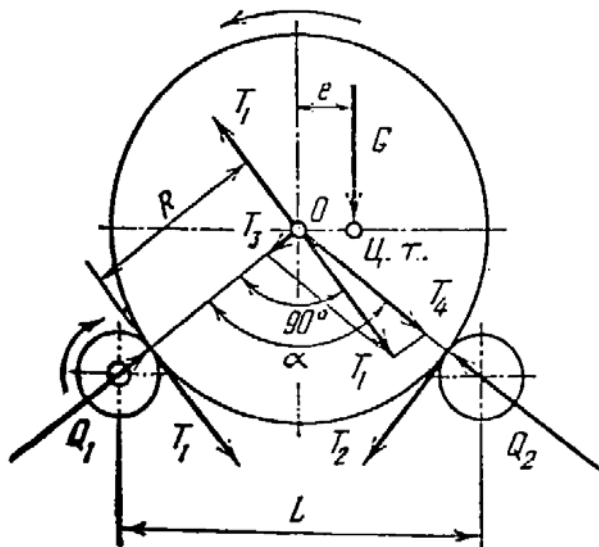


Рисунок 4.2 - Розрахункова схема роликоопори

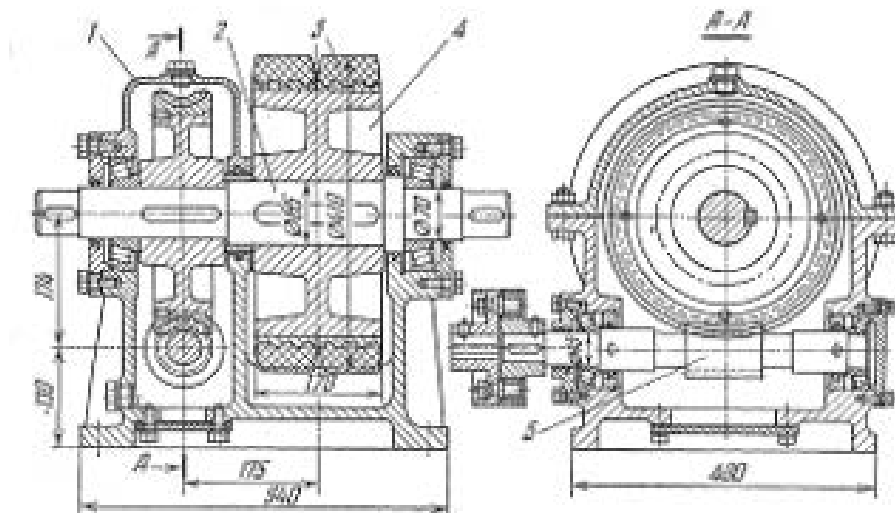


Рисунок 4.3 – Стандартна роликопора Т30

$$b = \frac{41}{0,02 \cdot 7 + 2 \cdot 0,3} = 534_{\text{мм}} \quad T_1 = 2000 \left(0,02 + \frac{0,02 \cdot \sin \frac{92}{2}}{53,4 \sin 92 + \cos 92 - 1} \right) = 78,5_{\text{кГс}}$$

$$T_2 = G \frac{E + \sin \frac{\alpha}{2}}{b \sin \alpha + \cos \alpha - 1}, \quad T_2 = 2000 \frac{0,02 \cdot \sin \frac{92}{2}}{53,4 \sin 92 + \cos 92 - 1} = 28,26$$

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

$$Q_1 = \frac{2000}{2 \cos \frac{92}{2}} \cdot \left(1 - \frac{0,02 \cdot \cos 92}{\sin \frac{92}{2}} + \frac{0,02 + \sin \frac{92}{2}}{53,4 \cdot \cos \frac{92}{2} - \sin \frac{92}{2}} \right) = 753,58 \quad \text{кгс}$$

$$Q_2 = \frac{G}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 + \frac{E}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{E + \sin \frac{\alpha}{2}}{b \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (2.5)$$

$$Q_2 = \frac{2000}{2 \cos \frac{92}{2}} \cdot \left(1 + \frac{0,02}{\sin \frac{92}{2}} + \frac{0,02 + \sin \frac{92}{2}}{53,4 \cdot \cos \frac{92}{2} - \sin \frac{92}{2}} \right) = 759,23 \quad \text{кгс}$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{Q_1^2 + T_1^2}}{i_p} k_p, \quad P_1 = \frac{\sqrt{753,58^2 + 78,9^2}}{4} 1,3 = 246,25 \text{ кгс}, \quad P_2 = \frac{\sqrt{Q_2^2 + T_2^2}}{i_p} k_p,$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{759,23^2 + 28,26^2}}{4} 1,3 = 246,9 \quad (\text{кгс})$$

Для номінального навантаження 500 кгс, приймаємо стандартні роликопори [32] для приводу РП-0.5 та для холостого ходу РХП-0.5.

Розраховуємо сили на черв'ячному колесі [32]:

$$S = T_1 \frac{D_p}{D_{\text{ч}}}, \quad S = 78,9 \frac{41}{28,8} = 112,3 \quad (\text{кгс})$$

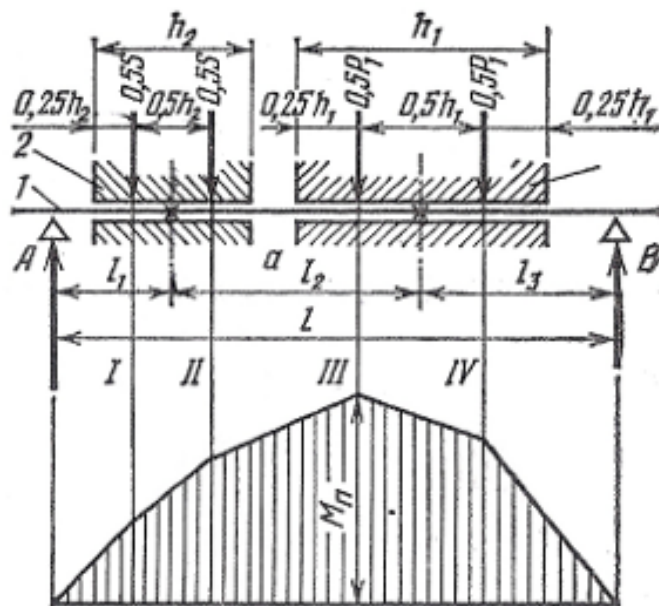


Рисунок 4.4 – Схема для розрахунку вала роликопор.

$$R_A = \frac{56 \cdot 34,75 + 56 \cdot 29,25 + 151 \cdot 18,875 + 151 \cdot 10,125}{40} = 199,075 \text{ (кгс)}$$

$$R_B = \frac{151 \cdot 29,875 + 151 \cdot 21,125 + 56 \cdot 10,75 + 56,5,25}{40} = 214,925 \text{ (кгс)}$$

$$M_1 = 199,075 \cdot 5,25 = 10,45 \text{ (кгс·см)}, \quad M_2 = 199,075 \cdot 10,75 = 18,32 \text{ (кгс·см)}$$

$$M_3 = 214,925 \cdot 18,875 = 2735,459 \text{ (кгс·см)}, \quad M_4 = 214,925 \cdot 10,125 = 2176,115 \text{ (кгс·см)}$$

$$M_{kp} = T_1 \frac{D_p}{2} + \left(f \frac{d_6}{2} + \mu \right) \sqrt{Q_1^2 + T_1^2}, \quad M_{kp} = 78,9 \frac{41}{2} + \left(0,02 \frac{7}{2} + 0,3 \right) \sqrt{753,58^2 + 78,9^2} = 1897,79$$

$$M_3 = \sqrt{M_u^2 + M_{kp}^2}, \text{ (кгс·см)}$$

$$d_6 = \sqrt[3]{\frac{10M_3}{[\sigma]}}, \quad d_6 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 3329,31}{600}} = 3,81 \text{ (см)}$$

В результаті для роликпори приволу отримаємо наступні розміри:

$$l = 400\text{мм}; \quad l_1 = 80\text{мм}; \quad l_2 = 175\text{mm}; \quad l_3 = 145\text{mm}; \quad h_1 = 17,5\text{mm}; \quad h_2 = 110\text{мм}.$$

Також приведемо розрахунок потужність електроприводу, [2]:

$$N_6 = \frac{M_{kp} n_m}{97500}, \quad N_6 = \frac{1897,79 \cdot 10}{97500} = 0,194\text{кВт} = 194\text{Вт}, \quad N = \frac{N_6}{\eta_o}, \quad N = \frac{0,194}{0,40} = 0,485\text{кВт},$$

$$\kappa_{cu} = \frac{Q_1 \varphi}{T_1} \geq 3, \quad \kappa_{cu} = \frac{753,58 \cdot 0,35}{78,9} = 3,34 \geq 3.$$

Оскільки пробуксовування не має, можемо обрати електропривід 0,5 кВт.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних шкідливостей на зварювальній дільниці. Заходи щодо їх зниження

Зварювальна дільниця належить до виробничих підрозділів з підвищеним рівнем небезпеки, оскільки під час напівавтоматичного електродугового зварювання у середовищі вуглекислого газу на працівників одночасно діє комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Їх вплив безпосередньо пов'язаний як з технологічним процесом зварювання, так і з умовами організації робочого місця.

До основних небезпечних факторів належать механічні травми, які можуть виникати під час підготовки та переміщення важких зварюваних конструкцій, а також у процесі виконання зварювальних операцій. Додаткову небезпеку становлять опіки, спричинені бризками розплавленого металу та шлаку, а також дія високих температур зварювальної дуги та пальника. Значну загрозу для здоров'я зварника створює можливість ураження електричним струмом у разі порушення ізоляції струмопровідних частин або недотримання вимог електробезпеки.

Серед шкідливих виробничих факторів провідне місце займає вплив хімічних речовин. Під час зварювання в повітря робочої зони надходять зварювальні аерозолі та гази, що містять оксиди металів, пари цинку, свинцю, кадмію, хрому та інші небезпечні сполуки. За відсутності ефективної вентиляції їх концентрація може перевищувати допустимі рівні, що підвищує ризик гострих і хронічних професійних захворювань органів дихання. Окрім цього, на зварювальній дільниці присутній підвищений рівень шуму від роботи зварювального обладнання, а також інтенсивне ультрафіолетове, інфрачервоне та видиме випромінювання зварювальної дуги, що негативно впливає на зір і шкірні покриви працівників.

При напівавтоматичному електродуговому зварюванні у вуглекислому газі слід дотримуватися визначеного комплексу правил охорони праці, які відображаються в технологічному процесі. При проведенні зварювальних робіт можливість небезпечного впливу на зварника у зв'язку з наступними факторами: а) травми різного роду механічного характеру при підготовці важких виробів до зварювання і

в процесі зварювання; б) опіки від крапель розплавлено-го металу і шлаку при зварюванні; в) отруєння шкідливими газами, які виділя-ються при зварюванні і при забрудненні приміщень пилом; г) ураження елект-ричним струмом при дотиканні людини до струмопровідних частин електрич-ного кола; д) ураження променями електричної дуги очей і відкритої поверхні шкіри.

Зварювання ємностей проводиться на зварювальній дільниці, в якому знахо-диться обладнання із струмопровідними частинами. Щоб знизити ризик шкоди здо-ров'ю, необхідно дотримуватися електробезпеки. Основні правила для зварників при цьому наступні: електроосвітлення можна запитувати тільки від струму 12 В; максимальна напруга холостого ходу зварювального апарату – 90 В; до включення обладнання перевіряється заземлення чи підключення до нуля; необхідно переві-рити якість дроту – надійна ізоляція має на увазі відсутність тріщин, пропалів; еле-ктроживлення здійснюється через розподільний пристрій, оснащений запобіжни-ками; довжина дроту понад 10 метрів не допускається; якщо був обрив кабелю або пошкоджена ізоляція, допустиме лише муфтове з'єднання двох шматків.

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

В умовах підприємств з зварювальним обладнанням в повітрі знаходяться ае-розолі різного походження, розмірів, форми і концентрації. На зварювальній діль-ниці – це конденсаційні аерозолі, що утворилися при зварюванні, прибиранні при-міщень, переміщенні внутрішнього обладнання.

Для захисту органів дихання, при зварюванні ємностей використовують рес-піратори великої пилеємності та вентиляційні системи. Робоче місце зварника по-винне вентилюватись місцевою витяжною вентиляцією з подачею повітря 40 м³/год

на кожного робітника (рис. 5.1). Якщо деталі, що зварюються, мають велику протяжність швів, можна влаштовувати вентиляційні відсмоктування гнучкими рукавами. Їхнє пересування в процесі зварювання узгоджується з рухом зварювальної дуги по деталі. Вентиляційна витяжка повинна розташовуватися так, щоб газів, що виділяються при зварюванні, проходили осторонь від зварювальника. У процесі роботи в замкнутих обсягах у зону роботи зварювальника необхідно подавати чистий атмосферне повітря за допомогою повітрорудки або забезпечити працюючого шланговим протигазом марки ПШ-2 або ПШ-1 та рятувальним поясом з прикріпленою до нього міцною мотузкою.

Для захисту очей та особи зварювальників від шкідливої дії променистої енергії зварювальної дуги слід застосовувати щиток або маску зі спеціальними світлофільтрами залежно від сили зварювального струму: Е-1 – до 75 А, Е-2 – від 75 до 200 А, Е-3 – від 200 до 400 А, ЕС-100, ЕС-300, ЕС-500. Для захисту світлофільтрів із зовнішнього боку їх закривають безбарвним склом, які в міру забруднення замінюють новими. Допоміжні робітники повинні бути забезпечені окулярами або масками зі світлофільтрами В-2 або В-3. При зачистці зварювальних швів робітників забезпечують захисними окулярами.

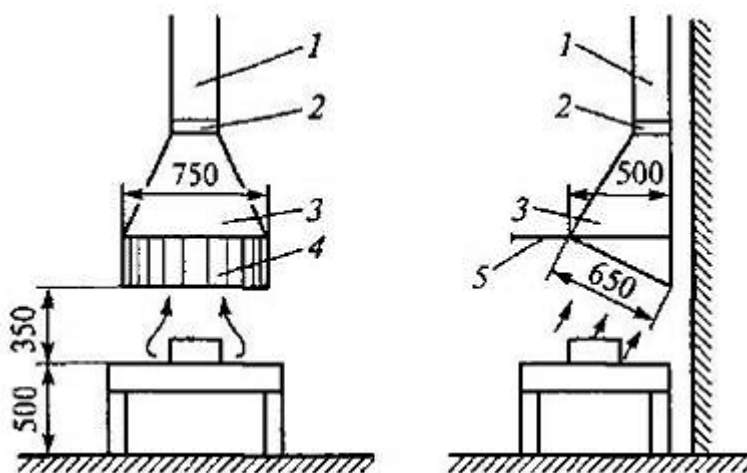


Рисунок 5.1 - Схема витяжної вентиляції газів, що виділяються при зварюванні від зварювального посту: 1 - повітропровід; 2 – шибер; 3 - повітроприймач; 4 - штамповані ґрати; 5 - дашок

Таким чином, зниження рівня виробничих ризиків на зварювальній ділянці досягається завдяки поєднанню технічних, організаційних і санітарно-гігієнічних заходів, а також обов'язковому використанню засобів індивідуального захисту. Систематична ідентифікація небезпечних і шкідливих факторів та впровадження заходів управління ризиками є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці та збереження здоров'я зварювального персоналу, [33].

5.2 Розрахунок захисного заземлюючого пристрою

Захисне заземлення – передбачене з'єднання з землею або її еквівалентом металічних не струмоведучих частин, які можуть випадково бути під напругою.

Захисне заземлення є ефективною мірою захисту при живленні електроустановки від електричних мереж напругою до 1000 В з ізольованою нейтраллю і напругою більше 1000 В з любым режимом нейтралі.

У відповідності ПУЕ захисне заземлення потрібно виконувати при паузі змінного струму 380 В і більше і постійного струму 440В і більше у всіх електроустановках; при номінальній напрузі змінного струму більше 42 В і постійного струму більше 110 В - тільки в електроустановках, які розміщені в приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних, а також в зовнішніх установках; при любой напрузі змінного і постійних струмів, у вибухо-небезпечних установках.

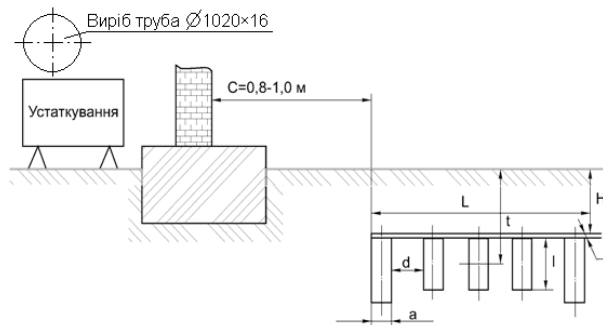
Захисна дія заземлення основана на зниженні напруги дотику, що досягається шляхом зменшення потенціалу на корпусі устаткування відносно поверхні землі.

Заземлюючим пристроєм називається наявність заземлювача (металевого провідника чи групи провідників, які безпосередньо знаходяться в контакті із землею) і заземлюючих провідників, які з'єднують частини електроустановки із заземлювачем.

Матеріалом захисного заземлюючого пристрою є сталь. В залежності від розміщення заземлювачів по відношенню до устаткування, яке заземлене – заземлення буває виносне і контурне.

Метою розрахунку є визначення кількості і розмірів заземлювачів і складання плану розміщення заземлювачів.

Схема розрахунку захисного заземлюючого пристрою для технологічного устаткування показано на рисунку 5.2 [33].



C – відстань від стіни до заземлювачів; L – довжина заземлювача;

H – відстань на яку заглиблений заземлювач; b – ширина стрічки;

l – довжина кутників; d – крок.

Рисунок 5.2 – Схема розрахунку заземлюючого пристрою

Вихідні дані для розрахунку захисного заземлення дільниці з виробничими установками, які живляться від мережі напругою 380В з ізольованою нейтраллю. В якості електродів – заземлювачів приймаємо сталеві конструкційки (кутники) довжиною l і діаметром d , які з'єднані між собою сталеву смужкою шириною $a = 0,04$ м, що показано на рисунку 5.2. Коефіцієнти використання заземлювачів η_z і з'єднувальної стрічки η_c . Крок між заземлювачами рівний d . Заглиблення верхнього кінця конструкційки і з'єднувальної стрічки $H = 0,7$ м. Питомий опір ґрунту ρ Дано: $\rho = 150$ Ом м; $l = 3$ м; $a = 0,045$ м; $d = 6$ м; $\eta_z = 0,74$; $\eta_c = 0,75$.

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту ρ_p в якому мав бути розміщений заземлювач за формулою: $\rho_p = \rho \cdot \psi$, де ψ – кліматичний коефіцієнт, який вибирається в залежності від вологості ґрунту, $\psi = 1,32$.

$$\text{Звідси: } \rho_p = 150 \cdot 1,32 = 198 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо опір розтікання струму одного вертикального заземлювача (конструкцій), заглибленого нижче рівня землі на $H = 0,7$ м за формулою:

$$R_3 = \frac{\rho}{2 \times \pi \times \ell} \times \left(\ell_n \frac{2\ell}{d} + \frac{1}{2} \ell_n \frac{4t + \ell}{4t - \ell} \right),$$

де, $t = H + 0,5 \times l$ – відстань від поверхні ґрунту до середини конструкції;

$$t = 0,7 + 0,5 \times 3 = 2,2 \text{ м}$$

$$R_3 = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 3} \times \left(\ell_n \frac{2 \cdot 3}{0,045} + \frac{1}{2} \ell_n \frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) = 41,7 \text{ Ом.}$$

Визначаємо необхідну кількість заземлювачів за формулою:

$$n = \frac{R_3}{R_i \times \eta_3}, \quad \text{де } R_n - \text{нормований опір заземлюючого пристрою (ПУЕ).}$$

$$n = \frac{41,7}{4 \times 0,74} = 14.$$

Визначаємо опір розтікання струму з'єднувальної смуги за формулою:

$$R_c = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L_c} \times \ell_n \frac{2 \times L_c}{\hat{a} \times H},$$

$$R_c = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 81,9} \times \ell_n \frac{2 \times (81,9)^2}{0,04 \times 0,7} = 3,81 \text{ Ом.}$$

Визначаємо довжину з'єднувальної смуги, якщо електроди розміщені в ряд:

$$L_c = 1,05 \cdot d \cdot (n-1).$$

Якщо, смуги розміщені по контуру, то:

$$L_c = 1,05 \cdot d \cdot n = 1,05 \cdot 6 \cdot 14 = 88,2 \text{ м}; \quad L_c = 1,05 \cdot 6 \cdot (14-1) = 81,9 \text{ м.}$$

Визначаємо загальну величину опору розтікання струму заземлюючого пристрою за формулою:

$$R_{\text{зп}} = \frac{R_3 \times R_c}{R_3 \times \eta_n + R_c \times \eta_3 \times n},$$

$$R_{\text{зп}} = \frac{41,7 \cdot 3,81}{41,7 \cdot 0,46 + 3,81 \cdot 0,74 \cdot 14} = 2,71 \text{ Ом}$$

Величина опору штучних заземлювачів задовольняє вимогу $R_{\text{зп}} \leq 4 \text{ Ом}$.

5.3 Організація цивільного захисту на об'єктах господарської діяльності

Організація цивільного захисту на об'єктах господарської діяльності здійснюється відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України, який є базовим

нормативно-правовим актом у цій сфері та визначає обов'язки суб'єктів господарювання щодо захисту працівників, створення системи управління цивільним захистом, навчання персоналу, забезпечення засобами індивідуального і колективного захисту та утримання захисних споруд. Загальні засади функціонування цивільного захисту в особливий період доповнюються положеннями Закону України «Про оборону України» та Закону України «Про правовий режим воєнного стану», які регламентують діяльність підприємств в умовах загрози або збройної агресії. Обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов праці, у тому числі під час надзвичайних ситуацій, визначаються Законом України «Про охорону праці», а спеціальні вимоги до підприємств з підвищеним рівнем техногенної небезпеки — Законом України «Про об'єкти підвищеної небезпеки». Питання підготовки працівників до дій у надзвичайних ситуаціях, утворення формувань цивільного захисту, забезпечення засобами захисту та створення фонду захисних споруд деталізуються у відповідних постановах Кабінету Міністрів України, які конкретизують та забезпечують практичну реалізацію положень Кодексу цивільного захисту України на рівні підприємств, [34].

Основним завданням цивільного захисту є: а) запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру, проведення заходів щодо зменшення збитків і втрат під час аварій, катастроф, великих пожеж та стихійного лиха; б) оповіщення населення про загрозу і виникнення надзвичайних ситуацій у мирний та воєнний час, постійне інформування про наявну ситуацію та його захисту від наслідків; в) організація життєзабезпечення населення під час аварій, катастроф, стихійного лиха та у воєнний час; г) організація та проведення рятувальних та інших невідкладних робіт у районах лиха і осередках ураження; д) створення систем аналізу і прогнозування управління, оповіщення і зв'язку, спостереження і контролю за ради активними, хімічними, бактеріологічними зараженнями; е) підготовка і перепідготовка керівного складу цивільної оборони, її органів управління та сил, навчання населення вмінню використовувати засоби індивідуального захисту і діяти в надзвичайних ситуаціях.

Структура цивільного захисту на державному підприємстві формується за принципом єдиноначальності та чіткого функціонального розподілу повноважень з урахуванням вимог воєнного стану та рішень органів державної влади і військових адміністрацій. Керівник підприємства за посадою є начальником цивільного захисту об'єкта і здійснює загальне керівництво системою цивільного захисту, забезпечує виконання обов'язкових заходів щодо укриття працівників, оповіщення, евакуації та підтримання готовності захисних споруд відповідно до встановленого режиму.

Для організації та практичної реалізації заходів цивільного захисту керівником призначаються заступники начальника цивільного захисту та відповідальні посадові особи, а на підприємствах із підвищеним рівнем небезпеки або значною чисельністю персоналу створюється структурний підрозділ (служба, сектор) з питань цивільного захисту. З метою координації дій і прийняття управлінських рішень у разі виникнення надзвичайних ситуацій на підприємстві утворюється комісія з питань надзвичайних ситуацій, а за необхідності — евакуаційні органи, діяльність яких узгоджується з територіальними органами цивільного захисту та військовими адміністраціями.

Безпосереднє виконання заходів цивільного захисту покладається на об'єктові формування цивільного захисту, що створюються з числа працівників підприємства у формі постів, ланок, груп або команд. Зазначені формування призначені для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт, забезпечення життєдіяльності персоналу в укриттях, участі в евакуаційних заходах та виконання завдань цивільного захисту в умовах загроз, пов'язаних зі збройною агресією та надзвичайними ситуаціями. Інженерно-технічні заходи мають забезпечити підвищену стійкість виробничих споруд, технологічних ліній, устаткування, комунікацій об'єкта до впливу вражаючих факторів під час надзвичайних ситуацій, [34, 35].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У відповідності із завданням, матеріалів розрахунково-пояснювальної записки приводимо висновки кваліфікаційної роботи магістра.

Технологію зварювання стратифікаційної ємності геліоколектора удосконалено шляхом виконання складально-зварювальних робіт на одному стенді. Для зварювання поздовжнього шва обичайки стратифікаційної ємності запропоновано застосовувати автоматичне зварювання в захисній суміші газів $\text{Ar} + 18 \% \text{CO}_2$ із використанням автомата АД-135, що забезпечує стабільність параметрів процесу та підвищує ефективність зварювання. Для виконання кільцевих швів днищ і обичайки, а також для операцій прихоплення, запропоновано використання інноваційного зварювального обладнання — зварювального апарата Fronius TransSteel 3000C Pulse, який працює в імпульсному режимі в суміші газів $\text{Ar} + 18 \% \text{CO}_2$. Застосування такого режиму дозволяє зменшити кількість дефектів, покращити структуру металу та підвищити механічні властивості зварного шва. Для зварювання рекомендовано використовувати зварювальний дріт SG2, спеціально розроблений для роботи в газових сумішах на основі аргону. З метою покращення захисту зварювальної ванни обрано пальник Fronius MTW/MTB 400i, який дозволяє проводити багатоканальну економну подачу захисного газу та володіє підвищеним рівнем термозахисту.

У результаті досліджень впливу імпульсного режиму зварювання на макрота мікроструктуру зварного шва і його властивості встановлено область параметрів імпульсного режиму, в якій відбувається подрібнення мікроструктури металу шва та зони сплавлення. На основі математичного аналізу термічного циклу зварювання та діаграми анізотермічного розпаду аустеніту сталі P265GH виконано прогнозування структури та властивостей ділянки перегрівання зони термічного впливу при розрахованих режимах зварювання. Спрогнозовано формування ферито-перлітної структури, що забезпечує достатній рівень механічних властивостей.

Крім того, у роботі значну увагу приділено вибору раціонального обладнання, допоміжним технологічним пристроям та їх розрахунку, питанням контролю якості готового виробу, організації безпечних умов праці та заходам з цивільного захисту.

Впровадження запропонованих технічних і технологічних рішень дозволить підвищити якість зварних швів, ефективність зварювальних робіт, зменшити витрати матеріалів і ресурсів, а також скоротити обсяг ручної праці у виробничому процесі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ghaddar N. K. Stratified storage tank influence on performance of solar water heating system tested in Beirut // *Renewable Energy*. – 1994. – Т. 4, № 8. – С. 911–925. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90225-9)
2. Li Q., Huang X., Tai Y., Gao W., Wenxian L., Liu W. Thermal stratification in a solar hot water storage tank with mantle heat exchanger // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 173, С. – Р. 1–11. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.105>
3. Karim A., Burnett A., Fawzia S. Investigation of stratified thermal storage tank performance for heating and cooling applications // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, Iss. 5. – Art. 1049. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/5/1049>
4. Сталь 16К. [Електронний ресурс] / Метінвест-СМЦ. -Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-16k/>
5. Сталь 20К. [Електронний ресурс] / Метінвест-СМЦ. -Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-20k/>
6. Сталь P265GH. [Електронний ресурс] / Метінвест-СМЦ. -Режим доступу: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-p265gh/>
7. SteelNumber. P235GH (1.0345): Chemical composition and mechanical properties (EN 10028-2) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=437
8. Kasińska M., Towarnicki K., Piwowarczyk T., Ambroziak A.: Badania złączy spawanych ze stali P265GH wykonanych z zastosowaniem różnych mieszanek gazowych oraz gatunków drutów spawalniczych. *Przegląd Spawalnictwa*, 2016, vol. 88. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.26628/ps.v88i8.643>.
9. A novel method of supporting the laser welding process with mechanical vibrations [Електронний ресурс] / M. Kujawa, M. Saternus, T. Chmielewski [et al.] // *Materials*. — 2020. — Vol. 13, Iss. 19. — Article 4299. — Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7560479/>
10. ДСТУ-Н Б А.3.1-32:2015 Настанова щодо монтажу та зварювання посудин, що працюють під тиском, при будівництві будівель та споруд. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіон України, 2015. – 46 с. — Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63745

11. Костін О.М. Зварювальні матеріали: Навч. посібник. – Миколаїв: НУК, 2004. – 225 с.
12. Романів В. Є. Особливості застосування сумішей захисних газів при напівавтоматичному зварюванні плавким електродом / В. Є. Романів, В. В. Лазарюк // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 18–19. — (Фізико-технічні основи розвитку нових технологій).
13. Бугінов А. Вплив складу захисного газу на процес МАГ зварювання низьколегованих та вуглецевих сталей // Зварник, 2014, №1, С.32-35.
14. Паспорт на зварювальний дріт Св-08Г2С. – К., ПАТ «ПАТОН», [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://paton.ua/upload/files/SV-08G2S.pdf>
15. ESAB OK Autrod SG2: Data Sheet / ESAB Europe GmbH. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.esab.eu/eur_en/products/consumables/mig-mag-wires/non-alloyed-steel/ok-autrod-sg2.cfm
16. Зварювальний дріт GEKA SG2 (ER 70 S-6) діаметр 1.2 мм. [Електронний ресурс] / Osnastka. Режим доступу: <http://osnastka.kiev.ua/index.php?productID=1263>
17. Потапєвский А. Г. Зварювання в захисних газах плавким електродом. – К.:Екотехнологія, 2007. – 192 с.
18. Акулов А.І. Технологія та обладнання зварювання плавленням: Підр. Длі вишів [Текст] / А.І. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич; [Ред. вид. Т.Е. Черешнева]. - М.: Машинобудування, 1977. - 432 с.
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. Ebrahimnia, M., Goodarzi, M., Nouri, M., & Sheikhi, M. (2009). Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding. *Materials & Design*, 30(9), 3891–3895. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.031>

21. Gadallah R., Fahmy R., Khalifa T., Sadek A. Influence of shielding gas composition on the properties of flux-cored arc welds of plain carbon steel. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2(1), 1–12, 2012.
22. Каталог продукції Aramis 2025. [Електронний ресурс] / Aramis. Режим доступу: https://aramis.ua/wp-content/uploads/2025/04/katalog_aramis-2025.pdf
23. Ахметов А.Р. Автоматичне зварювання корпусів теплообмінних апаратів "Технологія суднобудування" №1, 1984 - 24-27с.
24. Пристрої TransSteel Compact / Fronius TransSteel 3000 C PULSE. [Електронний ресурс] / Fronius. Режим доступу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tekhnologiyi/produkty/%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B5-%D0%B7%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F/migmag/transsteel/transsteel-compact/transsteel-3000-c-pulse>
25. MTW – зварювальні пальники. [Електронний ресурс] / Fronius / Режим доступу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryuvalni-tekhnologiyi/informatsiya-pro-produkt/mig-mag-torches/water-cooled-mig-mag-welding-torches?referer=>
26. Series MTG / MTW · 840VTM0135. [Електронний ресурс] / schweiss-shop.de / Режим доступу: <https://www.schweiss-shop.de/en/fronius/fronius-wear-parts-mtg-400i-mtb-400i-g-ml-gas-nozzle-o15-o25x75-ct-m23-x-2/840VTM0135#name>
26. Яцюк В. О.; Вознюк А. Ю.; Лазарюк В. В. Особливості застосування капілярного методу неруйнівного контролю зварних з'єднань тонкостінних конструкцій // Актуальні задачі сучасних технологій : Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів – Тернопіль, 6-7 грудня 2023 року / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – с. 7-8.
27. Набір для проведення кольорової дефектоскопії виробництва ДП «КОЛОРАН», <<https://gp-koloran.uaprom.net/ua/a413315-instruktsiya-provedennyu-kapilyarnogo.html>>
28. Дефектоскоп TOPAZ 32. [Електронний ресурс] / industry.hlr.ua. Режим доступу: <https://industry.hlr.ua/nodestructtest/ultrasonic-flaw-detection/ultrasonic-phased-array-method/manual-control/topaz32-phased-array-device/>

29. Shanaida V., Skliarov R., Lazaryuk V. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations // Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, 22–24 Nov. 2023. – CEUR Workshop Proceeding, 2023. V. 3628.
30. Коперсак, В.М. Теорія процесів зварювання [Текст]: Текст лекцій (в двох частинах) / В.М. Коперсак – 4-е вид., випр. і доп. –К.: НТУУ «КПІ».-228 с.
31. Здатність до зварювання конструкційних матеріалів. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни для студентів напряму 050504 «Зварювання» // Укладачі: О.А. Сливінський, Н.М.Стреленко. - К.: НТУУ «КПІ», – 2012.
32. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві / 2-е видання, перобл. та доповн.: Навч. посібник / 26 А.С. Карпенко. – К.: Арістей, 2006. – 272 с.
33. Лут М. Т., Радько І. П., Ковтун П. М., Окушко О. В. Охорона праці (електробезпека) : навчальний посібник. — Київ : Компрінт, 2017. — 355 с.
34. Надзвичайні ситуації та цивільний захист населення. / За редакцією С. П. Сонька. — Львів: Видавництво ПП "Магнолія 2006", 2025. — 304 с.
35. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях : Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня “магістр” всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
36. Окіпний І. Б., Сенчишин В. С., Ткаченко І. Г., Комар Р. В., Дячун А. Є. Кваліфікаційна робота магістра : методичні вказівки для здобувачів другого (освітньо-професійного) рівня вищої освіти за спеціальністю G9 Прикладна механіка галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 40 с.