

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня
бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розроблення технологічного процесу зварювання
корпуса насоса**

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

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Варениця В.Я.</u> (підпис)	<u>Варениця В.Я.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Сенчишин В.С.</u> (підпис)	<u>Сенчишин В.С.</u> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Дячун А.Є.</u> (підпис)	<u>Дячун А.Є.</u> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Окіпний І.Б.</u> (підпис)	<u>Окіпний І.Б.</u> (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u></u> (підпис)	<u></u> (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: " Розроблення технологічного процесу зварювання корпусу насоса" складається із розрахунково-пояснювальної записки об'ємом 67 аркушів формату А4 і графічної частини об'ємом 5 аркушів формату А1. Розрахунково-пояснювальна записка складається із таких частин: аналітична, технологічна, конструкторська та безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Кваліфікаційна робота присвячена розробці науково обґрунтованого технологічного процесу виготовлення зварного корпусу насоса типу НЦСГ-Е-180, що широко застосовується в системах перекачування технічних рідин. З урахуванням конструктивних особливостей виробу, вимог до міцності, герметичності та стійкості до корозійних впливів, проведено техніко-технологічний аналіз із визначенням оптимального методу зварювання. У якості основного способу обрано автоматизоване дугове зварювання плавким електродом у захисному середовищі газів (MIG/MAG), реалізоване за допомогою сучасного роботизованого комплексу. У процесі роботи виконано деталізацію заготівельних операцій, визначено раціональні послідовності складання та зварювання, а також розроблено маршрут виготовлення з урахуванням особливостей геометрії корпусу. Встановлено параметри зварювального режиму, що забезпечують повноцінне проплавлення металу, мінімізацію теплових деформацій і стабільність формування шва. Розглянуто застосування спеціалізованого зварювального обладнання, джерел живлення та позиціонерів, які забезпечують необхідну якість з'єднань при вертикальному розміщенні виробу. Запропоновано систему технічного контролю якості зварних швів із використанням капілярних та ультразвукових методів неруйнівного контролю.

Результати дослідження мають практичну цінність для підприємств, що спеціалізуються на виробництві насосного обладнання, та можуть бути впроваджені.

Ключові слова: АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, РОБОТ, ВИРОБНИЦТВО, КОРПУС, ПОЗИЦІОНЕР-ОБЕРТАЧ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Опис конструкції виробу	7
1.2 Характеристика матеріалу виробу.....	11
1.3 Технічні умови на виготовлення виробу.....	13
1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу	21
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	24
2.1 Обґрунтування способу зварювання	24
2.3 Вибір методу контролю якості виробу.....	43
2.4 Опис запропонованого технологічного процесу	47
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	52
3.1 Пристосування для зварювання корпусу насоса.....	56
3.2 Розрахунок силових параметрів для усунення геометричних відхилень обичайки після формоутворення	52
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	60
4.1 Вимоги безпеки, що ставляться до виробничого процесу	60
4.2 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу та експлуатації обладнання.....	62
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65
ДОДАТКИ	67

ВСТУП

Механізація та автоматизація процесів зварювального виробництва виступають ключовими чинниками підвищення ефективності праці, забезпечення стабільної якості зварних з'єднань та покращення умов праці на виробництві.

На сучасному етапі розвитку галузі особливого значення набувають процеси модернізації та заміни технічно застарілого обладнання, а також розширення виробництва спеціалізованих зварювальних машин і допоміжного оснащення загального призначення. Особливу увагу приділяють впровадженню обладнання з програмно-керованими системами, розробці інноваційних технологічних рішень і впровадженню засобів малої механізації, які у взаємодії з основним зварювальним устаткуванням забезпечують комплексну механізацію виробничого процесу, підвищення його продуктивності та покращення умов праці персоналу.

Широке впровадження механізації допоміжних операцій, що дозволяє замінити ручну працю машинною. Використання ефективних засобів механізації у сфері складально-зварювальних робіт має вирішальне значення для підвищення конкурентоспроможності промислового виробництва. Впровадження сучасних систем малої механізації у трудомісткі етапи технологічного процесу формує підґрунтя для прискореного технічного прогресу, збільшення продуктивності праці та оптимізації техніко-економічних показників у машинобудівному комплексі [1].

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис конструкції виробу

Насос типу НЦСГ-Е-180 (рис. 1.1) належить до групи відцентрових горизонтальних насосів спеціального призначення та розроблений для перекачування агресивних і токсичних рідин, які мають високу температуру, хімічну активність та, у ряді випадків, схильні до кристалізації. Його експлуатація актуальна в умовах хімічної, нафтохімічної та атомної промисловості, де виникає потреба у надійному та герметичному транспортуванні рідких середовищ без втрати герметичності та з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Конструктивно насос НЦСГ-Е-180 є одноступінчастою горизонтальною машиною з осьовим підведенням рідини та радіальним відведенням. Робоче колесо відцентрового типу закріплене на консольному валу, який приводиться в обертання через пружну муфту від електродвигуна. Особливістю даного насоса є відсутність традиційного торцевого ущільнення — замість нього використовується герметична електромагнітна муфта, що забезпечує повну герметичність корпусу і виключає витіки перекачуваної рідини в навколишнє середовище [2].

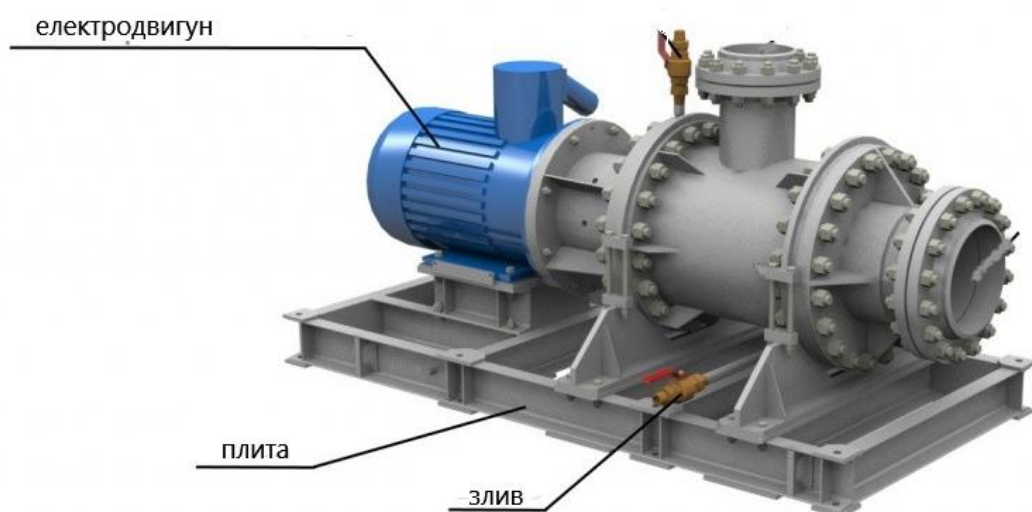


Рис. 1.1 – Насос НЦСГ-Е-180 [2]

Корпусна частина виготовляється з корозійностійких матеріалів, стійких до дії кислот, лугів і сольових розчинів. Конструкція насоса передбачає використання змінних втулок і захисних накладок у зонах підвищеного зносу, що подовжує строк його експлуатації та знижує потребу в частому технічному обслуговуванні. Усі елементи, що контактують із робочим середовищем, мають підвищену хімічну стійкість, що дозволяє ефективно експлуатувати насос навіть у складних умовах.

Інженерне виконання НЦСГ-Е-180 також враховує вимоги до роботи в умовах підвищеної вибухонебезпеки, тому насос комплектується електродвигунами у вибухозахищеному виконанні та має конструкційні елементи, що виключають можливість утворення іскор чи перегріву при тривалому навантаженні.

Конструкція насоса НЦСГ-Е-180 реалізована у горизонтальному виконанні з роз'ємним корпусом, що дозволяє здійснювати технічне обслуговування та ремонт без демонтажу насоса з фундаменту та без роз'єднання трубопроводів. Основними вузлами агрегату є: корпус насоса, робоче колесо, вал, підшипникові опори, магнітна муфта, підвідні та відвідні патрубки, а також герметичний кожух, який забезпечує безконтактну передачу крутного моменту.

Корпус насоса (рис. 1.2) виготовляється з корозійностійкого металу або сплаву, що обирається залежно від характеру робочого середовища. Його внутрішні поверхні можуть мати захисні покриття або змінні втулки, що зменшують зношування при абразивній дії перекачуваних рідин. Вхідний патрубок розташований по осі агрегату, що забезпечує рівномірний підвід рідини до центру робочого колеса, тоді як вихідний патрубок орієнтований радіально, з метою ефективного відведення потоку.

Для зручності експлуатації передбачено опорну раму або фундаментну плиту, до якої жорстко фіксується насосний агрегат. Такий монтаж виключає зсуви та перекоси під час роботи, особливо при високих динамічних навантаженнях.

Корпус насоса НЦСГ-Е-180 виконує не лише функцію захисної оболонки, а й є основним конструктивним елементом, що забезпечує механічну цілісність агрегату, точне розміщення внутрішніх вузлів і герметичність робочого простору.

Він виготовляється з хімічно стійких матеріалів (вуглецеві, леговані або нержавіючі сталі, іноді — спеціальні сплави), здатних витримувати тривалу дію агресивних, токсичних або високотемпературних рідин.

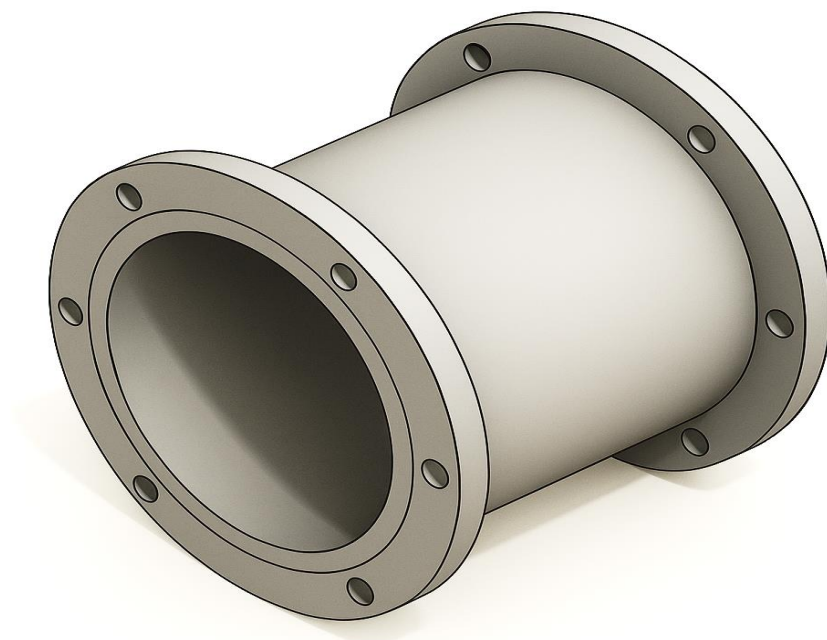


Рис. 1.2 – Конструкція корпусу насоса

Конструктивно корпус виконано у вигляді горизонтального спірального кожуха, всередині якого формуються необхідні умови для ефективного перетворення енергії потоку. Спіральна конфігурація забезпечує рівномірне збирання рідини з периферії робочого колеса та її направлення до вихідного патрубка з мінімальними гідравлічними втратами. Така форма також зменшує навантаження на лопатки та запобігає утворенню зон турбулентності.

Особливістю конструкції є наявність роз'ємного корпусу — двох половин (верхньої та нижньої частин), які з'єднані болтовими з'єднаннями по горизонтальній площині розділу. Це спрощує доступ до внутрішніх вузлів насоса під час регламентного обслуговування або ремонту, дозволяючи демонтувати робоче колесо, вал і підшипники без зняття корпусу з фундаменту та без від'єднання трубопроводних ліній.

У місцях ущільнення корпус обладнано прецизійно обробленими посадковими поверхнями, які гарантують герметичність з'єднань та запобігають витоку рідини. У разі потреби, в зонах найбільшого зносу передбачено встановлення змінних захисних втулок або кілець, що полегшують технічне обслуговування та подовжують строк служби корпусу в цілому.

Для забезпечення роботи в умовах високого тиску, корпус розрахований на відповідні навантаження за допомогою міцнісного розрахунку, виконаного згідно з нормами ДСТУ, EN або ASME (залежно від виробника). За потреби він може мати посилені ребра жорсткості, які підвищують опірність деформаціям та вібраціям.

Корпус насоса є жорсткою та герметичною конструкцією, що виконує функцію захисної оболонки та опорного елементу для внутрішніх механізмів агрегату. Він складається з циліндричної оболонки та двох торцевих дисків, утворюючи єдиний зварний вузол.

Циліндрична частина корпусу виконана у вигляді циліндра з зовнішнім діаметром 630 мм та внутрішнім 600 мм товщиною стінки 15 мм. Циліндр формує основний об'єм корпусу і слугує камерою, в якій розташовуються робочі органи насоса. Довжина циліндра становить 500 мм, що забезпечує достатній простір для розміщення гідравлічного тракту, вала, ущільнюючих елементів та опорних вузлів.

З обох боків до циліндра приварюються два торцеві диски, кожен з яких має зовнішній діаметр 600 мм. Товщина кожного диска становить 8 мм, що є оптимальним значенням для сприйняття осьових навантажень, збереження геометричної стабільності та мінімізації ваги конструкції.

Зварні з'єднання між циліндричною частиною та торцевими дисками виконуються із дотриманням вимог до герметичності, міцності та технологічності. Конструкція передбачає осеву симетрію та концентричність отворів, що є критично важливими для зниження радіального биття обертових елементів насоса. За необхідності, в торцеві частини можуть вбудовуватись фланцеві з'єднання або опорні елементи підшипникових вузлів.

1.2 Характеристика матеріалу виробу

Матеріали, що застосовуються для виготовлення корпусів насосів типу НЦСГ-Е-180, мають відповідати вимогам робочої конструкторської документації, нормативно-технічним регламентам, а також положенням чинних державних стандартів (ДСТУ) і технічних умов (ТУ). Якість металу повинна бути підтверджена сертифікованим контролем відповідності — насамперед щодо хімічного складу та механічних характеристик, установлених проектними нормами.

Для виготовлення корпусу доцільно використовувати сталь марки 10ХГСНД, яка є різновидом низьколегованої сталі з підвищеним вмістом марганцю, хрому та нікелю. Цей матеріал відзначається високою зварюваністю, достатньою конструкційною міцністю, атмосферостійкістю та стабільністю під дією змінних температур і циклічних навантажень. Механічні характеристики сталі 10ХГСНД наведено в табл. 1.1, а її хімічний склад — у табл. 1.2.

Таблиця 1.1 - Механічні властивості сталі [3]

Сортамент	Розмір	s_B	s_T	δ_5	KCU
	мм	МПа	МПа	%	кДж / м ²
Лист,	5-9	540	400	19	

Таблиця 1.2 - Хімічний склад сталі 10ХГСНД [3]

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>Cu</i>	<i>As</i>
до 0.12	0.8 — 1.1	0.5 — 0.8	0.5 — 0.8	до 0.035	до 0.03	0.6 — 0.9	до 0.12	до 0.008	0.4 — 0.6	до 0.08

Сталь марки 10ХГСНД належить до низьколегованих конструкційних сталей з підвищеною атмосферостійкістю та доброю технологічною зварюваністю, що дозволяє її ефективно застосовувати в широкому діапазоні технологічних умов. Матеріал придатний як для зварювання з використанням попереднього підігріву (до 100–120 °С) та подальшої термообробки, так і для з'єднання без додаткової термічної підготовки, залежно від конструктивних особливостей і експлуатаційного режиму виробу.

Одним із визначальних факторів, що забезпечує високу якість зварного з'єднання, є понижений вміст вуглецю — менше 0,25 %. Це істотно знижує ймовірність утворення гартівних структур, мікропор або крихких фаз, які можуть виникати в процесі зварювання за рахунок локального перегріву та нерівномірного охолодження.

У разі перевищення рекомендованого вмісту вуглецю у зварному шві можуть формуватись гартівні мікроструктури, а також мікропористість, викликана вигоранням вуглецю, що негативно впливає на механічну міцність, пластичність та довговічність з'єднання.

Водночас сталь 10ХГСНД демонструє високу тріщиностійкість, стабільність в'язкісних властивостей після термічної обробки (відсутність схильності до відпускнуї крихкості) та стійкість до перегріву, що робить її надійним матеріалом для відповідальних зварних конструкцій.

Для зниження твердості шва та нейтралізації гартівного ефекту рекомендується застосування відпускнуї термічної обробки при температурі близько 650 °С. Час витримки визначається відповідно до товщини зварюваного елементу й орієнтовно становить 1 годину на кожні 25 мм товщини металу. Після термообробки конструкцію охолоджують контрольованим способом — на повітрі або в гарячій воді — з метою уникнення термічних напружень і забезпечення рівномірного розподілу температури в металі.

Кількісна оцінка зварюваності сталі здійснюється за показником еквівалентного вмісту вуглецю (C_e), що дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу під час зварювання, а також ризики утворення холодних тріщин, гартівних зон і внутрішніх дефектів [4].

$$C_e = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + V + Mo}{10} \quad (1.1)$$

$$C_e = 0.12 + \frac{0.5}{20} + \frac{0.5}{15} + \frac{1.02}{10} = 0.28\%$$

Результати експериментальних випробувань, а також аналіз практики експлуатації в умовах зварювального виробництва засвідчують, що сталь марки 10ХГСНД демонструє низьку схильність до утворення гарячих тріщин у зоні шва, що є одним із ключових показників її надійності при зварюванні.

Одним із визначальних критеріїв технологічної зварюваності матеріалу є еквівалентний вміст вуглецю (С_е), значення якого для сталі 10ХГСНД не перевищує 0,28. Це вказує на відсутність необхідності в обов'язковому попередньому підігріванні або застосуванні спеціальних технологічних заходів перед початком зварювальних робіт, що істотно спрощує виробничий процес.

Значення еквівалентного вмісту вуглецю в сталі 10ХГСНД відповідає параметрам, характерним для групи добре зварюваних конструкційних сталей, за умови дотримання встановлених технологічних режимів зварювання. Особливо важливою є здатність матеріалу зберігати стабільність зварного з'єднання при виконанні робіт у температурних умовах, вищих за -10°C . У таких межах температури істотно знижується ризик утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу (ЗТВ), що обумовлено як менш інтенсивним охолодженням металу після зварювання, так і позитивним впливом температури на кінетику фазових перетворень у металі шва [4].

Крім того, хімічний склад сталі 10ХГСНД, зокрема наявність легуючих елементів, сприяє формуванню дрібнозернистої структури в зоні наплавленого металу. Така структура забезпечує підвищену стійкість до тріщиноутворення, зменшуючи ймовірність появи як гарячих, так і холодних тріщин. Зазначені особливості істотно покращують зварювально-технологічні характеристики сталі, забезпечуючи високу якість з'єднань без потреби у складних компенсувальних технологічних заходах.

1.3 Технічні умови на виготовлення виробу

Процес виготовлення корпусів посудин, призначених для роботи в умовах надлишкового тиску, є відповідальним етапом технологічного циклу і

регламентується комплексом чинних нормативно-технічних документів, зокрема державними стандартами (ДСТУ), галузевими положеннями, технічними умовами (ТУ), а також вимогами затвердженої конструкторської документації. Основною метою дотримання встановлених вимог є забезпечення експлуатаційної надійності, довговічності та безпечного функціонування конструкції в умовах статичних і динамічних навантажень, температурних коливань та агресивного середовища

Під час вибору матеріалів для виготовлення корпусів, складальних одиниць або окремих деталей, необхідно враховувати такі критично важливі параметри:

- розрахунковий тиск конструкції;
- температурний режим експлуатації (мінімальна можлива температура стінки в умовах охолодження і максимальна робоча температура);
- хімічний склад та агресивність середовища;
- технологічні властивості матеріалу, зокрема зварюваність;
- корозійна стійкість та довговічність у заданих умовах експлуатації.

У разі, коли посудина встановлюється на відкритому повітрі або в неопалюваному приміщенні, при виборі матеріалу слід враховувати:

- абсолютно мінімальну температуру повітря в регіоні розміщення — у випадку, якщо температура стінки під тиском може знижуватись до від'ємних значень через вплив зовнішнього середовища;
- середню температуру найбільш холодної п'ятиденки з ймовірністю 0,92 — коли температура стінки посудини залишається додатною.

Елементи, що приварюються до корпусу (як із внутрішнього, так і зовнішнього боку), зокрема циліндричні опори, підкладки, опорні кільця під тарілки та інші допоміжні компоненти, мають виготовлятися з матеріалів, які:

- мають високу зварюваність;
- мають співставні значення коефіцієнтів лінійного розширення з основним матеріалом корпусу.

Допустиме відхилення між коефіцієнтами теплового розширення основного і приєднуваного матеріалів не повинно перевищувати 10 %. Таке узгодження необхідне для запобігання термічним напруженням при змінних температурах.

У конструкціях із корпусами, виготовленими з аустенітної хромонікелевої сталі, допускається приварювання елементів, виконаних із вуглецевої або низьколегованої сталі, до зовнішньої поверхні корпусу. Умови такого з'єднання, включаючи допустиму протяжність шва та товщину елементів, мають бути визначені безпосередньо в проектній документації автором конструкції.

У випадках, коли відсутні сертифікати якості або повна інформація про окремі випробування матеріалів, підприємство-виробник зобов'язане провести відповідні контрольні випробування згідно з вимогами стандартів або технічних умов, що регламентують властивості даного матеріалу.

Будь-які додаткові вимоги до матеріалів, які не передбачені стандартами чи ТУ, але висуваються замовником, повинні бути чітко вказані в робочій технічній документації та погоджені в установленому порядку.

При оформленні замовлення на вуглецеві сталі за ДСТУ, слід обов'язково вказувати категорію сталі, а також — у разі марок сталі типу 20К (категорії 5 та 11) — вимагати її постачання в нормалізованому стані. Крім того, необхідно встановлювати допустимий вміст шкідливих домішок: вміст сірки та фосфору не повинен перевищувати 0,035 % у будь-якому з компонентів.

До збирання корпусу внутрішня поверхня оболонки та штуцерів повинна бути очищена від сторонніх нашарувань, зокрема від фрагментів окалини, що відшаровується, пилу, бруду чи корозії. Після зварювання всі шви корпусу мають бути ретельно оброблені, зокрема [5-6]:

- зварні шви повинні бути зачищені врівень з внутрішньою поверхнею стінки;
- допускається локальне підвищення товщини шва, яке не перевищує 0,05 мм для монометалевих посудин та 1,5 мм — для двошарових конструкцій.

При виготовленні зварних корпусів посудин, призначених для роботи під надлишковим тиском, важливе значення має суворе дотримання геометричних параметрів та технологічної точності на всіх етапах складання і зварювання. Встановлені допуски повинні гарантувати механічну цілісність з'єднань і забезпечувати стабільність робочих характеристик виробу в умовах експлуатаційного навантаження.

Згідно з вимогами нормативної документації, допустиме відхилення зовнішнього діаметра обичайки не повинно перевищувати $\pm 1\%$ від номінального розміру. У стикових з'єднаннях листових заготовок величина зсуву кромek не повинна перевищувати 10% від товщини тоншого з елементів, що беруть участь у з'єднанні, оскільки такі дефекти можуть призводити до локального ослаблення конструкції та зниження її тривалої міцності.

У разі застосування автоматизованого способу зварювання із формуванням кореня шва з зворотного боку, зазор між підготовленими стиковими поверхнями має бути в межах $\pm 1,5$ мм. Порушення цього параметра може призвести до нестабільності провару та дефектів у кореневій зоні.

Під час транспортування, монтажу або маніпуляцій зі зібраними вузлами перед остаточним зварюванням необхідно вживати заходів для збереження геометрії, досягнутої на етапі попереднього складання. Застосування спеціальних фіксаторів, пристроїв позиціонування та опорних систем повинно забезпечувати незмінність взаємного розташування деталей.

Виконання зварювальних робіт допускається виключно згідно з діючими технічними умовами, затвердженими технологічними картами (ТК) або інструкціями зварювання, які пройшли відповідне узгодження. Використання альтернативних методів або нових зварювальних технологій можливе лише за рішенням головного інженера підприємства, після обґрунтованого аналізу технологічної доцільності, проведення контрольних зварювальних операцій, експертної оцінки пробних зразків і на підставі висновків галузевої науково-дослідної установи.

До початку зварювання обов'язково виконується повний технічний контроль складального вузла, що включає перевірку точності розташування стикових поверхонь, стану обробки кромek, відсутності забруднень або оксидних плівок. Механічне припасування кромek у процесі складання заборонене, якщо воно супроводжується виникненням локальних напружень або деформацій у металі.

Тимчасові кріпильні з'єднання (прихватки) мають виконуватись за тими ж параметрами, що й основний зварний шов, із використанням ідентичних

зварювальних матеріалів. Умови виконання прихваток та порядок їх видалення (якщо передбачено) повинні бути передбачені в технологічній документації.

Технологічний процес має бути розроблений таким чином, щоб мінімізувати залишкові напруження, особливо в зонах концентрації навантажень. Вибір типу з'єднання, способу зварювання, положення шва та послідовності проходів повинен бути технічно обґрунтованим і забезпечувати високу якість та надійність зварного з'єднання.

Гранично допустимі відхилення геометрії швів мають відповідати нормативам, встановленим для зварних з'єднань посудин, що працюють під тиском. Зовнішній вигляд шва повинен бути акуратним, з плавним переходом до основного металу, без напливів, підрізів, кратерів та нещільностей. Дозволяється незначна лускатість поверхні наплавленого металу. При цьому, у стикових з'єднаннях виступання шва понад 1 мм підлягає обов'язковому механічному згладженню до нормативного профілю.

На підготовчому етапі зварювального виробництва особливу увагу приділяють очищенню та контролю стикових поверхонь, а також забезпеченню геометричної відповідності з'єднуваних елементів. Поверхні, що підлягають зварюванню, повинні бути ретельно очищені від окалини, корозійних нашарувань, мастил, пилу, льоду та інших забруднень. Ширина зони очищення має перевищувати розрахункову ширину шва не менше ніж на 5–10 мм з кожного боку. Особливу увагу слід приділяти зоні формування кореня шва, яка повинна бути підготовлена до металевого блиску на ширину не менше 20 мм.

Виконання зварювальних робіт дозволяється лише за температури навколишнього середовища не нижче $+5^{\circ}\text{C}$, що забезпечує стабільність процесу плавлення і мінімізує ризики утворення дефектів у шві.

Кожен вузол, зібраний під зварювання, підлягає вхідному контролю. Оцінка відповідності з'єднання вимогам креслень і технічних умов здійснюється майстром дільниці та представником відділу технічного контролю (ВТК). Лише після їхнього позитивного висновку допускається виконання основних зварювальних операцій.

Застосовувані у процесі виготовлення матеріали повинні відповідати чинним державним стандартам або технічним умовам, що регламентують їх хімічний склад, механічні характеристики та технологічні властивості. Відповідність матеріалів вимогам нормативної документації підтверджується супровідними сертифікатами виробника. У разі їх відсутності або неповноти інформації, контроль якості матеріалів здійснюється шляхом лабораторних випробувань, проведених безпосередньо на підприємстві-споживачі згідно з затвердженими методиками.

Металопрокат, що надходить у виробництво, проходить вхідний візуальний та вимірювальний контроль, під час якого здійснюється:

- видалення сторонніх забруднень (корозії, пилу, окалини, мастил);
- перевірка наявності розшарувань та ознак нерівномірного розподілу домішок;
- виправлення викривлень та локальних деформацій.

Допускається наявність незначного шару окалини чи корозійних слідів, якщо вони не перешкоджають виявленню дефектів або зниженню зварюваності.

У процесі виготовлення необроблювані поверхні деталей повинні бути вільними від:

- задирок;
- тріщин;
- подрізів;
- розшарувань.

Для елементів, які виготовляються без використання креслень, допускається шорсткість крайок не більше $Rz\ 1000\ \mu\text{м}$ при товщині до 60 мм; для товстих елементів — шорсткість повинна відповідати допустимим межам за лінійними розмірами відповідно до технічних норм.

Поверхні, що зазнають газового різання, мають бути повністю очищені від окалини, шлакових включень та крапель розплавленого металу. Усі дефекти крайок, включаючи виїмки, пори, задирки або мікротріщини, підлягають усуненню шляхом шліфування вздовж напрямку стику, або відновленню за допомогою зварювання згідно з технічною інструкцією.

Виправлення ливарних дефектів, таких як пори, свищі або поверхневі раковини, допускається методом наплавлення за технологією, яка передбачає контроль термічного впливу та наступне відновлення геометрії.

Усі елементи конструкції повинні виготовлятися з урахуванням допусків на лінійні та кутові розміри, що забезпечує точність під час складання і якісне формування зварних з'єднань. Площинність опорних та стикових поверхонь має гарантувати дотримання заданих монтажних зазорів та забезпечення конструктивної перпендикулярності.

Процес збирання виконується із застосуванням універсального складального оснащення, яке забезпечує:

- точне взаємне позиціонування деталей;
- стабільність зазорів у з'єднаннях;
- дотримання перпендикулярності вузлів та площин.

Кількість прихваток повинна бути зведена до мінімуму, водночас вони мають забезпечувати надійність фіксації і бути виконані тим самим зварювальним дротом, що застосовується для основного шва. У разі виявлення дефектів прихваткових з'єднань їх слід видалити і виконати повторно з дотриманням усіх технологічних вимог.

У разі відсутності вивідних планок або технічної можливості їх встановлення, завершення зварювання повинно супроводжуватися обов'язковим заварюванням кратерів на кінцях швів, з метою запобігання утворенню тріщин, пор або інших дефектів, характерних для зони згасання дуги. Виведення дуги безпосередньо на основний метал не допускається, оскільки це призводить до локального перегріву та формування гартівних структур, які знижують експлуатаційну надійність конструкції [1].

Механічні властивості зварного з'єднання повинні бути не нижчими за параметри основного металу. У з'єднанні має бути забезпечена рівномірна міцність, пластичність і в'язкість, що підтверджується результатами контрольних випробувань відповідно до вимог нормативної документації.

Перед початком зварювальних операцій виконується технічна перевірка зібраного вузла, зокрема:

- оцінка правильності складання;
- контроль якості підготовки кромek і прилягаючих зон;
- відсутність пошкоджень або деформацій, що могли б вплинути на геометрію з'єднання.

Категорично забороняється припасування з утворенням залишкових напружень, особливо за допомогою ударних або термічних методів. Усі тимчасові з'єднання (прихватки) виконуються із застосуванням ідентичних присадкових матеріалів, хімічний склад і механічні характеристики яких повинні відповідати основному металу, що зварюється.

Технологія зварювання повинна бути спрямована на мінімізацію внутрішніх залишкових напружень у зоні термічного впливу та шві. Це досягається шляхом:

- раціонального вибору типу з'єднання (стикове, кутове, таврове тощо);
- обґрунтованого вибору способу зварювання (ручне дугове, автоматичне, напіваавтоматичне у захисних газах тощо);
- оптимізації параметрів зварювального режиму — з урахуванням товщини металу, тепловідведення, типу електродного матеріалу, положення в просторі.

Геометричні характеристики зварного шва повинні відповідати вимогам діючих стандартів. Зокрема:

- перехід від шва до основного металу має бути плавним, без підрізів;
- поверхня шва повинна бути рівномірною, допускається легка луска як ознака стабільного режиму;
- не допускаються напливи, кратери, пори, шлакові включення;
- виступання шва понад 1 мм у стикових з'єднаннях повинно бути згладжене шляхом механічної обробки відповідно до встановлених допусків.

Перед виконанням зварювання деталі очищуються до металевого блиску на ширину не менше 5–10 мм з обох боків шва. Допускається проведення

зварювальних робіт лише за температури повітря не нижче $+5^{\circ}\text{C}$, що забезпечує термічну стабільність процесу та знижує ймовірність утворення дефектів.

Зібраний вузол підлягає обов'язковому технічному огляду, який виконується майстром виробничої ділянки та представником служби технічного контролю (ВТК). Лише після їхнього погодження з'єднання допускається до основного зварювання [6].

1.4 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення виробу

Корпус насоса НЦСГ-Е-180 є відповідальною складовою насосного агрегату, призначеного для транспортування рідин у складних експлуатаційних умовах (високий тиск, температура, агресивне середовище). Виготовлення корпусу включає низку послідовних технологічних етапів: розкрій, підготовка крайок, зварювання, термічна обробка, контроль і фінішна обробка. У межах цього аналізу розглянуто ключові технологічні аспекти, типові помилки, критичні обмеження та напрями вдосконалення.

Корпус виготовляється з низьколегованої конструкційної сталі марки 10ХГСНД або 10ХСНД, яка характеризується високою зварюваністю та атмосферостійкістю. Вибір матеріалу загалом є виваженим, проте вимагає посиленого контролю хімічного складу, зокрема рівня вуглецю та сірки, для мінімізації ризиків гарячих і холодних тріщин. Наявність сертифікатів якості є обов'язковою, але часто трапляються випадки невідповідності фактичних властивостей прокату даним у супровідній документації, що потребує незалежного вхідного контролю.

Очищення поверхонь від окалини, іржі та мастила є передумовою формування якісного шва. У практиці виявлено, що ширина очищення нерідко занижується, що призводить до локального включення неметалевих домішок у зону шва. Не завжди дотримується також рекомендована глибина підготовки

стикових поверхонь — кромки можуть мати шорсткість або мікротріщини, які не виявляються на етапі складання, але спричиняють дефекти при зварюванні.

Складання виконується із застосуванням універсального оснащення, однак відсутність або недосконалість жорсткої фіксації деталей призводить до втрати співвісності й відхилень у геометрії. Прихватки іноді виконуються без урахування подальшого розміщення основного шва, що зумовлює концентрацію напружень у зоні з'єднання. Додатковим недоліком є використання допоміжних присадкових матеріалів, хімічно несумісних з основним металом, що прямо суперечить вимогам нормативної документації.

Технологія зварювання передбачає застосування автоматичного зварювання під флюсом або напівавтоматичного у захисному газі, однак у реальних умовах виробництва нерідко спостерігається відступ від регламентованих режимів (перегрів металу, надмірна глибина проплавлення, незбалансоване тепловкладення). У результаті виникають такі дефекти, як:

- підрізи;
- пористість;
- нерівномірність ширини шва;
- надмірне виступання металу шва.

Ці дефекти не завжди фіксуються візуальним контролем і вимагають застосування УЗД або радіографії.

Післязварювальне відпускання проводиться з метою зниження залишкових напружень. Встановлений режим (650 °С, витримка 1 год/25 мм товщини) є достатнім за умови дотримання. Проте контроль за швидкістю охолодження часто не проводиться, що спричиняє нерівномірне зняття напружень та можливу деформацію корпусу. Рекомендовано впровадити автоматизоване керування термічною камерою з протоколюванням параметрів.

Контрольна система включає ВТ, неруйнівний контроль (УЗК, ВТ, ПВК), гідравлічні випробування. Недоліком є низький рівень автоматизації процедури фіксації результатів — значна частина даних зберігається у вигляді рукописних звітів без цифрової архівації. Це ускладнює аналіз виробничих відхилень та

повторну атестацію зварювальників. Для зварних швів з високим ступенем відповідальності доцільно застосовувати флюоресцентну дефектоскопію або фазовий контроль.

Технологічний процес виготовлення корпусу насоса НЦСГ-Е-180 загалом є технологічно обґрунтованим і базується на сучасних принципах машинобудівного виробництва. Водночас виявлено ряд критичних місць, які можуть бути усунуті шляхом:

- впровадження цифрового контролю параметрів зварювання;
- автоматизації запису даних контролю якості;
- вдосконалення кондукторного оснащення для підвищення точності складання;
- систематичного підвищення кваліфікації зварювального персоналу з наголосом на аналіз причин дефектів;
- більш жорсткого моніторингу термічної обробки з інтеграцією автоматизованих термопрофільовальних систем.

Оптимізація технологічного процесу не лише підвищить якість кінцевого виробу, а й сприятиме зниженню відсотка браку, витрат на доопрацювання і забезпечить довготривалу надійність насоса в умовах реальної експлуатації.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування способу зварювання

У процесі проєктування технологічного маршруту зварювання необхідно забезпечити оптимальний вибір методів з'єднання, який би відповідав сучасним вимогам до якості, продуктивності та економічної ефективності виробництва. Доцільно застосовувати як усталені (типові), так і спеціалізовані технології, що мають потенціал для подальшої автоматизації та масштабування. При цьому обраний спосіб зварювання повинен відповідати комплексу вихідних параметрів, визначених на етапі технологічного моделювання, включаючи матеріал конструкції, товщину зварюваних елементів, конфігурацію швів та експлуатаційні навантаження.

У разі, коли наявне декілька технологічно придатних варіантів, остаточне рішення приймається на основі зіставлення техніко-економічних показників кожного з них — із урахуванням собівартості, ресурсної ефективності та рівня автоматизації.

Серед методів дугового зварювання найбільш поширеними є процеси з використанням плавкого електрода. Їхня популярність обумовлена технологічною універсальністю, простотою адаптації до виробничих умов і широким спектром застосування в різних галузях машинобудування. До цієї категорії відносять ручне дугове зварювання покритими електродами, напівавтоматичне та автоматичне зварювання суцільним дротом у середовищі вуглекислого газу або його сумішей, а також зварювання під флюсом і порошковим дротом. Особливе поширення мають технології з використанням суцільного дроту, зокрема при зварюванні у захисному газовому середовищі або під шаром флюсу, що дозволяє забезпечити стабільні показники якості шва при високій продуктивності.

У контексті виготовлення корпусу доцільно передбачити максимальний рівень механізації та автоматизації зварювальних операцій. Це обґрунтовано значними втратами часу й трудових ресурсів при застосуванні традиційних

(ручних) методів з'єднання, а також необхідністю забезпечення відтворюваності якості при серійному випуску продукції. Інтеграція сучасних автоматизованих зварювальних систем дозволяє значно підвищити продуктивність, зменшити витрати на обробку та покращити параметри з'єднання за показниками міцності, герметичності й стабільності геометрії.

Згідно з фаховими джерелами, для зварювання конструкцій зі сталі товщиною 8 мм рекомендовано використовувати [7-8]:

- автоматизоване дугове зварювання під флюсом;
- дугове зварювання у середовищі вуглекислого газу (MAG-процес).

Обидва методи дозволяють отримати з'єднання високої якості при належному контролі параметрів режиму. Водночас остаточний вибір повинен враховувати додаткові чинники: цільові вимоги до швів (особливо щодо герметичності), доступність витратних матеріалів та обладнання, обмеження за положенням шва, технічні можливості підприємства та рівень підготовки персоналу.

Варто зазначити, що при зварюванні вуглецевих та низьколегованих сталей переважно використовують вуглекислий газ як захисне середовище через його технологічну доступність і низьку вартість. Проте, попри низку переваг (простота процесу, порівняно невисока собівартість), застосування чистого CO_2 супроводжується утворенням грубозернистих структур і підвищеним розбризуванням металу, що знижує якість швів у складних або відповідальних конструкціях. Також такий метод не завжди відповідає вимогам міжнародної сертифікації (ISO, EN), що може бути критичним у разі виходу продукції на глобальні ринки або виконання контрактів з підвищеним рівнем контролю.

При використанні чистого вуглекислого газу як захисного середовища у механізованому зварюванні виявляється низка істотних недоліків, які суттєво обмежують ефективність та якість зварного процесу. Серед найхарактерніших проблем слід відзначити значне розбризування електродного металу, утворення твердих злипаних бризок на поверхні виробу, а також нерівномірне формування шва із вираженою лускатістю та нерівностями. За низьких температур зовнішнього

середовища якість шва ще більше погіршується — особливо за показниками ударної в'язкості, що є критичним для зварних з'єднань, розрахованих на динамічне або циклічне навантаження.

На підставі аналізу вітчизняного та міжнародного досвіду встановлено, що оптимізація складу захисного газу є одним із найбільш результативних підходів до підвищення стабільності механізованого дугового зварювання. Заміна чистого CO_2 на аргоновмісні або багатокomпонентні газові суміші дозволяє істотно покращити як експлуатаційні властивості з'єднання, так і економічні показники зварювального процесу.

Зокрема, суміші на основі аргону з добавками CO_2 (20–25 %) або з додаванням кисню (3–7 %) демонструють оптимальний баланс між захисними властивостями, стабільністю дуги та формуванням якісного шва. Композиції $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ або $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2+5\%\text{O}_2$ — дозволяють суттєво зменшити ймовірність утворення пор і тріщин, забезпечити краще зволоження країв та зниження теплових деформацій, особливо при зварюванні елементів з проміжками, залишками окалини або змінною товщиною [9].

Використання трикомпонентної газової суміші $\text{Ar}-\text{CO}_2-\text{O}_2$ дає змогу не лише підвищити якість швів у складних виробничих умовах, а й ефективно проводити зварювання товстостінних конструкцій, швів зі значними зазорами або в умовах вітру до 1,3 м/с. Завдяки підвищеному окисному потенціалу така суміш знижує вміст залишкового азоту в шві та сприяє утворенню більш однорідної, дрібнозернистої мікроструктури.

Порівняно з традиційним зварюванням у середовищі CO_2 , використання аргоновмісних газів має низку підтверджених переваг:

- зменшення втрат металу електрода через розбризкування в 3–4 рази;
- зниження трудомісткості очищення виробу від бризок у 8–10 разів;
- зростання продуктивності праці на 10–20 %;
- можливість застосування імпульсно-дугових режимів зварювання, а також зварювання на прямій полярності;
- покращення ударної в'язкості швів при температурах нижче 0 °C;

– зменшення запиленості та екологічного навантаження на робочу зону.

До об'єктивних недоліків слід віднести підвищене теплове та ультрафіолетове випромінювання, що потребує додаткових засобів індивідуального захисту зварювальника, а також вищу вартість аргонових сумішей у порівнянні з вуглекислим газом. Однак у випадку зварювання відповідальних з'єднань така різниця компенсується якістю отриманих швів і скороченням витрат на післязварювальну обробку.

З технологічного погляду, для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей у згаданих газових середовищах доцільно застосовувати стандартні зварювальні дроти типу Св-08Г2С, а також їхні зарубіжні аналоги. У більшості випадків не виникає потреби у заміні витратних матеріалів, що сприяє спрощенню адаптації процесу під нове газове середовище.

Одержані з'єднання демонструють підвищену тріщиностійкість, стійкість до кристалізаційних порушень структури, а також низьку схильність до холодноламкості навіть у випадках підвищеного теплового навантаження або незначних порушень підготовки кромки. Така стабільність структури забезпечує покращення довговічності та надійності конструкцій, що особливо важливо в машинобудуванні, енергетиці та транспортному секторі.

Використання аргоністких захисних середовищ, зокрема сумішей $\text{Ar}+\text{CO}_2$ та $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$, дозволяє виконувати зварювання в будь-якому просторовому положенні за допомогою стандартного обладнання, яке зазвичай застосовується для процесів у середовищі вуглекислого газу. Водночас доцільним є зниження напруги дуги на 2–3 В порівняно з аналогічними режимами у CO_2 за збереження однакової сили струму, що дозволяє уникнути перевищення гранично допустимих параметрів, регламентованих нормативними документами для зварювання у чистому CO_2 [9].

Найбільш виражені технологічні переваги зазначених сумішей спостерігаються за умов струминного перенесення металу, коли краплі електродного металу переносяться стабільним потоком через дугу. Застосування аргоністких газів у поєднанні з прямою полярністю постійного струму дозволяє

досягти якісного формування шва з мінімальним проплавленням основного металу, що є критично важливим під час зварювання товстостінних або складнопрофільних конструкцій у багат шаровому режимі. Підвищення швидкості наплавлення при цьому може сягати 25–30 %, що значно покращує продуктивність зварювання.

Водночас аргоновмісні суміші відкривають широкі можливості для впровадження імпульсно-дугового режиму, в якому реалізується дрібнокрапельне перенесення металу з електрода. У цьому випадку частота краплеутворення відповідає частоті накладання імпульсів зварювального струму, що дозволяє працювати на знижених середніх значеннях струму, зберігаючи стабільність дуги. Такий режим значно розширює технологічну гнучкість, адже дає змогу використовувати зварювальний дріт одного діаметра для широкого спектра завдань — незалежно від просторового положення, товщини металу чи інших теплофізичних характеристик.

Особливо стрімкого розвитку цей режим зазнав у країнах з високим рівнем автоматизації виробництва, де використання сучасних джерел живлення з можливістю програмного керування формою, амплітудою та частотою імпульсів дало змогу вивести процес зварювання на принципово новий рівень технологічної точності.

Окрім технічних аспектів, зварювання в аргоністких газових сумішах має важливі санітарно-гігієнічні переваги. У порівнянні з вуглекислим газом, такий процес супроводжується значно меншими обсягами диму та газоподібних шкідливих речовин, що позитивно впливає на умови праці зварювальника. Спрощується система вентиляції, знижуються витрати на її обслуговування, зменшується ризик виникнення професійних захворювань, знижується потреба у складних засобах захисту. Незважаючи на дещо підвищене утворення озону при зварюванні в аргоновмісному середовищі, при дотриманні раціональних режимів та використанні сертифікованих засобів індивідуального захисту вміст озону в повітрі залишається в межах гранично допустимих концентрацій (ГДК).

Максимальний техніко-економічний ефект від використання таких газів досягається у випадках:

- зварювання елементів, на поверхні яких за технічними вимогами не допускається наявність бризок металу;
- виготовлення конструкцій, що підлягають експлуатації в умовах низьких температур і змінних навантажень;
- формування вузьких швів з малою площею перерізу на підвищених швидкостях наплавлення;
- багат шарового зварювання масивних деталей, що потребують високої надійності;
- потокового виробництва або автоматизованих зварювальних ліній, де потрібна стабільність, швидкість і повторюваність зварювального процесу.

З огляду на потребу у стабілізації процесу дуги та отриманні швів із високими геометричними і механічними характеристиками, доцільним є застосування суміші з вмістом 80 % аргону та 20 % CO_2 . Така комбінація забезпечує оптимальні умови горіння дуги, зменшує ймовірність утворення дефектів, сприяє збалансованому тепловкладу і полегшує контроль над формуванням з'єднання.

При зварюванні сталевих конструкцій із товщиною стінки в межах 6–100 мм доцільно впроваджувати автоматизоване дугове зварювання під шаром флюсу з використанням плавкого електрода. Цей метод забезпечує високу якість з'єднань за рахунок стабільності режимів, ефективного захисту зони дуги від зовнішніх впливів, а також формування хімічно однорідного та геометрично точного зварного шва з прогнозованими характеристиками.

Однією з істотних переваг є зменшення ймовірності виникнення дефектів таких як непровари, підрізи, пористість чи нестабільність шва. На відміну від ручних методів, процес є безперервним і не потребує частого перезаряджання електродів, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню витрат часу.

З технічної точки зору, зварювання під флюсом відзначається практичною відсутністю бризок розплавленого металу, що значно знижує потребу в післяопераційній обробці поверхні з'єднання. Крім того, шкідливість процесу для оператора зменшена, адже сам флюс виконує роль додаткового захисного бар'єру, знижуючи інтенсивність випромінювання та обсяг шкідливих аерозолів.

Автоматизоване дугове зварювання під флюсом є одним із найефективніших методів формування міцних і герметичних з'єднань, особливо при виготовленні товстостінних конструкцій у серійному та масовому виробництві. Однак, попри переваги, даний спосіб має низку суттєвих технологічних і організаційних обмежень.

Процес зварювання під флюсом є технологічно стабільним лише при виконанні швів у нижньому положенні. Горизонтальні, вертикальні або стельові з'єднання вимагають складних технологічних рішень — зміни положення деталі або застосування спеціальних механізмів подачі флюсу. Це значно ускладнює реалізацію процесу на складних просторових з'єднаннях і знижує його універсальність. Він супроводжується великим тепловкладенням, що призводить до значних зон термічного впливу, утворення залишкових напружень і потреби у подальшій термічній обробці (відпуск, нормалізація). У результаті підвищується ризик деформацій, особливо при зварюванні довгих або тонкостінних елементів.

Після зварювання необхідно очищати з'єднання від шлакової кірки і залишків флюсу, що підвищує трудомісткість та потребує додаткових ресурсів. При недостатньо якісному очищенні можливе зниження довговічності покриттів або порушення герметичності конструкції у майбутньому.

Недоліки зварювання під флюсом свідчать, що його доцільно застосовувати лише за наявності великих обсягів продукції, переважно плоскої геометрії з'єднань, високих вимог до механічних характеристик і достатнього рівня автоматизації. У проєктах зі змінною номенклатурою або за відсутності необхідного обладнання доцільніше розглядати альтернативні методи такі як MAG/MIG-зварювання, які забезпечують більшу гнучкість виробництва.

Максимального рівня ефективності технологічного процесу досягають при використанні автоматизованих зварювальних систем, які забезпечують скорочення трудових витрат у 10–20 разів у порівнянні з ручним дуговим зварюванням і у 4–6 разів — порівняно з напівавтоматичним. Проте слід зауважити, що фінансові витрати на впровадження таких систем суттєво вищі — у 5–25 разів перевищують вартість стандартного напівавтоматичного обладнання.

Рішення щодо доцільності застосування автоматизованих методів зварювання, зокрема для виконання кільцевих швів, повинно прийматися на основі всебічного техніко-економічного обґрунтування. У цьому аналізі мають бути враховані такі фактори, як річний обсяг виготовлення, рівень трудомісткості операцій, капітальні та експлуатаційні витрати на обладнання, кваліфікаційна підготовка персоналу, а також вимоги до надійності та якості кінцевого виробу.

Застосування такого підходу дозволяє раціоналізувати зварювальне виробництво, забезпечити високу повторюваність параметрів з'єднань і досягти стійкої конкурентоспроможності виробу на ринку в умовах серійного або великосерійного виробництва.

На підставі проведеного техніко-економічного аналізу варіантів реалізації зварювального процесу, з урахуванням вимог до продуктивності, якості та гнучкості виробничого циклу, найбільш доцільним способом з'єднання елементів корпусу є застосування автоматизованого дугового зварювання плавким електродом у середовищі інертно-активної газової суміші (MIG/MAG).

З урахуванням конструктивних особливостей виробу, технологія виготовлення передбачає початкове виконання прихваток для фіксації елементів конструкції в проектному положенні, після чого основне зварювання здійснюється в автоматичному режимі з використанням MIG/MAG-процесу. Такий підхід дозволяє досягти не лише стабільності параметрів шва, але й забезпечити високий рівень повторюваності з'єднань, що критично важливо для серійного виробництва.

Для підвищення стабільності процесу дугового горіння, формування рівномірної зварювальної ванни та ефективного захисту металу від впливу атмосфери, доцільним є використання захисної газової суміші, що містить 80 % аргону та 20 % вуглекислого газу. Такий склад дозволяє оптимально поєднати властивості інертного та активного газів: аргон забезпечує стабільність дуги й покращену змочуваність поверхні шва, тоді як CO₂ сприяє формуванню щільного наплавленого металу з достатньою глибиною проплавлення.

У якості захисного середовища використовуються високоякісні технічно чисті компоненти [9]:

- аргон із чистотою не нижче 99,993 %;
- вуглекислий газ із чистотою не менш ніж 99,8 %.

Такий рівень чистоти газів дозволяє мінімізувати ймовірність утворення оксидних включень, пористості та інших дефектів шва, що є особливо важливим при виготовленні відповідальних елементів корпусу, які піддаються механічному навантаженню або герметичним вимогам.

Застосування вказаного методу зварювання у поєднанні з оптимізованим газовим середовищем гарантує:

- підвищену технологічну стабільність процесу;
- високу якість формування зварного шва з мінімальною кількістю дефектів;
- зниження витрат на післязварювальну обробку та підвищення загальної продуктивності.

Зважаючи на хімічний склад конструкційної сталі, її механічні властивості, а також тип газового захисного середовища, що використовується під час зварювання корпусу за технологією MIG/MAG, оптимальним вибором присадкового матеріалу є зварювальний дріт марки Св-08ХГ2С (табл.2.1).

Дана марка дроту легована марганцем і хромом, що забезпечує утворення зварного металу зі збалансованою структурою та підвищеними показниками пластичності і міцності. Завдяки цьому формується шов з високою ударною в'язкістю, який зберігає свої характеристики навіть за умов дії понижених температур та циклічних (змінних) механічних навантажень.

Хром у складі дроту сприяє підвищенню стійкості шва до утворення тріщин та забезпечує додаткову жаростійкість, тоді як марганець відіграє роль дегазатора і модифікатора структури, зменшуючи схильність до пороутворення та підвищуючи якість наплавленого металу.

У поєднанні з газовою сумішшю на основі 80 % аргону та 20 % вуглекислого газу, використання дроту Св-08ХГ2С дозволяє досягти оптимальних технологічних характеристик зварювання, зокрема:

- стабільного горіння дуги;
- глибокого та рівномірного проплавлення;

- формування гладкого шва з мінімальною кількістю бризок;
- високої повторюваності механічних властивостей шва.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад дроту Св – 08ХГ2С, % [9]

Марка дроту	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Св-08ХГ2С	0,05-0,11	1,7-2,1	0,70-0,95	0,70-1,0	<0,25	<0,025	<0,030

Для забезпечення високої технологічної якості та експлуатаційної надійності зварного з'єднання, критично важливим є досягнення повноцінного проплавлення металу по всій товщині шва, без дефектів непровару чи порушення структурної однорідності.

З цією метою виконується аналітичний розрахунок параметрів зварювального режиму, який враховує тип з'єднання, геометрію деталей, положення шва у просторі та вимоги до глибини проплавлення. Розрахунки проводяться відповідно до методики, викладеної у [9].

Передбачено, що зварювання корпусу конструкції здійснюватиметься в середовищі інертного та активного газу (MIG/MAG) на автоматизованому обладнанні, що дозволяє досягти стабільності горіння дуги, зменшення розбризкування металу та підвищеної повторюваності якості шва.

Для забезпечення необхідного ступеня проплавлення, оптимального тепловкладення та геометричної точності шва, здійснюється попередній розрахунок зварювального режиму для з'єднання типу Т1 (рис. 2.1 та 2.2). Цей тип є характерним для з'єднання обичайки з фланцем або ребрами жорсткості в конструкції корпусу. Результати розрахунку дозволяють підібрати значення зварювального струму, напруги, швидкості подачі дроту та швидкості зварювання, які забезпечують стабільне формування шва без внутрішніх дефектів і задовольняють експлуатаційні вимоги до з'єднання [10].

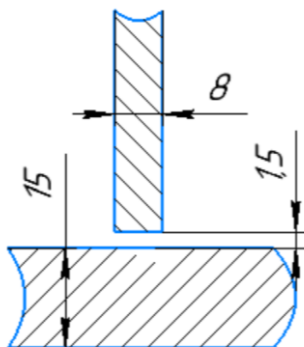


Рис. 2.1 З'єднання типу T1

З метою забезпечення необхідної якості зварного з'єднання, стабільності процесу та належної глибини проплавлення, проведемо розрахунок основних параметрів режиму механізованого та автоматичного зварювання [10].

Механізоване зварювання катетом 6 мм:

Визначаємо площу поперечного перерізу наплавленого металу

$$F_H = \frac{k^2}{2} = \frac{6^2}{2} = 18 \text{ мм}^2 \quad (2.1)$$

діаметр електродного дроту

$$d_{e.d.} = K_d \times F_{Hi}^{0.625} = (0.149 \dots 0.264) \times 18^{0.625} = 0.89 \dots 1.57 \text{ мм}^2 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт K_d вибираємо 0.149... 0.264.

Приймаю значення $d_{e.d.} = 1,2 \text{ мм}$.

Виліт електродного дроту:

$$L_{e.l.d.} = 10 \cdot d_{e.l.d.} = 1.2 \cdot 10 = 12 \text{ мм} \quad (2.3)$$

Швидкість зварювання

$$V_{36} = \frac{8.9 \times d_{e.d.}^2 + 50.6 \times d_{e.d.}^{1.5}}{F_{Hi}} = \frac{8.9 \times 1.2^2 + 50.6 \times 1.2^{1.5}}{18} = 16.41 \text{ м/год} \quad (2.4)$$

Швидкість подачі електродного дроту

$$V_{\text{под}} = \frac{4 \times F_H \times V_{\text{зв}}}{\pi \times d_{\text{е.д}}^2 \times (1 - \psi_p)} = \frac{4 \times 18 \times 4.56}{3.14 \times 1.2^2 \times (1 - 0.1)} = 77.99 \text{ мм/с} (280.8 \text{ м/год}) \quad (2.5)$$

Зварювальний струм

$$\begin{aligned} I_{\text{зв}}^{(+)} &= d_{\text{е.д}} \times \left(\sqrt{1450 \times d_{\text{е.д}} \times V_{\text{под}}^{(+)} + 145150 - 382} \right) = \\ &= 1.2 \times (\sqrt{1450 \times 1.2 \times 77.99 + 145150 - 382}) = 177.5 \text{ А} \end{aligned} \quad (2.6)$$

приймаю $I_{\text{зв}} = 180 \text{ А}$

Перевіряємо отримане значення зв. струму:

$$I_{\text{зв}} \leq 180 \times d_{\text{ел.д.}}^{1,5} = 236 \text{ А} \quad (2.7)$$

Отримане значення зварювального струму не виходить за межі допустимого.

Напруга зварювання

$$U_{\text{д}} = 14 + 0,05 \times I_{\text{зв}} = 14 + 0,05 \times 180 = 23 \text{ В} \quad (2.8)$$

Витрати захисного газу

$$q_{\text{з.г.}} = 0,0033 \times I_{\text{зв}}^{0,75} = 0,0033 \times 180^{0,75} = 0,16 \text{ л/с} (9.73 \text{ л/хв}) \quad (2.9)$$

Для автоматичного способу:

Катет шва — 8 мм.

діаметр електродного дроту

$$d_{e.d.} = K_d \times F_{Hi}^{0.625} = (0.149 \dots 0.409) \times 43.75^{0.625} = 1.58 \dots 4.34 \text{ мм}^2$$

$$K_d = 0.149 \dots 0.409.$$

Прийmemo значення $d_{ед} = 2,0$ мм.

Виліт електродного дроту:

$$L_{ВИЛ} = 10 \times d_{Е.Д.} = 10 \times 2.0 = 20 \text{ мм}$$

Швидкість зварювання

$$\begin{aligned} V_{зв} &= \frac{15.9 \times d_{e.d.}^2 + 67.4 \times d_{e.d.}^{1.5}}{F_{Hi}} = \\ &= \frac{15.9 \times 2.0^2 + 67.4 \times 2.0^{1.5}}{43.75} = 5.84 \text{ мм/с} (21 \text{ м/год}) \end{aligned}$$

Швидкість подачі електродного дроту

$$V_{под} = \frac{4 \times F_H \times V_{зв}}{\pi \times d_{e.d.}^2 \times (1 - \psi_p)} = \frac{4 \times 43.75 \times 5.84}{3.14 \times 2.0^2 \times (1 - 0.1)} = 90.4 \text{ мм/с} (325.4 \text{ м/год})$$

Зварювальний струм

$$I_{зв}^{(+)} = 2.0 \times (\sqrt{1450 \times 2.0 \times 90.4 + 145150} - 382) = 512.4 \text{ А}$$

Приймаю $I_{зв} = 500 \text{ А}$

Перевіряемо отримане значення зв. струму:

$$I_{зв} \leq 180 \times d_{ед}^{1.5} = 509 \text{ А}$$

Значення величини зварювального струму у межах допустимого.

Напруга зварювання

$$U_{36} = 14 + 0.05 \cdot I_{36} = 14 + 0.05 \cdot 500 = 39 \text{ В}$$

Витрати захисного газу

$$q_{зг} = 0.0033 \times I_{зв}^{0.75} = 0.0033 \times 500^{0.75} = 0.35 \text{ л/с} (21 \text{ л/хв})$$

Розраховано рекомендовані параметри режиму зварювання, що забезпечують стабільність процесу та необхідну якість шва, представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Режим зварювання корпусу насоса

Спосіб зварювання	Тип шва	$d_{e.d.}$ мм	$I_{зв}$, А	U_d , В	$V_{зв}$, м/год	$V_{п.д.}$, м/год	$q_{зг}$ л/хв
Механізоване	Т1	1.2	180	23	16.4	280	9.7
Автоматичне		2.0	500	39	21	325	21

2.2 Вибір устаткування для реалізації технологічного процесу

З метою забезпечення високого рівня якості зварних з'єднань, підвищення стабільності зварювального процесу та оптимізації виробничої ефективності у процесі виготовлення коромисла екскаватора доцільним є впровадження автоматизованих роботизованих систем дугового зварювання. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати вплив людського фактора на результати зварювання, але й забезпечити відповідність сучасним технічним вимогам до міцності, герметичності та довговічності конструкцій, що працюють під змінними та ударними навантаженнями [12-13].

Для автоматизованого виробничого комплексу запропоновано використання шестивісного зварювального робота QRH 410 (рис. 2.2), розробленого німецькою

компанією CLOOS. Дана модель адаптована для виконання високоточного зварювання відповідальних вузлів великогабаритних металоконструкцій, включаючи несучі елементи землерийної техніки.



Рис. 2.1 Робот зварювальний QRH 410 [14]

Модель QRH 410 належить до шестивісних промислових маніпуляторів і вирізняється високою маневровістю та точністю позиціонування, що дозволяє реалізовувати складні траєкторії зварювання з дотриманням геометричних параметрів з'єднань. Повна автоматизація процесу забезпечує стабільну якість шва та мінімізацію впливу людського фактора на результат. Ключові технічні характеристики системи QRH 410 приведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 Характеристика QRH 410 [14]

Зварювальний робот	З повним валом шарніра руки QRH 410
Принцип конструкції	шарнірно-важільна, 6 осей
Привід осей	серводвигуни змінного струму з електронним регулюванням
Вантажопідйомність	10 кг
Точність відтворення позиції	0,1 мм
Форма робочої зони	напівшарова
Макс. діаметр робочої зони, мм	4910
Висота робочої зони	2875

Застосування QRH 410 дає змогу досягти високої однорідності та повторюваності зварних з'єднань по всій довжині шва, суттєво зменшити час на підготовчі та завершальні операції, а також покращити умови праці обслуговуючого персоналу за рахунок усунення прямого контакту з електричною дугою та зварювальними аерозолями. Висока ступінь автоматизації та можливість швидкого переналадження на інші типи виробів забезпечують гнучкість виробничої системи, що є особливо важливим у багатономенклатурному серійному виробництві.

Впровадження роботизованого зварювання з використанням системи QRH 410 дозволяє досягти нового рівня технологічної досконалості у зварюванні відповідальних елементів конструкцій, підвищуючи якість продукції, конкурентоспроможність підприємства та загальну ефективність виробництва.

У складі автоматизованої зварювальної системи для забезпечення стабільної роботи зварювального обладнання доцільним є використання сучасного джерела зварювального струму типу Qineo Step 600 C (рис. 2.2), яке вирізняється високими експлуатаційними характеристиками, зокрема — стабільністю дугового процесу, широким діапазоном регулювання режимів та повною сумісністю з інтелектуальними системами керування [15].



Рис. 2.2. Джерело живлення Qineo Step 600 С [15]

Особливої уваги це обладнання набуває під час зварювання відповідальних конструкцій із високоміцних і низьколегованих сталей, де важливими є точність дотримання параметрів теплового циклу, повторюваність результату й відповідність нормативним вимогам до зварних з'єднань. У цьому контексті джерело Qineo Step 600 С, розроблене німецькою компанією CLOOS, є одним із найбільш технологічно розвинених представників сучасних зразків інверторного зварювального устаткування дугового типу.

Пристрій належить до професійної серії QINEO, яка орієнтована на інженерно-інтегровані рішення та забезпечує реалізацію точних зварювальних процесів за технологією MIG/MAG. Завдяки модульній архітектурі, система легко адаптується до специфіки виробництва і дозволяє використовувати широкий спектр регламентованих налаштувань.

Qineo Step 600 С забезпечує номінальний зварювальний струм до 600 А при ПН 60 %, що робить можливим зварювання товстостінних елементів і виконання наплавних операцій. Установлений синергетичний режим автоматично координує ключові параметри процесу — напругу дуги, подачу дроту, індуктивність — відповідно до типу матеріалу, діаметра електрода та використовуваного газового

середовища. Це дозволяє істотно знизити вплив людського фактора й оптимізувати час налаштування.

Система управління базується на інтуїтивно зрозумілому цифровому інтерфейсі з багаторівневим меню, сенсорним енкодером і функцією збереження до 10 програм користувача, що забезпечує швидке переналаштування під конкретне виробниче завдання.

Серед технічних переваг обладнання слід відзначити:

- надійне горіння дуги у всіх просторових положеннях;
- підтримку струмів у широкому діапазоні (відповідно до діаметра електродного дроту 0,8–2,0 мм);
- низький рівень розбризкування металу, що сприяє мінімізації механічної обробки з'єднань;
- високий коефіцієнт корисної дії, що дозволяє зменшити витрати електроенергії.

Qineo Step 600 C має повну апаратну сумісність із роботизованими системами подачі дроту, такими як CLOOS QWD-A, і підтримує інтеграцію через стандартні промислові інтерфейси. Додатково передбачена можливість роботи в імпульсно-дуговому режимі, який забезпечує покращене формування зварного валика, особливо при обробці аустенітних, нержавіючих і корозійностійких сталей.

Завдяки підвищеній термічній стійкості компонентів, ефективній системі охолодження, а також захисту від впливу пилу та вологи (ступінь захисту IP23), джерело є універсальним рішенням як для стаціонарного, так і для мобільного виробництва у складних умовах експлуатації.

Для реалізації технологічного процесу зварювання обґрунтовано обрано буде сучасне напівавтоматичне джерело зварювального струму TPS/i 500 (рис. 2.3, табл. 2.6). Ця установка повністю відповідає технічним вимогам, які висуваються до зварювання низьколегованих сталей, і забезпечує надійну стабільність дуги в широкому діапазоні зварювальних струмів.

TPS/i 500 призначене для виконання процесів MIG/MAG-зварювання різних металів, включаючи нелеговані й легovanі сталі, алюмінієві сплави та аустенітні

нержавіючі сталі. Окремо варто відзначити можливість роботи в імпульсному режимі, що істотно знижує теплове навантаження на основний метал, зменшує ймовірність утворення пор та інших термічних дефектів, а також підвищує якість формування зварного валика [15].



Рис. 2.4 — Зварювальний напівавтомат *TPS/i 500* [15]

Таблиця 2.5 — Технічні характеристики *TPS/i 500* [15]

Напруга мережі	3 x 400V
Частота сети	50-60Hz
Зварювальний струм мінімальний	3 A
Зварювальний струм максимальний	500 A
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	500A / 40%
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	430A / 60%
Зварювальний струм / тривалість включення [10хв/40°C]	360A / 100%
Напруга холостого ходу	71 V
Клас захисту	IP23
Габаритні розміри / довжина	706 mm
Габаритні розміри / ширина	300 mm
Габаритні розміри / висота	510 mm
Вага	38 kg

Однією з ключових особливостей даної установки є інтегрована інтелектуальна система синергійного управління, яка дозволяє в автоматичному режимі встановлювати оптимальні параметри зварювання залежно від вибраного зварювального дроту, складу захисного газу та характеристик матеріалу. Зручний графічний інтерфейс з багатомовною підтримкою, сенсорна навігація та логічна структура меню значно спрощують експлуатацію обладнання в умовах інтенсивного виробництва.

Імпульсно-дуговий режим, реалізований у TPS/i 500, дозволяє отримувати зварні з'єднання з мінімальним рівнем розбризкування, що є особливо актуальним під час зварювання легованих сталей та естетично важливих конструкцій. Зменшення загального тепловкладання сприяє збереженню мікроструктури основного металу, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики готового з'єднання — зокрема на його міцність, ударну в'язкість та стійкість до корозії.

2.3 Вибір методу контролю якості виробу

Однією з фундаментальних проблем сучасного зварювального виробництва залишається забезпечення сталої якості зварних з'єднань, оскільки саме їхній технічний рівень визначає надійність експлуатації, безпеку конструкцій та загальну економічну ефективність виготовленої продукції. Виникнення дефектів у зоні зварювання — як у металі шва, так і в прилеглих зонах термічного впливу — здатне істотно знизити показники міцності, опір до втомного руйнування, герметичність та інші експлуатаційні характеристики конструкції.

Якість виконання зварювальних операцій контролюється відповідно до чинної нормативно-технічної документації, включаючи затверджені технологічні регламенти, інструкції з проведення робіт, вимоги національних стандартів і проєктно-конструкторських приписів. Такий підхід дозволяє виявляти та

попереджати критичні відхилення на ранніх етапах виробництва, що в підсумку сприяє підвищенню довговічності й безпечності виробу.

Контроль дотримання технології зварювання охоплює всі стадії виготовлення зварних конструкцій — від підготовки елементів до фінальної перевірки якості з'єднань. Насамперед здійснюється контроль параметрів зварювального режиму, що виконується шляхом візуального моніторингу показників приладів, оцінки стабільності дуги та зовнішнього вигляду сформованого шва. Своєчасне спостереження за процесом дозволяє оперативно виявляти і попереджувати появу дефектів. Особливу увагу приділяють контролю положення валика, якості газового захисту та стабільності дугового горіння [16].

Зовнішній огляд виконується на всіх етапах виготовлення зварного з'єднання — під час підготовки, складання, самого процесу зварювання і після його завершення. Такий контроль є базовим і застосовується до всіх без винятку виробів, незалежно від того, чи буде використовуватись подальший неруйнівний контроль. Метод дозволяє виявити характерні дефекти, зокрема тріщини, подрізи, пори, напливи, непровари кромek або кореня шва, а також оцінити правильність формування профілю шва, рівномірність лускатості, проплав і підсилення. У багатьох випадках шви оцінюють порівнянням з еталонними зразками, відповідно до типу зварювання, положення шва в просторі та марки застосованого матеріалу.

Геометричні характеристики швів і з'єднань перевіряються за допомогою шаблонів, штангенциркулів або інших вимірювальних засобів. Лише після задовільного зовнішнього огляду виріб може бути направлений на контроль внутрішніх дефектів [16].

Для виявлення внутрішніх дефектів найчастіше застосовується ультразвукова дефектоскопія — високоточний неруйнівний метод, що базується на використанні ультразвукових хвиль різної частоти та форми. Найбільш поширеним є ехо-метод, який охоплює понад 80 % випадків контролю металопродукції. Його ефективність визначається здатністю виявляти дефекти різної орієнтації, зокрема ті, що критично впливають на безпечну експлуатацію зварних конструкцій.

Для ручного УЗ-контролю, окрім дефектоскопа та перетворювачів, необхідно мати калібрувальні зразки, контактну рідину, засоби її нанесення, інструменти для очищення поверхні, а також приладдя для фіксації результатів (лінійки, олівці, крейда, фарба тощо).

Перед проведенням ультразвукового контролю обов'язковим є підготовка поверхні — оптимальна шорсткість становить 10–20 мкм для прямого контакту та 20–40 мкм для похилого перетворювача. За наявності грубої поверхні рекомендовано знижувати робочу частоту й використовувати густі контактні рідини, зокрема гліцерин або технічні олії.

У межах цього дослідження контроль зварних швів проводився з використанням ультразвукового дефектоскопа А1214 «ЕКСПЕРТ» (рис. 2.5) призначеного для виявлення дефектів методом імпульсного ехо-контролю.



Рис. 2.5 Дефектоскоп типу А1214 «ЕКСПЕРТ» [17]

З огляду на те, що корпус насоса функціонує в умовах безпосереднього контакту з рідиною, забезпечення герметичності зварних з'єднань є обов'язковою умовою. З метою перевірки зварних швів на проникність буде застосовано метод капілярного контролю, який дозволяє виявити несплошності у приповерхневому шарі металу.

Серед капілярних методів найпоширенішими є два різновиди:

- I. Люмінесцентна дефектоскопія (ЛД) — ґрунтується на властивості люмінофорів випромінювати світло під дією ультрафіолетового випромінювання.

II. Кольорова дефектоскопія (КД) — використовує контрастні барвники, добре видимі в зоні дефекту при звичайному освітленні.

Принцип дії капілярної дефектоскопії полягає у здатності індикаторних рідин (пенетрантів) проникати в мікротріщини та пори під дією капілярного ефекту. Залежно від складу, пенетранти поділяють на люмінесцентні (що світяться під дією ультрафіолету) та кольорові (містять яскраво-червоні барвники, помітні неозброєним оком при денному світлі).

Процедура контролю включає декілька етапів:

- 1) ретельне очищення та знежирення поверхні;
- 2) нанесення пенетранту з наступною витримкою, необхідною для його проникнення у дефекти;
- 3) видалення залишків пенетранту з поверхні;
- 4) нанесення виявляючого складу (проявника) у вигляді швидко висихаючої суспензії або лакового шару.

Проявник витягує пенетрант із внутрішніх порожнин, формуючи на поверхні видимі сліди, що точно відповідають формі та розмірам дефектів.

У межах даної роботи застосовується капілярний метод контролю з використанням сертифікованих компонентів: пенетранту, проявника та очищувача, характеристика яких наведена в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 Засоби проведення контролю [16]

№ п/п	Найменування	Серія	Тара/об'єм
Контрастний капілярний метод, що змивається розчинником або водою			
1	Очисник U-87	NORD-TEST	Балон аерозоль 0,5 л
2	Пенетрант U-88	NORD-TEST	Балон аерозоль 0,5 л
3	Проявник U-89	NORD-TEST	Балон аерозоль 0,5 л
4	Пенетрант червоний Rot 3000	NORD-TEST	Балон аерозоль 0,5 л
5	Очисник U-87	NORD-TEST	Каністра 1 л, 10 л
6	Пенетрант U-88	NORD-TEST	Каністра 1 л, 10 л
7	Проявник U-89	NORD-TEST	Каністра 1 л, 10 л
8	Пенетрант червоний Rot 3000	NORD-TEST	Каністра 1 л, 10 л

2.4 Опис запропонованого технологічного процесу

Процес виготовлення виробу реалізується шляхом послідовного виконання низки взаємопов'язаних технологічних етапів, що охоплюють заготівельні, складально-зварювальні та контрольні операції. Формування технологічного маршруту ґрунтується на впровадженні прогресивних методів обробки, які спрямовані на підвищення продуктивності виробництва та відповідають сучасним тенденціям розвитку машинобудівної галузі.

На заготівельному етапі здійснюється комплекс підготовчих операцій, включаючи розкрій заготовок, видалення забруднень, вирівнювання геометрії, газополуменеве різання, механічну обробку та вхідний контроль матеріалів.

Уся металева продукція, що надходить на виробничий підрозділ, підлягає обов'язковій перевірці на наявність сертифіката відповідності. У сертифікаті мають бути зазначені: номер плавки, марка сталі, габаритні характеристики, хімічний склад, механічні властивості та обсяг постачання. За відсутності документації матеріал підлягає карантинному зберіганню та не допускається до подальшого використання до завершення випробувань (оцінювання зварюваності, хімічний аналіз, механічні тести) й оформлення висновку служби технічного контролю. Лише після цього матеріал може бути офіційно допущений до виробничого циклу.

Збереження вихідного матеріалу значною мірою залежить від умов складування. Складські приміщення повинні захищати метал від вологи, пилу та механічних ушкоджень. В ідеалі склади розміщуються у безпосередній близькості до зварювальних ділянок і обладнуються підйомно-транспортною технікою.

Операція вирівнювання листового прокату проводять у випадках, коли листовий метал надходить із викривленнями, або вони виникають під час транспортування, проводиться вирівнювання за допомогою листопрямильної машини. Усунення викривлень здійснюється методом багаторазового згинання в шаховому порядку між верхніми та нижніми валками, розташованими у кількості від 5 до 21 (обов'язково непарна кількість). Відстань між валками регулюється відповідно до товщини листа. При значних деформаціях процес повторюється

кілька разів. Для тонколистового прокату використовується більша кількість роликів, оскільки для досягнення ефекту вирівнювання необхідне більше число згинань. Машина комплектується двома столами з рольгангами — для подавання і прийому листа. У межах виробництва застосовується листоправильна установка MGSP2565 (рис. 2.6), що дозволяє ефективно вирівнювати листовий прокат зі збереженням його геометричних параметрів у межах допустимих відхилень.



Рис. 2.6 – Машина багатовалкова правильна MGSP2565 [18]

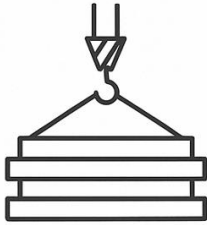
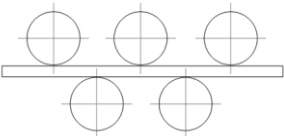
Перед подачею металу на заготівельну дільницю він обов'язково проходить операцію очищення. Метою цього етапу є усунення консервувальних речовин, оксидів, бруду, пилу та інших забруднень, які можуть негативно вплинути на якість зварних з'єднань. Наявність залишкових домішок на поверхні металу суттєво ускладнює формування якісного шва й підвищує ризик виникнення дефектів. Для очищення поверхонь деталей, що входять до складу виробу, у даному випадку використовується дробоструминева лінію SK-1 фірми ÇETİNGİL (рис. 2.7), який забезпечує ефективну обробку без утворення шкідливих викидів у навколишнє середовище.

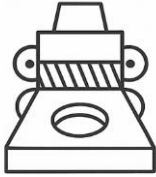
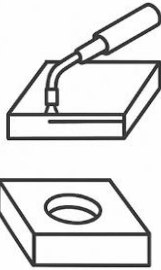
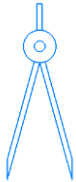
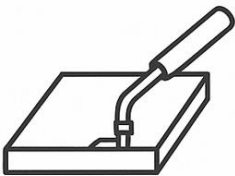
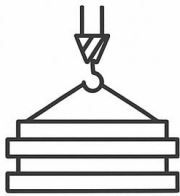
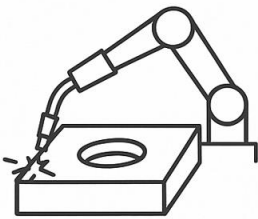
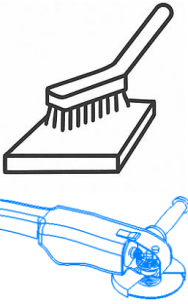


Рис. 2.7 – Прохідна установка дробоструменева типу SK-1 [18]

Запропонований технологічний процес виготовлення корпусу насоса реалізується відповідно до послідовності маршрутних операцій приведених в табл.2.7.

Таблиця 2.7 Послідовність реалізації техпроцесу

№ операції	Назва операції	Схематичне зображення операції	Опис операції	Обладнання, пристрої, інструменти
1	Приймання металопрокату		Перевірка сертифікатів на відповідність вимогам; оформлення акту приймання у 4 примірниках.	Документація, інструменти для вимірювання
2	Складування		Укладання листового металу на підкладки, дотримання правил штабельювання, запобігання деформаціям.	Підкладки, вантажопідіймальне обладнання
3	Виправлення листів		Холодне пластичне вирівнювання деформованих листів на	MGSP2565, рольганги

			листоправильній машині.	
	Очищення металопрокату		Очищення виправлених листів	Установка дробоструминава типу SK-1
4	Розкрій листа		Термічне різання листів і труб	ASOIK Expert ASOIK PROGRESS
5	Контроль заготовок		Вимірювання та візуальна перевірка параметрів заготовок.	Рулетка до 5000 мм, штангенциркуль
6	Складання виробу		Позиціонування елементів, встановлення і виконання прихваток.	Кран, шаблон-підставка, напівавтомат TPS/i 500
7	Транспортування до зварювання		Переміщення заготовки до зони зварювання.	Кран мостовий
8	Зварювання		Автоматичне зварювання швів типу T1 з обертанням деталі.	Робот зварювальний QRH 410, PT-1500, AUT 501
9	Зачистка швів		Шліфування зварних швів для забезпечення якості поверхні	УШМ Makita GA 9030 F01

10	Контроль швів		Капілярний контроль за допомогою пенетрантів та Ультразвукова дефектоскопія.	A1214 "ЕКСПЕРТ", пенетранти, проявники
----	---------------	---	--	--

У нашому випадку розкрій здійснюється з використанням систем числового програмного керування (ЧПК). На основі вибраного листа формується карта розкрою у відповідному програмному забезпеченні, що дає змогу раціонально розміщувати заготовки, мінімізуючи залишки та відходи металу.

Контурне вирізання елементів корпусу виконується на установках ASOIK Expert (рис. 2.8) та ASOIK PROGRESS (рис. 2.9) відповідно до конструкторської документації.



Рис. 2.8 Установа *ASOIK Expe* [18]



Рис.2.9 Установа *ASOIK PROGRE* [18]

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок зварювального обертача

Враховуючи елементи операцій запропонованого технологічного процесу та обладнання для його реалізації необхідним є провести розрахунок елементів позиціонера-обертача, а саме діаметр шпинделя в небезпечних перерізах та потужність приводного двигуна. Розрахунок проводимо згідно літератури [19]. Вихідними даними є $G=4500$ н, $e=50$ мм, $D=1000$ мм, $h=350$ мм, $l=160$ мм, $k=120$ мм, $R=300$ мм, $\alpha=45^\circ$.

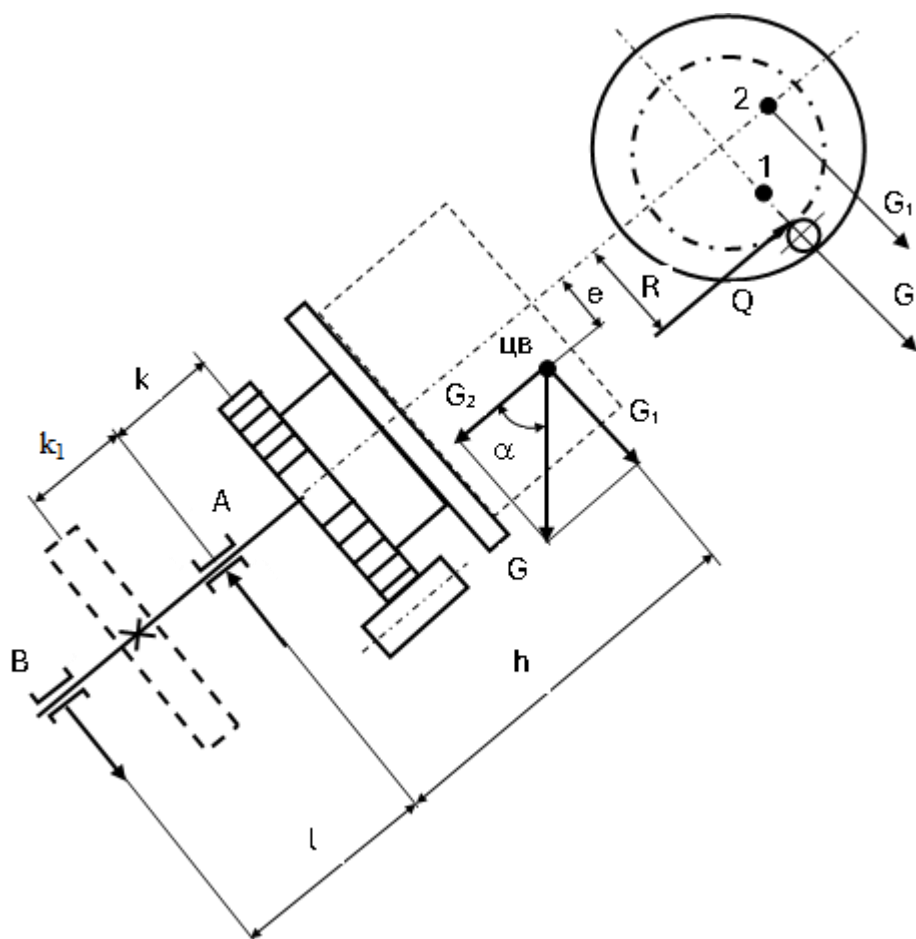


Рис. 3.1 Розрахункова схема позиціонера-обертача

Визначаємо вантажний крутний момент

$$M_{BT} = Ge \sin \alpha = 4500 \cdot 0,05 \cdot 0,707 = 159,075 \text{ Нм} \quad (3.1)$$

визначаємо окружну силу на зубчастому колесі

$$Q = \frac{M_{BT}}{R} = \frac{159,075}{0,3} = 530,25 \text{ Н} \quad (3.2)$$

Згинальні моменти в шпинделі на опорі А:
у вертикальній площині

$$M_1 = Gh \sin \alpha = 4500 \cdot 0,35 \cdot 0,707 = 1,114 \times 10^3 \text{ Нм};$$

у перпендикулярній нахиленій площині

$$M_2 = Ge \cos \alpha + Qk = 4500 \cdot 0,05 \cdot 0,707 + 530,25 \cdot 0,12 = 222,705 \text{ Нм}.$$

Результуючий згинальний момент

$$M_3 = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} = \sqrt{1114^2 + 222,705^2} = 1,36 \times 10^3 \text{ Нм} \quad (3.3)$$

Радіальні опорні реакції А_в та В_в у вертикальній площині від дії
сили G_1

$$A_{\epsilon} = G \frac{l+h}{l} \sin \alpha = 4500 \cdot \frac{0,16+0,35}{0,16} \cdot 0,707 = 1,014 \times 10^4 \text{ Н} \quad (3.4)$$

$$B_{\epsilon} = G \frac{h}{l} \sin \alpha = 4500 \cdot \frac{0,35}{0,16} \cdot 0,707 = 6,691 \times 10^3 \text{ Н} \quad (3.5)$$

А_н та В_н в перпендикулярній нахиленій площині від дії окружної сили Q та G_2

$$A_H = Q \frac{l+k}{l} + G_2 \frac{e}{l} = Q \frac{l+k}{l} + G \frac{e}{l} \cos 45^\circ, \quad (3.6)$$

$$A_H = 530,25 \cdot \frac{0,16 + 0,12}{0,16} + 4500 \cdot \frac{0,05}{0,16} \cdot 0,707 = 1,922 \times 10^3 \text{ H}$$

$$B_H = Q \frac{k}{l} + G_2 \frac{e}{l} = Q \frac{k}{l} + G \frac{e}{l} \cos 45^\circ \quad (3.7)$$

$$B_H = 530,25 \cdot \frac{0,12}{0,16} + 4500 \cdot \frac{0,05}{0,16} \cdot 0,707 = 1,392 \times 10^3 \text{ H}$$

Результуючі реакції опор

$$A = \sqrt{A_e^2 + A_H^2} = \sqrt{10140^2 + 1922^2} = 1,032 \times 10^4 \text{ H} \quad (3.8)$$

$$B = \sqrt{B_e^2 + B_H^2} = \sqrt{6961^2 + 1392^2} = 7,099 \times 10^3 \text{ H}$$

Аксіальна реакція $A_{yn} = G_2 = G \cos 45^\circ = 4500 \cdot 0,707 = 3,182 \times 10^3 \text{ H}$.

Діаметр шпинделя на опорі А визначається з розрахунку на згинання та кручення. Застосовуємо сталь 40Х для якої $[\sigma] = 80 \text{ МПа}$

$$\sigma = \frac{M_3}{0,1d^3} \leq [\sigma], \text{ звідки } d = \sqrt[3]{\frac{M_3}{0,1[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{1136}{0,1 \cdot 80 \cdot 10^6}} = 0,052 \text{ м} \quad (3.9)$$

Приймаємо $d = d_A = d_B = d_{\text{уп}} = 55 \text{ мм}$.

Визначаємо момент сил тертя в підшипниках, прийнявши $f = 0,1$

$$M_{TP} = 0,5f(Ad_A + Bd_B) + 0,5fA_{yn}d_{yn} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} M_{TP} &= 0,5 \cdot 0,1(10320 \cdot 0,055 + 7099 \cdot 0,055) + 0,5 \cdot 0,1 \cdot 3182 \cdot 0,055 \\ &= 56,65 \text{ Нм} \end{aligned}$$

Повний крутний момент, який повинен бути подоланий приводом обертача

$$M_{кр} = M_{BT} + M_{TP} = 159,075 + 56,65 = 215,725 \text{ Нм} \quad (3.11)$$

Загальний к. к. д. привідного механізма обертача $\eta_z = 0,9$ та редуктор $\eta_{ч} = 0,6$

$$\eta_0 = \eta_z \eta_{ч} = 0,9 \cdot 0,6 = 0,54. \quad (3.12)$$

Частота обертання планшайби при швидкості зварювання $V_z = 25 \text{ м/хв.}$

$$n = \frac{V_{zg}}{\pi D} = \frac{25}{3,14 \cdot 1,0} = 7,962 \frac{\text{об}}{\text{хв}}. \quad (3.13)$$

Кутова швидкість планшайби

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 7,962}{30} = 0,833 \text{ рад.} \quad (3.14)$$

Потужність приводного електродвигуна

$$N = \frac{M_{кр} \omega}{\eta_0} = \frac{215,725 \cdot 0,833}{0,54} = 332,828 \text{ Вт;} \quad (3.15)$$

Приймаємо електродвигун потужністю $N = 0,5 \text{ кВт.}$

3.2 Опис пристосування зварювання корпусу насоса

У сучасному зварювальному виробництві, орієнтованому на підвищення точності, стабільності процесу та ефективності, особливого значення набуває правильний вибір зварювального пристосування, особливо в умовах автоматизованих і роботизованих технологій. Корпус насоса, як елемент гідротехнічної системи, пред'являє підвищені вимоги до якості зварних з'єднань, герметичності та геометричної точності, що зумовлює необхідність застосування спеціалізованих пристосувань із високими експлуатаційними характеристиками.

Вибір зварювального пристосування здійснюється з урахуванням конструктивних особливостей виробу, характеру зварювальних з'єднань, просторового положення швів, а також технологічних можливостей роботизованого комплексу. Основними критеріями, які визначають доцільність використання того чи іншого типу пристосування, є [19]:

- забезпечення надійної фіксації зварюваних елементів у заданому положенні;
- відтворюваність базування та геометричної точності з'єднання;
- доступність до зони зварювання для робота з урахуванням траєкторії пальника;
- інтеграційна сумісність із маніпулятором та джерелом зварювального струму;
- можливість автоматизованого або швидкого ручного переналаштування пристосування під серійне виготовлення.

З огляду на ці вимоги, доцільним є застосування позиціонуючого складального зварювального пристосування з пневматичними притискачами та можливістю просторового орієнтування виробу на обертовому столі або платформі з приводом. Така конструкція дозволяє надійно фіксувати корпус у положенні, зручному для виконання замкнених кільцевих та поздовжніх швів у горизонтальній або горизонтально-кільцевій позиції, що забезпечує стабільну роботу зварювального робота.

Зварювальний позиціонер типу HBZ-3 (рис. 3.2) є спеціалізованим механізмом, призначеним для забезпечення раціонального просторового орієнтування заготовок під час виконання зварювальних операцій, переважно

автоматизованими або механізованими способами. Його використання дає змогу стабілізувати положення зони зварювання, поліпшити умови формування шва, а також знизити трудомісткість та підвищити загальну ефективність зварювального процесу.



Рис. 3.2 Позиціонер-обертач зварювальний HBZ-3 [18]

Позиціонер належить до пристроїв поворотного типу, конструктивно орієнтованих на обертання деталі навколо горизонтальної осі з можливістю регулювання кута нахилу платформи. Типова конфігурація HBZ-3 включає масивну опорну раму, редукторний привід, електропривод обертання та систему плавного регулювання швидкості, що забезпечує обертання у межах від 0,1 до 1,0 об/хв. Кут нахилу обертального столу регулюється в межах $0-135^{\circ}$, що дозволяє налаштовувати просторову орієнтацію виробу відповідно до заданого технологічного маршруту зварювання.

Максимальне навантаження позиціонера становить до 600 кг, що дозволяє обробляти значну частину середньогабаритних конструкцій у виробничих умовах. Висока точність позиціонування забезпечується за рахунок жорсткої механічної

бази та системи електромеханічного керування, сумісної з зовнішніми контролерами або зварювальними роботами.

Функціонально-прикладне призначення HBZ-3 охоплює роботи з циліндричними та кільцевими деталями, зварювання фланців, патрубків, корпусів насосів, резервуарів, а також вузлів трубопровідної арматури. Його конструкція дозволяє інтегрувати пристрій у виробничі лінії серійного та дрібносерійного типу, зокрема у складі автоматизованих зварювальних комплексів.

З технічної точки зору, використання HBZ-3 забезпечує:

- підвищення якості швів за рахунок виведення зони зварювання в оптимальне положення (нижнє або горизонтальне);
- зменшення кількості дефектів за рахунок стабілізації процесу;
- зростання продуктивності до 1,5–2 разів порівняно з традиційними методами позиціонування вручну;
- покращення умов праці завдяки зниженню фізичних навантажень на персонал;
- можливість стандартизації процесу при використанні в умовах масового виробництва. [18].

З урахуванням особливостей розробленого технологічного процесу зварювання корпусу насоса, запропоновано конфігурацію роботизованого зварювального поста, зображену на рисунку 3.3. Конструктивна схема поста передбачає інтеграцію промислового зварювального робота та позиціонера-обертача, що функціонують у синхронізованому режимі. Безпосереднє виконання зварювальних операцій здійснюється зварювальним маніпулятором, тоді як позиціонер забезпечує кероване обертання корпусу з регульованою швидкістю, яка відповідає заданим параметрам режиму зварювання.

Такий інженерно-технологічний підхід дає змогу досягти оптимального просторового положення зони зварювання, що сприяє стабільному проплавленню кромek стикових з'єднань, мінімізації дефектів та забезпеченню високої однорідності та якості сформованого шва. Крім того, реалізація зварювального процесу в автоматизованому режимі дозволяє підвищити точність, повторюваність і продуктивність зварювальних операцій у серійному виробництві.



Рис. 3.3 Роботизованный пост сваривания корпуса

4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Характеристика системи вентиляції у виробничих приміщеннях

Вентиляційна система у виробничих умовах виконує ключову функцію — забезпечення нормативної якості повітря та стабільності мікроклімату, що необхідні для безпечної та ефективної роботи персоналу. Основними завданнями вентиляції є видалення з приміщення забрудненого повітря, надлишкового тепла, вологи, а також забезпечення постійного притоку очищеного або свіжого атмосферного повітря у робочу зону.

Залежно від функціонального призначення вентиляційні системи класифікують на:

- приточні — подають повітря до приміщення;
- витяжні — видаляють повітря з приміщення;
- приточно-витяжні — одночасно забезпечують подачу та видалення повітря.

Природна вентиляція здійснюється за рахунок природного перепаду тиску, спричиненого різницею температур зовнішнього та внутрішнього повітря, а також під дією вітрових навантажень. Підвищення температури повітря в приміщенні призводить до його витіснення через верхні прорізи, тоді як холодне зовнішнє повітря проникає через нижні отвори, забезпечуючи природну циркуляцію [20-21].

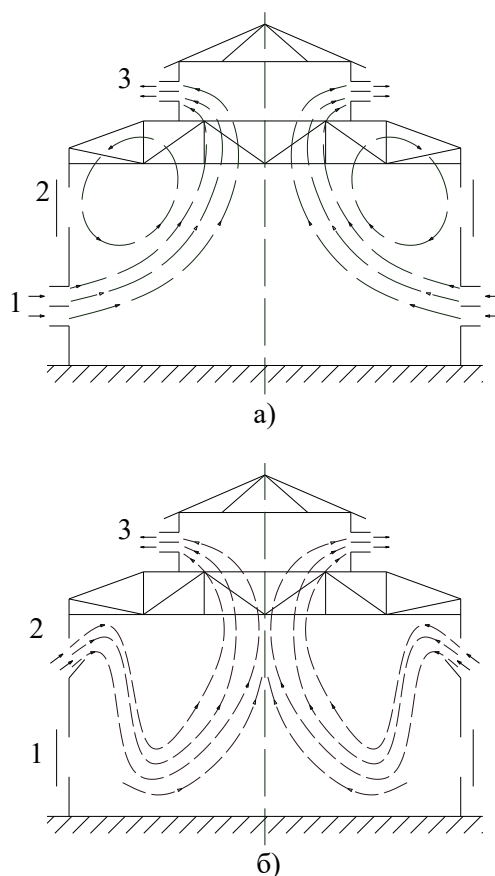
У разі дії вітру вентиляційний ефект посилюється: на підвітряній стороні будівлі створюється зона підвищеного тиску, завдяки чому свіже повітря проникає в середину приміщення, тоді як з протилежної сторони, де тиск нижчий, відбувається відтік відпрацьованого повітря. Таким чином реалізується природна витяжка без застосування додаткового обладнання.

Природна вентиляція поділяється на:

- організовану (регульовану);
- неорганізовану (випадкову, що виникає через нещільності конструкцій).

Організовану вентиляцію в цехах реалізують за допомогою систем аерації або дефлекторів. Система аерації передбачає наявність трьох горизонтальних рядів відкритих вікон або кватирок, розташованих на різних рівнях висоти (рис. 4.1а,

4.1б). У літній період повітрообмін забезпечується через відкриття нижніх (на висоті 1–1,5 м) та верхніх прорізів: свіже повітря надходить знизу, а відпрацьоване відводиться у верхній зоні.



1, 2, 3 – вентиляційні отвори; а, б – відкриті отвори в теплу і холодну пору року

Рисунок 4.1 – Система вентиляції приміщення [20]

У зимовий період свіже повітря подається переважно через верхні отвори, розташовані на висоті близько 4,7 м від підлоги, що дозволяє повітрю частково прогрітися в процесі опускання до робочої зони внаслідок перемішування з теплим внутрішнім повітрям. Така організація сприяє зменшенню температурних коливань і забезпеченню комфортних умов праці.

Регулювання інтенсивності повітрообміну здійснюється зміною положення кватирок. За наявності витяжної вентиляції свіже повітря може надходити також через технологічні нещільності у конструкціях будівлі.

Розміщення повітропроводів, повітрозабірників, витяжних отворів та аераційних елементів має відповідати чинним санітарним нормам і розрахунковим

даним щодо обсягів подачі та видалення повітря. Забір зовнішнього повітря здійснюється з боку, захищеного від основних вітрових потоків, не ближче ніж на 3 метри від витяжних отворів та інших джерел забруднення навколишнього середовища.

4.2 Захист населення в умовах надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Організація ефективного захисту населення у випадках виникнення надзвичайних ситуацій мирного чи воєнного часу є одним з ключових завдань системи цивільного захисту держави. Масштаби, структура та інтенсивність заходів безпеки визначаються специфікою регіону, ступенем промислової розвиненості, рівнем потенційної загрози з боку об'єктів підвищеної небезпеки (атомних електростанцій, хімічних підприємств), а також характером можливої дії небезпечних факторів — техногенних, біологічних або військових.

У контексті державної політики безпеки передбачено реалізацію трьох основних напрямів захисту персоналу та цивільного населення [20]:

- розміщення населення у спеціально підготовлених захисних спорудах (сховищах, укриттях);
- організоване виведення працівників підприємств у безпечні зони за межами осередку ураження;
- використання засобів індивідуального захисту органів дихання та шкіри, а також аптечок і протирадіаційних, протихімічних препаратів.

Крім того, обов'язковим є проведення навчально-практичних занять з цивільного захисту, що охоплюють теоретичну та прикладну підготовку персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях. У випадку загрози виникнення НС забезпечується система раннього оповіщення працівників та населення з метою своєчасного реагування.

Комплекс превентивних заходів також включає:

- організацію радіаційної, хімічної та біологічної розвідки;
- впровадження режимів захисту та евакуації;
- дозиметричний та санітарно-гігієнічний контроль;

- протипожежні, протиепідемічні, профілактичні дії;
- проведення рятувальних, евакуаційних та санітарно-дезінфекційних робіт у зонах ураження;
- знезараження об'єктів, територій, техніки й споруд.

4.3 Проведення рятувальних заходів у зонах хімічного ураження

Проведення аварійно-рятувальних заходів у районах, забруднених токсичними речовинами, здійснюється спеціалізованими підрозділами, зокрема: формуваннями протирадіаційного та протихімічного захисту, групами знезараження, а також підрозділами охорони громадського порядку.

Усі учасники рятувальних робіт зобов'язані бути оснащені засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) органів дихання та шкіри, зокрема протигазами, захисними костюмами, а також індивідуальними хімічними пакетами для первинної санітарної обробки [20].

У ході хімічної розвідки командир спеціалізованої групи ідентифікує тип отруйної речовини, встановлює межі зони ураження та організовує її маркування попереджувальними знаками. На підставі зібраної інформації керівник формування приймає рішення про проведення комплексу рятувальних та інших невідкладних робіт.

Санітарні групи, працюючи у визначеній зоні, здійснюють обстеження будівель і захисних укриттів, виявляють постраждалих, надають їм первинну допомогу: одягають протигази, проводять нейтралізацію небезпечних речовин на шкірі та одязі, транспортують постраждалих у пункти медичної допомоги для подальшого лікування [20].

Після завершення рятувальних робіт особовий склад направляється на пункти санітарної обробки, де здійснюється очищення ЗІЗ та медичний контроль, після чого працівники направляються на відпочинок.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи сформовано комплексний науково-обґрунтований підхід до розробки технологічного процесу виготовлення корпусу насоса НЦСГ-Е-180, який відповідає сучасним вимогам до надійності, ресурсу та герметичності зварної конструкції.

Обрано ефективну технологію автоматизованого зварювання, що передбачає використання роботизованого обладнання та високоточних джерел струму з функцією синергічного керування параметрами процесу. Це дозволило забезпечити високу стабільність зварювальної дуги, покращити повторюваність результатів і значно знизити людський вплив на якість з'єднань.

Розроблено технологічну маршрутну карту виготовлення виробу, що охоплює етапи вхідного контролю матеріалів, технологічну підготовку заготовок, складання із застосуванням спеціалізованих пристосувань, виконання зварювальних робіт у визначених просторових положеннях, а також післязварювальний контроль.

Визначено режими зварювання, що дозволяють досягти необхідної глибини проплавлення, мінімізувати зони термічного впливу та уникнути виникнення дефектів, таких як пористість, тріщини та непровар. Особлива увага приділена вибору зварювального дроту Св-08ХГ2С та оптимального складу захисної газової суміші ($\text{Ar} + \text{CO}_2$), що забезпечують формування швів з високими механічними характеристиками.

Запропонована система контролю якості включає комбінацію візуального, капілярного та ультразвукового неруйнівного контролю, що дозволяє своєчасно виявити поверхневі й внутрішні дефекти, підвищити надійність конструкції та відповідати вимогам технічних нормативів.

Впровадження представленого технологічного рішення у серійне виробництво забезпечує істотне підвищення продуктивності, покращення умов праці, зменшення виробничих витрат і наближає процес до стандартів індустрії 4.0 шляхом цифровізації та автоматизації..

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кривов Г.О Виробництво зварних конструкцій: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Г.О. Кривов, К.О. Зворикін. – К.: КВІЦ, 2012. – 896 с.
2. Панченко В. О. Гідравлічні машини і обладнання нафтових та газових комплексів : навчальний посібник / В. О. Панченко, А. А. Папченко. – Суми : Сумський державний університет, 2018. – 227 с.
3. http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=993
4. Палаш В. М. Металознавчі аспекти зварності залізовуглецевих сплавів.: Навчальний посібник. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. - 263 с.
5. ДСТУ EN ISO 5817:2022 Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів (EN ISO 5817:2014, IDT; ISO 5817:2014, IDT).
6. ДСТУ EN ISO 15614-1:2019 Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталей і дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів (EN ISO 15614-1:2017, IDT; ISO 15614-1:2017, Corrected version 2017-10-01, IDT).
7. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. – К.: Основа, 2021. – 400 с.
8. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Кривцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв, за загальною редакцією академіка НАН України, доктора технічних наук, професора Б. Є. Патона. – Миколаїв : НУК, 2017.– 346 с.
9. Костін О.М. Зварювальні матеріали: навч. посібник / О.М. Костін – Миколаїв: НУК, 2004. –225 с.
10. 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.
11. Биковский, О.Г. Довідник зварника: довідник / О.Г. Биковський, І.В. Пінковський. - К.: Техніка, 2002. – 336 с.
 12. Александров О.Г. Джерела живлення для дугового зварювання та наплавлення [Текст]: навчальний посібник / О.Г. Александров, Д.А. Антонюк, Капустян О.Є. – Львів: Новий світ – 2000, 2013. – 224 с.
 13. https://hydrolider.com.ua/ua/p579840841-svarochnye-roboty-cloos.html?srsId=AfmBOoog3YvdW26m6cBCJ7Zl_iZLgC1_as8AuEdzSvvgQRLhB3L3qJgS
 14. <https://www.indiamart.com/proddetail/qineo-step-600-c-mig-mag-co2-welding-machine-20014384791>
 15. <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tehnolohiyi/produkty/>
 16. Камель Г. І. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с.
 17. <https://standart-pribor.com.ua/product/defektoskop-ud4-76-tofd-versiya/>
 18. <https://svartech.com.ua/>
 19. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві: Навч. посібник / А.С. Карпенко. - К.: Арістей, 2005. - 268 с.
 20. Безпека життєдіяльності та охорона праці : підруч. / В.В. Сокурєнко, О.М. Бандурка та ін. – Харків : ХНУВС, 2021. 308 с.
 21. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві. Навчальний посібник. – К.: Основа, 2010. – 240 с.

ДОДАТКИ