

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Кафедра зварювального виробництва**

«ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО»
Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ
(підпис)
« ____ » _____ 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Технологія виготовлення твердопаливної печі»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЗВ-з21
Алексенко Анатолій Павлович

Керівник:
Доцент к.т.н.
Степанов Денис Володимирович _____

Консультант з охорони праці:
Зав. каф., д.т.н., професор
Левченко Олег Григорович _____

Консультант з організаційно-економічного розділу:
Доцент, к.е.н., доцент
Нараєвський Сергій Вікторович _____

Рецензент:
Зав. каф. ЛТФТ, к.т.н., доц.
Кагляк Олексій Дмитрович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені
Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Алексенко Анатолію Павловичу

1. Тема проєкту «Технологія виготовлення твердопаливної печі», керівник проєкту Степанов Денис Володимирович, к.т.н. затверджені наказом по університету від «28» травня 2026 р. № 1987-с.

2. Термін подання студентом проєкту: «09» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: кресленик твердопаливної печі; річна програма випуску – 60 штук; матеріал основний – сталь S235JR; тип виробництва – дрібносерійне.

4. Зміст пояснювальної записки: конструкторсько-технологічний аналіз твердопаливної печі; обґрунтування та вибір способу зварювання; обґрунтування та вибір зварювальних матеріалів; розроблення технологічного процесу зварювання; економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень; питання охорони праці на ділянці зварювання.

5. Перелік графічного матеріалу: 1) Твердопаливна піч. Загальний вигляд, А1; 2) Твердопаливна піч. Стінка передня, А1; 3) Твердопаливна піч. Нижня частина, А1; 4) Твердопаливна піч. Верхня стінка, А1; 5) Твердопаливна піч. Бокова стінка, А2; 6) Твердопаливна піч. Ніжка А2; 7) Схема технологічного процесу зварювання, А1.

6. Консультанти розділів проєкту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф.		
Організаційно-економічний розділ	Нараєвський С.В. доцент		

7. Дата видачі завдання: «20» квітня 2026 р.

Календарний план виконання проєкту

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та вивчення конструкції твердопаливної печі	02.2026	
2	Конструкторсько-технологічний аналіз виробу та основного матеріалу	03.2026	
3	Обґрунтування та вибір способу зварювання	03.2026	
4	Обґрунтування та вибір зварювальних матеріалів	04.2026	
5	Розроблення технологічного процесу зварювання	04.2026	
6	Виконання організаційно-економічного розділу	05.2026	
7	Розроблення розділу з охорони праці	05.2026	
8	Оформлення графічної частини проєкту	05.2026	
9	Оформлення пояснювальної записки	06.2026	
10	Попередній захист дипломного проєкту	06.2026	

Студент _____

Анатолій АЛЕКСЕНКО

Керівник _____

Денис СТЕПАНОВ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломного проекту складається з 69 сторінок, містить 13 таблиці, 5 рисунків, та перелік посилань із 31 найменувань.

ТВЕРДОПАЛИВНА ПІЧ, MAG-ЗВАРЮВАННЯ, СТАЛЬ S235JR, ЗВАРНЕ З'ЄДНАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, КОЕФІЦІЄНТ НАПЛАВЛЕННЯ, ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ДРІТ, ЗАХИСНИЙ ГАЗ, КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ, СОБІВАРТІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Об'єкт розроблення – технологічний процес виготовлення твердопаливної печі.

Предмет розроблення – технологія дугового зварювання твердопаливної печі в умовах дрібносерійного виробництва з річною програмою випуску 60 одиниць.

Мета роботи полягає у розробленні раціонального технологічного процесу зварювання твердопаливної печі із застосуванням сучасних засобів механізованого зварювання в середовищі захисних газів, що забезпечує необхідну якість зварних з'єднань та економічну доцільність виробництва.

Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання: проведено конструкторсько-технологічний аналіз виробу та основного матеріалу з оцінкою зварюваності сталі S235JR за еквівалентом вуглецю; обґрунтовано вибір механізованого зварювання в суміші захисних газів (процес 135 за ISO 4063) як основного способу з'єднання; виконано розрахунок режимів зварювання для кожного типу зварного шва; розроблено маршрутну карту технологічного процесу; визначено потребу в зварювальному устаткуванні; здійснено розрахунок собівартості виробу; розроблено заходи з охорони праці на ділянці зварювання.

Отримані результати мають практичне значення та можуть бути для виробництва та збуту твердопаливних печей.

ABSTRACT

The explanatory note of the graduation project consists of 73 pages, contains 13 tables, 5 figures, and a reference list of 31 items.

SOLID FUEL STOVE, MAG WELDING, S235JR STEEL, WELDED JOINT, TECHNOLOGICAL PROCESS, DEPOSITION RATE, WELDING WIRE, SHIELDING GAS, QUALITY CONTROL, PRODUCTION COST, OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY

The object of development is the manufacturing technology of a solid fuel stove.

The subject of development is the arc welding technology for a solid fuel stove in a small-scale production environment with an annual production volume of 60 units.

The aim of the work is to develop a rational welding technology for a solid fuel stove using modern mechanized gas-shielded welding equipment, ensuring the required quality of welded joints and the economic viability of production.

To achieve this goal, the following tasks were completed: a design and technological analysis of the product and the base material was conducted, including the weldability assessment of S235JR steel by carbon equivalent; the choice of mechanized metal active gas welding (process 135 according to ISO 4063) as the primary joining method was justified; welding parameters were calculated for each type of weld; a routing sheet of the technological process was developed; the requirements for welding equipment were determined; the product cost was calculated; and occupational health and safety measures for the welding area were developed.

The results obtained are of practical value and can be utilized for the production and distribution of solid fuel stoves.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ	10
1.1 Характеристика основного матеріалу конструкції	10
1.1.1 Хімічний склад сталі S235JR	10
1.1.2 Механічні властивості сталі S235JR.....	11
1.1.3 Оцінка зварюваності основного матеріалу.....	12
1.2 Аналіз конструкції твердопаливної печі	14
1.2.2 Габаритні розміри, маса та конструктивні елементи.....	14
1.2.3 Типи зварних з'єднань та швів конструкції	17
1.2.4 Аналіз технологічності конструкції та доступу до місць зварювання.....	19
Висновки до розділу 1	20
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР СПОСОБУ ЗВАРЮВАННЯ	22
2.1 Аналіз можливих способів зварювання.....	22
2.1.1 Ручне дугове зварювання покритими електродами	22
2.1.2 Механізоване зварювання в середовищі захисних газів.....	23
2.1.4 Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом	24
2.1.5 Твердотіпельне (волоконне) лазерне зварювання (процес 521).....	25
2.2 Обґрунтування вибору способу зварювання твердопаливної печі	26
Висновки до розділу 2	28

					ЗВз2101.00.000ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Алексенко А.П.			Технологія виготовнення твердопаливної печі			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Степанов Д.В.								6	69
								КПІ ім. Ігоря Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О. Патона			
Н. Контр.		Лисак В.В.									
Затверд.		Квасницький В.В.									

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ...	29
3.1 Вимоги до зварювальних матеріалів	29
3.2 Вибір зварювального дроту.....	30
3.3 Вибір захисного газу	32
Висновки до розділу 3	33
4 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ЗВАРЮВАННЯ	34
4.1 Підготовка деталей до зварювання.....	34
4.1.2 Правка, розмічання та різання заготовок	35
4.1.3 Розробка кромки під зварювання.....	36
4.1.3 Очищення поверхонь деталей.....	36
4.2 Складання конструкції	37
4.2.1 Послідовність складання твердопаливної печі	37
4.2.2 Прихоплення деталей	37
4.2.3 Складально-зварювальне пристосування	38
4.3 Зварювання конструкції	38
4.3.2 Послідовність накладання зварних швів	42
4.3.3 Заходи щодо зменшення зварювальних деформацій та напружень	42
4.4 Вибір зварювального устаткування	43
4.5 Контроль якості зварних з'єднань	45
4.5.1 Візуально-вимірювальний контроль.....	45
4.6 Операції після зварювання	46
Висновки до розділу 4	48

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	49
5.1 Розрахунок витрат на основні та допоміжні матеріали	49
5.2 Розрахунок витрат на електроенергію.....	50
5.3 Розрахунок витрат на заробітну плату	51
5.4 Калькуляція собівартості зварювальних робіт.....	52
Висновки до розділу 5	53
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	55
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при зварюванні	55
6.2 Заходи щодо забезпечення безпеки праці	56
6.3 Електробезпека	59
6.4 Пожежна безпека	60
6.5 Засоби індивідуального захисту зварника.....	61
Висновки до розділу 6	61
ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	64

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В сучасному цивілізованому світі, здавалося б проблему опалення приміщень та житла вирішено раз і на завжди за допомогою централізованих джерел енергії таких як газ, електроенергія та централізоване постачання гарячої води. Автономне опалення залишилось проблемою невеликого відсотка людей, що працюють на виїзних роботах, туристів, любителів активного відпочинку. Проте, військова агресія російської федерації, що направлена на фізичне знищення громадян України одним з способів якої являється спроба залишити в холоді та без опалення людей показує на вразливість централізованих систем джерел енергії.

Один з найдавніших засобів опалення що не потребує для роботи додаткових джерел енергії, може працювати на багатьох видах твердого палива, може бути доволі мобільним, приготувати їжу, швидко віддавати тепло являється твердопаливна піч (в народі «буржуйка»).

Буржуйки широко застосовувалися в роки Другої світової війни в приміщеннях після відключення центрального опалення, так і в похідних умовах- в бліндажах, землянках, вагонах-теплушках. Під час АТО буржуйки виготовлені переважно зі старих газових балонів, постачалися волонтерами для польових умов.

З початку повномасштабного вторгнення, необхідність автономних, невибагливих до палива, мобільних способів опалення сильно виросла.

На даний час буржуйки системно потребують: в першу чергу ЗСУ, також для невеликих майстерень, гаражів, дач. Отже, пропонується в межах дипломної роботи розробити технологію виготовлення металевої печі для опалення приміщень до 60 м³. Таку кубатуру мають більшість бліндажів та дачних кімнат також гаражних приміщень.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

При виготовленні твердопаливної печі пропонується використовувати сталь S235JR (найближчий аналог сталь Ст3сп). Доцільність використання саме цієї сталі обґрунтовується її нижчою ціною відносно легованих сталей, доброю зварюваністю та враховуючи, що при виготовленні елементів широко буде застосовуватися згинання листового прокату ця сталь не має обмежень чи додаткових вимог при механічній обробці. Основною конструктивною перевагою твердопаливної печі, являється її розбірна конструкція, що дозволить забезпечити високу мобільність. Також, застосування згинання елементів замість зварювання збільшує швидкість виготовлення та зменшує собівартість.

1.1 Характеристика основного матеріалу конструкції

Матеріалом для твердопаливної печі є нелегована конструкційна сталь S235JR згідно EN 10025-2

Сталь S235JR застосовується при виготовлення металоконструкцій, деталей машин, опор, рам та фланців, де не потрібні висока міцність або специфічна корозійна стійкість.

Аналогами цієї сталі в являються Ст3пс, Ст3сп, С235.

1.1.1 Хімічний склад сталі S235JR

Сталь S235JR є нелегована конструкційна сталь звичайної якості.

Хімічний склад сталі S235JR за EN 10025-2:2019 (максимальні значення за аналізом плавки) наведено у таблиці 1.1.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі S235JR за EN 10025-2:2019 (% , не більше) [17]

C	N	Mn	P	S
0,20	0,55	1,40	0,035	0,035

Згідно наведених даних, сталь S235JR невисокий вміст вуглецю (не більше 0,35 %), створює передумови для задовільної зварюваності, також сталь немає обмежень для плазмового та лазерного розкрою. Оскільки вміст кремнію та вуглецю низький, грат після плазми відходить легко, а кромка не перегартовується.

1.1.2 Механічні властивості сталі S235JR

Механічні властивості сталі S235JR залежать від товщини прокату. У таблиці 1.2 наведено основні механічні характеристики для товщини 3 мм відповідно до EN 10025-2:2019.

Відповідно до вказаних в таблиці механічних властивостей, сталь S235JR належить до низькоміцних вуглецевих сталей із границею текучості близько 235 МПа та границею міцності від 360 МПа до 510 МПа.

Такий рівень міцнісних характеристик достатній для виготовлення твердопаливних печей призначених для обігрівання невеликих приміщень. Високі показники пластичності (відносне подовження не менше 19 %) свідчать про достатню стійкість при випадкових ударах при перевезенні наприклад.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі S235JR за EN 10025-2:2019

Показник	Позначення	Значення	Одиниця
Границя текучості	$\sigma_T (R_e)$	не менше 235	МПа
Тимчасовий опір розриву	$\sigma_B (R_m)$	360...510	МПа
Відносне подовження при розриві (для $t = 3$ мм)	δ_5	не менше 19	%
Робота удару KV при +20 °C	KV ⁺²⁰	не менше 27	Дж
Робота удару KV при -20 °C	KV ⁻²⁰	не регламентується	—
Твердість за Брінеллем	HB	близько 120	—
Густина	ρ	7850	кг/м³
Модуль пружності	E	$2.1 \cdot 10^5$	МПа

1.1.3 Оцінка зварюваності основного матеріалу

Оцінка зварюваності матеріалів – це комплексний аналіз того, як метал реагує на термічний цикл зварювання, чи схильний він до утворення дефектів (тріщин, пор) та чи збереже зварне з'єднання необхідні експлуатаційні властивості.

Головним критерієм оцінки зварюваності вуглецевих та легованих сталей є еквівалент вуглецю (Секв або СЕ) розробленим Міжнародним інститутом зварювання. Він враховує вплив хімічного складу на схильність сталі до гартування та утворення холодних тріщин у навколошовній зоні.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок здійснюється за формулою 1.1:

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

де $C_{\text{екв}}$ – еквівалент вуглецю, %;

C, Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu – масова частка відповідного елемента в сталі, %.

Для розрахунку еквівалента вуглецю приймемо середні значення хімічного складу сталі S235JR: C = 0,14 %; Mn = 0,55 %; інші легуючі елементи Cr, Ni, Cu, Mo, V відсутні або знаходяться в сотих долях відсотка. Підставивши ці значення у формулу (1.1), отримаємо:

$$C_{\text{екв}} = 0,14 + \frac{0,55}{6} = 0,23 \%. \quad (1.2)$$

На основі отриманого значення $C_{\text{екв}}$ усі сталі ділять на чотири основні групи:

Перша група – добра зварюваність ($C_{\text{екв}} \leq 0,25 \%$) зварювання без обмежень

Друга група – задовільна зварюваність ($C_{\text{екв}}$ від 0,25% до 0,35 %) зварювання можливе без попереднього підігріву

Третя група – обмежена зварюваність ($C_{\text{екв}}$ від 0,35% до 0,45 %) рекомендується попередній підігрів до температури від 100 °C до 200 °C

Четверта група – погана зварюваність ($C_{\text{екв}} > 0,45 \%$) вимагається обов'язковий попередній підігрів та наступна термічна обробка.

Значення $C_{\text{екв}}$ 0,23 % знаходиться нижче 0,25 %. Це підтверджує, що сталь S235JR відноситься до групи добре зварюваних матеріалів. Вона не схильна до гартування в зоні термічного впливу, не вимагає підігріву (за нормальних температур) і підходить для зварювання будь-якими методами (MAG, ММА, TIG) без обмежень.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи, невелику товщину сталі (3 мм) та вимоги до зварних з'єднань які не передбачають експлуатацію при динамічних навантаженнях для зварювання елементів твердопаливної печі не потрібні спеціальні умови.

1.2 Аналіз конструкції твердопаливної печі

Твердопаливна піч являє собою конструкцію, основне призначення якої, обігрів приміщень. Додатковими опціями є можливість приготування їжі, просушування одягу та взуття.

Пропонується такі вимоги до виготовлення металевої печі:

- Задля високої мобільності розробити розбірну конструкцію
- Максимально використовувати наявне зварювальне та металообробне обладнання
- Прорахувати виготовлення виробу з мінімальною металоємністю та трудовитратами задля зменшення собівартості.

Умови експлуатації твердопаливної печі: механічні навантаження переважно статичні від топлива та ємностей для їжі (до 0,25 кН/м²), температурні умови передбачають собою повільне нагрівання та повільне охолодження від -15 °С до 450 °С.

1.2.2 Габаритні розміри, маса та конструктивні елементи

Твердопаливна піч має габаритні розміри 506 мм × 450 мм × 310 мм та масу 25 кг у зібраному вигляді. Конструктивно виріб являє собою зібрану за допомогою шпильок та упорів твердопаливну піч. Більшість ребер жорсткості (90%) утворені за рахунок згинання на листогибі. При виготовленні конструктивних елементів розраховано широке застосування ЧПК-плазмового різання.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік та характеристики основних деталей, які входять до складу твердопаливної печі, подано у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Склад твердопаливної печі згідно зі специфікацією

Позиція	Позначення	Розміри, мм	Товщина, мм	К-ть
1	Стінка 1. Нижня частина	500*350	3	1
2	Бокова стінка	486*250	3	2
3	Ребро жорсткості на бокову стінку	350*50	3	4
4	Задня стінка	328*296	3	1
5	Стінка 1. Верхня частина	500*350	3	1
6	Труба димова	діам. 101*L50	4	1
7	Передня стінка	328*296	3	1
8	Нащільник дверей 1	186*30	3	2
9	Нащільник дверей 2	114*30	3	2
10	Дверцята передньої стінки	162*150	3	1
11	Вушко дверей 1	25*15	3	2
12	Вушко дверей 2	50*27	3	2
13	Болтик фіксації	L 12	діам.6	3
14	Ручка дверки	66*36	3	1
15	Крючок ручки	25*8	3	1
16	Шпилька ніжки	L 470	діам.10	4
17	Упор ніжки	діам.25	3	4
18	П'ятка ніжки	діам. 45	3	4
19	Гайка ніжки	діам. 45 h 15	3	4

Загальний вигляд твердопаливної печі із зазначенням основних конструктивних елементів та їх взаємного розташування представлений на рисунку 1.1.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

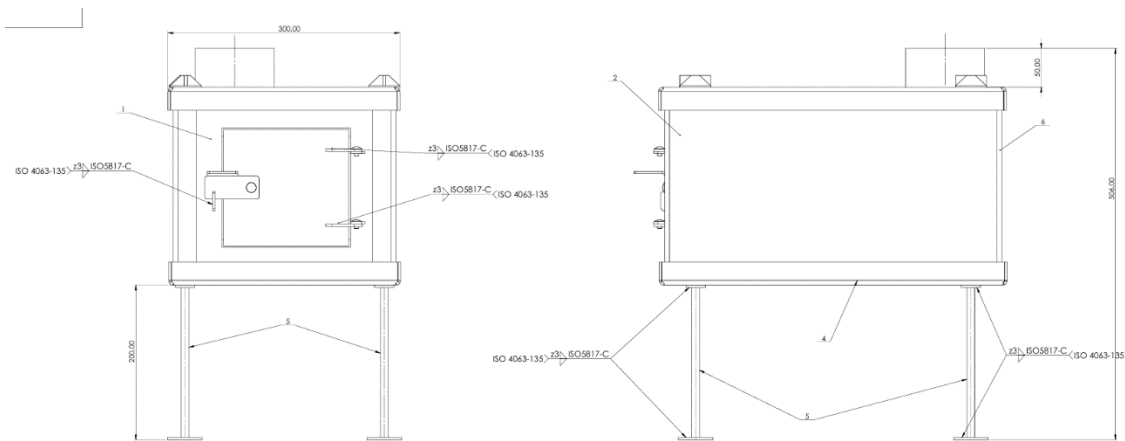


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд твердопаливної печі

Виходячи, з даних таблиці 1.3 та зображень на рисунку 1.1 робимо узагальнення. Твердопаливна піч складається з 41 окремої деталі 19 найменувань, маса яких у зібраному стані становить 25 кг. Товщина елементів- 3 мм. Ребра жорсткості (поз. 1,2,4,5,7), що зігнуті безпосередньо з елементів, та ребра жорсткості (поз. 3), які приварюються виконують функцію запобігання теплових деформацій під час експлуатації. Стінка 1 верхня частина та нижня частина мають (поз. 1..5) мають отвори Ø 10.5 мм для фіксації елементів шпильками (поз. 16) та гайками (поз. 19).

Завдяки широкому застосування згинання елементів, що дозволило надати необхідну жорсткість конструкції без збільшення товщини матеріалу, розбірній конструкції, твердопаливна піч має мобільну конструкцію без втрати експлуатаційних характеристик.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.3 Типи зварних з'єднань та швів конструкції

Відповідно до складального кресленика твердопаливної печі, у конструкції застосовуються один тип зварного шва, позначених номерами 1...6. Позначення типів з'єднань на кресленику виконані згідно ISO 2553:2013 [11]. Перелік застосованих зварних з'єднань та їх характеристики наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристика зварних швів балки опорної за ISO 2553:2013

№ шва	Розмір шва	Позначення	Довжина шва, мм	Кількість
1	z3		6X3 50(100)	1
2	z3		8X3 50(100)	2
3	z3		20	1
4	z3		22	1
5	z3		15	2
6	z3		19	1
7	z3		320	1
8	z3		32	1
9	z3		32	1

Всі шви таврові, виконуються в нижньому положенні, тип зварних з'єднань схематично зображено на на рисунку 1.2.

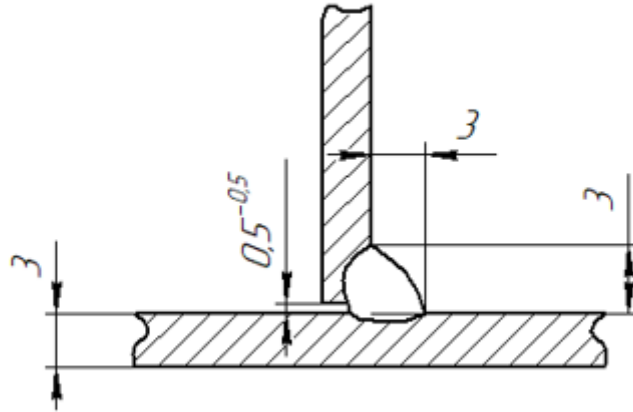


Рисунок 1.2 – Тип зварних з'єднань твердопаливної печі

Всі зварні з'єднання твердопаливної печі не сприймають робочі навантаження, які переважно виникають через нагрівання на охолодження. Вимоги, що висуваються до швів: забезпечити прикріплення ребер жорсткості, націльників, кріплень елементів відкривання та фіксації дверцят.

Загальна сумарна довжина зварних швів у твердопаливній печі становить близько 1,1 м, що є показником збалансованого розрахунку елементів конструкції.

При розробці твердопаливної печі планувалась мінімізація зварних з'єднань за рахунок широкого використання ЧПК- плазмового різання та згинання на листогинальному верстаті.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.4 Аналіз технологічності конструкції та доступу до місць зварювання

При розробці технології виготовлення твердопаливної печі було враховано: можливість автоматизованого розкрою деталей на верстаті ЧПК-плазмового різання (рисунок 1.3), мінімізацію та доступність зварних з'єднань, ремонтпридатність. Всі заходи спрямовані на зменшення трудових та матеріальних витрат при забезпеченні необхідних експлуатаційних властивостей.



Рисунок 1.3 – Верстат плазмового різання з ЧПК

Доступність зварних з'єднань твердопаливної печі оцінюється як добра, оскільки конструкція виготовляється та зварюється поелементно, заготовки мають невелику вагу їх легко повертати та фіксувати у зручному для зварювання положенню. Більшість швів (№1, 3, 4, 5, 6, 8, 9) на зовнішніх поверхнях конструкції і доступні для зварювальника з трьох сторін. Внутрішні шви ребер жорсткості та нащільників (№ 2, 7) також мають вільний доступ.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При розробці твердопаливної печі було прийнято рішення мінімізувати асортимент матеріалів задля збільшення технологічності зварної конструкції: з 41 деталі (19 найменувань) 30 виготовлені з одного матеріалу, а саме сталь S235JR товщиною 3 мм. Листовий прокат можна вирізати за одну установку на верстаті ЧПК- плазмового різання, гнуття заготовок проводиться на листозгинальній машині, різка кругляка на стрічковій пилі. Стандартний катет шва (3 мм) входять до діапазону, що добре забезпечується механізованим зварюванням електродним дротом діаметром 0,8 мм.

Оцінка коефіцієнта використання матеріалу з урахуванням розкрою листів, становить приблизно 0,93, що відповідає середньому рівню для виробів типу твердопаливних печей.

Застосовані заходи по мінімізації зварних швів підвищують продуктивність виготовлення виробу та зменшують кількість дефектів.

Висновки до розділу 1

На підставі виконаного конструкторсько-технологічного аналізу встановлено, що твердопаливна піч являє собою металоконструкцію коробчастого перерізу масою 25 кг, виготовлену зі сталі S235JR за EN 10025-2:2019. Основні технічні характеристики конструкції (розміри, маса, товщини елементів, типи зварних з'єднань) відповідають типовим для твердопаливних печей і не містять елементів, що ускладнюють технологічний процес.

Сталь S235JR при типовому хімічному складі має розрахунковий еквівалент вуглецю 0,23%, що відповідає першій групі зварюваності (добра зварюваність). Механічні властивості сталі (σ_t не менше 235 МПа, σ_v = від 360 МПа до 510 МПа, δ_5 не менше 19 %) достатні для забезпечення здатності балки витримувати теплові та статичні навантаження за експлуатації в Україні.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція твердопаливної печі є технологічною: вона має раціональне розчленування на деталі, які можна виготовити стандартним заготівельним обладнанням; забезпечує добру доступність до всіх зварних швів та можливість механізації зварювальних операцій; передбачає мінімізацію швів; що сприяє зниженню зварювальних деформацій; має невеликий асортимент матеріалів. Подальші розділи присвячені обґрунтуванню вибору способу зварювання, зварювальних матеріалів та розробленню технологічного процесу виготовлення виробу.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР СПОСОБУ ЗВАРЮВАННЯ

Від правильного вибору способу зварювання залежить собівартість в першу чергу зварної конструкції, оскільки висока продуктивність яка може бути забезпечена автоматизацією чи роботизацією виробництва може бути знівельована ціною обладнання, низька якість та надійність зварних з'єднань може виникнути через невідповідну кваліфікацію персоналу, в такому випадку відновлення дефектних ділянок потребує додаткових капіталовкладень та людського ресурсу. Обґрунтування вибору способу передбачає зіставлення декількох (зазвичай найбільш поширених) способів зварювання та вибору найбільш оптимального, який максимально підходить по для матеріалу, продуктивності та умовах виробництва [14]

2.1 Аналіз можливих способів зварювання

Зварні шви твердопаливної печі мають невелику довжину (більшість від 15 до 32 мм, окрім одного шва 320 мм), матеріал низьковуглецеву сталь (S235JR за EN 10025-2:2019 яка має добру зварюваність), товщина 3 мм, умови виробництва з річною програмою близько 60 одиниць.

Враховуючи наведені конструктивні особливості, пропонується до розгляду чотири основних способи зварювання: ручне дугове зварювання покритими електродами (процес 111), механізоване дугове зварювання в середовищі активних захисних газів (процес 135), лазерне зварювання (процес 521) та аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (процес 141).

2.1.1 Ручне дугове зварювання покритими електродами

Ручне дугове зварювання (ММА) почало широко використовуватися після винаходу покритого електроду в 1910 роках та поступово витіснило з

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більшості сфер поширене на той час газове зварювання. На даний час, використання цього способу обмежується монтажними роботами або при невеликих об'ємах зварювання.

Сутність процесу полягає у плавленні основного металу теплом електричної дуги, що горить між металевим стрижнем покритого електрода та виробом; електродний стрижень одночасно є присадним металом, а покриття електрода виконує функції газового та шлакового захисту зварювальної ванни, стабілізації дуги, легування металу шва.

Переваги способу MMA: зварювання у всіх просторових положеннях (нижнє, горизонтальне, вертикальне, стельове); висока мобільність процесу; широкий асортимент електродів різного призначення, які забезпечують одержання швів із необхідними механічними властивостями; мінімальні капітальні витрати на обладнання (джерело живлення інверторного або трансформаторного типу вартістю від 7 до 60 тис. грн)

Недоліки способу MMA: низька продуктивність (від 0,8 кг/год до 1,2 кг/год при застосуванні електрода $\varnothing$ 3 мм), через необхідність частих зупинок для заміни електродів та очищення шлаку знижується коефіцієнт використання часу зварювання від 0,3 до 0,4, внаслідок чого фактична продуктивність не перевищує від 0,2 кг до 0,5 кг наплавленого металу за годину, низький коефіцієнт використання електродного металу (від 60% до 65 %) через втрати на огарки, розбризкування та шлакоутворення, потребує високої кваліфікації зварювальника, обмежена можливість механізувати процес.

2.1.2 Механізоване зварювання в середовищі захисних газів

Механізоване дугове зварювання в середовищі активних захисних газів (MAG, процес 135) Процес полягає у плавленні основного металу теплом дуги, що горить між електродним дротом, який безперервно подається з котушки, та виробом; захист зварювальної ванни від впливу атмосферного повітря

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється потоком активного газу (вуглекислого газу CO₂ або сумішей на основі аргону з додаванням CO₂ та кисню). Широко застосовується від невеликих автомайстерень до заводів та цехів з виготовлення металоконструкцій.

Переваги способу MAG: Продуктивність наплавлення становить від 3 кг/год до 8 кг/год, що у 3 – 4 рази вище, ніж у ММА, універсальність щодо товщин (від 0,5 мм до 0,8 мм і до товстостінних металів), Значний коефіцієнт використання електродного металу (від 93 % до 98 %) суттєво знижує витрати матеріалів порівняно з ММА, знижені вимоги до кваліфікації зварювальника, легко піддається автоматизації.

Недоліки способу MAG: низька мобільність, чутливість якості процесу до протягів та вітру у цеху (швидкість руху повітря не повинна перевищувати 1...2 м/с), вищі капітальні витрати на обладнання порівняно з РДЗ (інверторний напівавтомат коштує від 32 тис. грн до 170 тис. грн), більш жорсткі вимоги до підготовки кромки відносно ММА.

2.1.4 Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом

Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом (TIG/GTAW, процес 141) спосіб зварювання при якому дуга горить між вольфрамовим неплавким електродом та виробом в інертній атмосфері аргону з подачею присадного дроту ззовні.

Переваги способу TIG: висока якість зварювання тонкостінних виробів, легованих сталей, кольорових металів та сплавів, універсальність за матеріалами, можливість зварювання без присадки, можливість механізації та автоматизації

Недоліки способу TIG: низька продуктивність (від 0,5 кг/год до 1,5 кг/год), висока вартість обладнання (від 50 тис. грн до 250 тис. грн), висока кваліфікація зварювальників, потрібна вкрай ретельна підготовка кромки що зварюються.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.5 Твердотілецьне (волоконне) лазерне зварювання (процес 521)

Твердотілецьне лазерне зварювання (переважно із застосуванням волоконних джерел) є одним із найбільш технологічних та високопродуктивних способів з'єднання металів у сучасному виробництві. Останніми роками ручні лазерні апарати масово впроваджуються в промисловість, виступаючи прямою альтернативою TIG-зварюванню при роботі з тонколистовим металом та нержавіючими сталями.

Сутність процесу: полягає у плавленні основного та присадного металу під дією висококонцентрованого пучка когерентного світлового випромінювання. Зварювання виконується або шляхом чистого сплавлення кромek, або з автоматичною синхронною подачею присадного дроту. Завдяки високій щільності енергії в точці фокусування променя досягається глибоке проплавлення металу за мінімальної ширини зварного шва.

Переваги способу лазерного зварювання (521): Лінійна швидкість зварювання лазером у 3–5 разів вища порівняно з MIG/MAG і до 10 разів вища порівняно з TIG, що кардинально підвищує темпи виробництва, мінімальні термічні деформації, невисокі вимоги до кваліфікації зварника

Недоліки способу лазерного зварювання (521): високі капітальні витрати (промисловий комплекс для ручного лазерного зварювання потужністю від 1,5 кВт до 3,0 кВт коштує від 180 тис. грн до 650 тис. грн і більше), висока вартість обслуговування та оптичних розхідників, критичні вимоги до точності збирання кромek, підвищена небезпека для персоналу через лазерне випромінювання (клас небезпеки 4).

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Обґрунтування вибору способу зварювання твердопаливної печі

Для вибору розглянутих способів зварювання складено порівняльну таблицю (таблиця 2.1). Значення параметрів прийнято згідно спеціальної літератури [14] та технічних характеристик зварювального обладнання.

Відповідно наведених у таблиці 2.1 даних з урахуванням конкретних умов виготовлення твердопаливної печі робимо висновки. Ручне дугове зварювання яке потребує високої кваліфікації зварювальника, має низьку продуктивність, та високі витрати матеріалів не має переваг саме для умов виготовлення виробу. Висока мобільність та універсальність не вимагається для роботи в стаціонарних умовах.

Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом для зварювання низьковуглецевої сталі внаслідок високих вимог щодо підготовки кромки до зварювання (що потребує додаткових ресурсів), низької продуктивності не релевантне для виготовлення виробу.

Твердотіле лазерне зварювання по своїх характеристиках практично ідеально підходить для виконання зварних швів твердопаливної печі: надзвичайно висока швидкість зварювання, можливість виконувати зварні з'єднання без присадкового матеріалу (за умов зазору до 0,3 мм). Проте, використання цього типу зварювання економічно не вигідно для дрібносерійного виробництва виробу через високу вартість обладнання.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика способів дугового зварювання

Показник	ММА (111)	MAG (135)	TIG (141)	Лазерне зварювання (521)
Продуктивність наплавлення, кг/год	0,8 – 1,2	3,0 – 8,0	0,5 – 1,5	-
Коефіцієнт використання дроту (електрода)	0,6 – 0,65	0,93 – 0,98	0,98	0,99
Коефіцієнт використання поста	0,30 – 0,40	0,60 – 0,80	0,40 – 0,55	0,70 – 0,85
Швидкість зварювання, см/хв	10 – 30	30 – 80	5 – 15	до 150
Просторове положення	Усі	Усі	Усі	Усі
Капітальні витрати на обладнання, тис. грн	7 – 60	32 – 170	50 – 250	180 – 650

Механізоване зварювання в середовищі активних захисних газів (MAG) найбільш відповідає для умов виготовлення твердопаливної печі. Продуктивність наплавлення від 3 кг/год до 8 кг/год від 2,3 до 3 разів перевищує показник ММА та TIG. Коефіцієнт використання дроту від 93 % до 98 %

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує економію зварювальних матеріалів до 35 % порівняно з ММА. Також одним з вирішальних факторів являється висока швидкість зварювання. Витрати на обладнання (від 32 тис. грн до 170 тис. грн) відповідають можливостям дрібносерійного виробництва.

Висновки до розділу 2

Порівнявши, чотири способи дугового зварювання, що розглянуті для виготовлення твердопаливної печі за найбільшою відповідністю характеристик обрано механізоване дугове зварювання в середовищі захисних газів (процес 135 за ДСТУ EN ISO 4063:2014, MAG) як основного способу зварювання. Переваги цього способу зварювання: висока швидкість зварювання (від 30 см/хв до 80 см/хв), висока продуктивність (від 3 кг/год до 8 кг/год наплавленого металу), значний коефіцієнт використання електродного дроту (від 93 % до 98 %), можливість зварювання у всіх просторових положеннях, відносно невисокі капітальні витрати на обладнання.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вибір зварювальних матеріалів є одним з визначальних чинників якості зварного з'єднання. Окрім, якості ціна зварювальних матеріалів, може сильно впливати на кінцеву собівартість виробу. Відповідно до обраного способу зварювання (MAG) до розгляду приймаються дві групи зварювальних матеріалів: електродний суцільний дріт для механізованого зварювання, захисний газ для ізоляції зварювальної ванни від атмосфери. Вимоги до кожної групи матеріалів формуються на підставі фізико-хімічних властивостей основного металу, необхідних характеристик металу шва, вибраної якості зварних з'єднань (ISO 5817 рівень якості C).

3.1 Вимоги до зварювальних матеріалів

Основною вимогою до присадного металу при зварюванні маловуглецевих конструкційних сталей є забезпечення рівномірності зварного з'єднання з основним металом за показниками границі текучості, тимчасового опору розриву, відносного подовження та ударної в'язкості. З урахуванням механічних властивостей сталі S235JR (σ_t не менше 235 МПа, $\sigma_{\text{в}}$ = від 360 МПа до 510 МПа, δ_5 не менше 19 %, KCU+20 не менше 27 Дж/см²) метал шва повинен мати не нижчі показники, щоб зварне з'єднання відповідало міцності основного металу.

Хімічний склад металу шва має забезпечити відсутність схильності до кристалізаційних та холодних тріщин. Вміст сірки та фосфору у наплавленому металі не повинен перевищувати 0,025 %, вуглецю – 0,12 %, щоб зберегти пластичні та в'язкі властивості з'єднання .

Для зварювального дроту висуваються вимоги до стабільності хімічного складу та геометричних параметрів.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суцільний дріт для MAG-зварювання повинен мати рівномірну мідну металізацію без відшарувань (для забезпечення електричного контакту, захисту від корозії, плавної подачі) постійний діаметр з допуском від + 0,01 до – 0,04 мм для дроту 0,8 мм (за EN ISO 544) , високий рівень очищення від іржі, мастил та окалини. Захисний газ повинен відповідати нормативним вимогам щодо чистоти (не менше 99,8 % для CO₂) та вологості (точка роси не вище –35 °С).

3.2 Вибір зварювального дроту

Для механізованого зварювання в середовищі захисних газів вуглецевих сталей промисловістю України випускається кілька марок суцільного зварювального дроту, основною серед яких є Св-08Г2С за ДСТУ 2240:2012. Міжнародними аналогами цього дроту є ER70S-6 за стандартом AWS A5.18 та G 49A 3 C1 S6 за ДСТУ EN ISO 14341:2015 . Хімічний склад дроту Св-08Г2С та його порівняння з міжнародним аналогом ER70S-6 наведено у таблиці 3.1.

Ключова відмінність дроту Св-08Г2С від ER70S-6 полягає у вищому вмісті марганцю (до 2,10 % проти 1,85 %), що забезпечує кращі розкислювальні властивості при зварюванні у чистому CO₂. Водночас нижчий вміст вуглецю у Св-08Г2С сприяє кращій пластичності металу шва.

Механічні властивості металу, наплавленого дротом Св-08Г2С у різних захисних середовищах, мають суттєві відмінності, що ілюструє вплив хімічного складу захисного газу на кінцеву якість з'єднання. Зведені дані наведено у таблиці 3.2.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Хімічний склад зварювальних дротів суцільного перерізу для
MAG-зварювання, %

Марка дроту	C	Si	Mn	Cr	S, P	Ni
СВ-08Г2С (ДСТУ 2240:2012)	0,05 – 0,11	0,70 – 0,95	1,80 – 2,10	≤ 0,20	≤ 0,025	≤ 0,25
ER70S-6 (AWS A5.18)	0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	≤ 0,15	≤ 0,035	≤ 0,15
G 49A (ДСТУ EN ISO 14341)	0,06 – 0,14	0,50 – 1,20	1,30 – 2,00	≤ 0,15	≤ 0,025	≤ 0,15

Таблиця 3.2 – Механічні властивості металу шва при зварюванні дротом
СВ-08Г2С Ø1,2 мм

Показник	100 % CO ₂	75 % Ar + 25 % CO ₂	82 % Ar + 18 % CO ₂	Од.
Границя текучості σ _т	440	460	470	МПа
Тимчасовий опір розриву σ _в	560	565	570	МПа
Відносне подовження δ ₅	29	27	28	%

Вибір дроту Св-08Г2С для виготовлення твердопаливної печі обумовлений такими чинниками: повна металургійна сумісність з основним металом (сталь S235JR); забезпечення рівномірності; зменшення витрат розбризкування в 3-4 рази [11], доступність дроту на українському ринку за ціною від 100 грн/кг до 120 грн/кг.

Діаметр дроту обирається залежно від товщини зварюваних елементів та діапазону зварювального струму. Для товщин від 0,5 до 5,0 мм (товщина елементів твердопаливної печі 3 мм) , та режимів зварювання у діапазоні від 40 А до 150 А найбільш раціональним є дріт діаметром 0,8 мм.

3.3 Вибір захисного газу

Вибір захисного газу для MAG-зварювання вуглецевих сталей здійснюється з трьох основних варіантів: чистий CO₂ (позначення С1 за ДСТУ EN ISO 14175:2016), суміші Ar + CO₂ з вмістом CO₂ від 5 % до 25 % (група М21) та суміші Ar + O₂ + CO₂ (група М24). Порівняльна характеристика газових середовищ наведена у таблиці 3.3.

Враховуючи, вартість та вимоги до якості зварних з'єднань для виготовлення твердопаливної печі обирається суміш захисних газів Ar + 18 % CO₂ групи М21 за ДСТУ EN ISO 14175:2016. Ця суміш забезпечує стабільну дугу з мінімальним розбризкуванням, економію зварювального дроту, якісні характеристики зварного шва.

Витрата захисного газу при MAG-зварюванні дротом Ø 0,8 мм становить від 6 л/хв до 10 л/хв, враховуючи що зварювання буде проводитись в цехових умовах.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Характеристика захисних газів для MAG-зварювання вуглецевих сталей [11, 13]

Параметр	100 % CO ₂ (C1)	Ar + 18 % CO ₂ (M21)	Ar + 25 % CO ₂ (M21)	Ar + 8 % CO ₂ + 2 % O ₂ (M24)
Стабільність дуги	низька	висока	висока	дуже висока
Розбризкування	значне	низьке	помірне	мінімальне
Глибина проплавлення	значна	помірна	значна	помірна
Струменеве перенесення	неможливе	можливе	можливе	можливе
Вартість, грн/м ³ (2025)	21 – 29	117 – 67	120 – 170	180 – 220

Висновки до розділу 3

В результаті порівняльного аналізу зварювальних матеріалів, для виготовлення твердопаливної печі обрано: суцільний зварювальний дріт марки Св-08Г2С діаметром 0,8 мм за ДСТУ 2240:2012 (міжнародний аналог ER70S-6). Захисне середовище – газова суміш Ar + 18 % CO₂ (позначення M21 за ДСТУ EN ISO 14175:2016).

Обрана комбінація матеріалів забезпечує одержання зварних з'єднань з механічними властивостями, які мають запас міцності відносно основного металу: границя текучості металу шва становить від 440 до 470 МПа, тимчасовий опір розриву від 560 до 570 МПа, відносне подовження від 27 % до 29 %, що дозволить знівелювати можливий вплив похибок зварювальника. Орієнтовні витрати на загальну довжину зварних швів твердопаливної печі (1,1 м) близько 70 г дроту Св-08Г2С, 45 л захисної суміші.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ЗВАРЮВАННЯ

Технологічний процес виготовлення твердопаливної печі- чітка послідовність дій, спрямованих на виготовлення виробу, який відповідає вимогам згідно технічної документації.

Технологічний процес розроблено з урахуванням обраного способу зварювання (MAG у середовищі суміші $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$), типу виробництва (дрібносерійний), довжини та доступності зварних швів.

При розробці технологічного процесу керувався особистим досвідом, навчальними посібниками та підходами виробництв України щодо розробки маршрутної технології виготовлення зварних металоконструкцій.

4.1 Підготовка деталей до зварювання

Правильна підготовка деталей являється основою якісного зварного з'єднання. За статистикою великих промислових аудитів та дослідницьких інститутів у галузі зварювання (зокрема TWI та Lincoln Electric) [21], від 50% до 70% усіх дефектів, які виявляють у готових зварних з'єднаннях, виникають не через помилки безпосередньо під час зварювання, а закладаються ще на етапі підготовки, зачищення та складання. Також, особисті спостереження причин виникнення дефектів зварювання на підприємстві Полтавський ГЗК показують, що до 60% причиною дефектів являється етап підготовки з'єднань.

4.1.1 Вхідний контроль матеріалів

Метою вхідного контролю являється відповідність металевого прокату та зварювальних матеріалів вимогам технічної документації. Для листового прокату сталі S235JR та круглого прокату контролюються: наявність супровідного сертифіката якості із зазначенням хімічного складу та механічних

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостей плавки та стан поверхні на відсутність глибоких задирів, розшарувань.

Зварювальний дріт Св-08Г2С перевіряється на: цілісність захисної упаковки, сліди корозії, якість намотки.

Захисний газ (суміш М21) повинен мати документ постачальника. Балони перевіряються на наявність клейма державної повірки та відсутність зовнішніх пошкоджень корпусу.

4.1.2 Правка, розмічання та різання заготовок

Для виготовлення елементів твердопаливної печі відхилення від площинності листового прокату має опосередковане значення. Стандартний лист сталі S235JR товщиною 3 мм має розміри 2000 мм × 1000 мм та перед зварюванням буде виконуватись різання на верстаті з ЧПК з контролером висоти різача по напрузі дуги (ТНС), що забезпечить постійну відстань між соплом плазмотрона та металом під час різання незважаючи на нерівності листового прокату. Для розмічання використовується рулетки, штангенциркуля, кутники. Різання заготовок з листового прокату виконується на верстаті плазмового різання з ЧПК.

Прокат круглий $\varnothing$ 10 мм розрізається стрічково-пилковим верстатом механізованою подачею та упором, що зменшує час різання та розмічання.

Після різання деталі перевіряються на відповідність розмірам креслення з використанням метрологічного інструменту (рулетки, штангенциркуля, кутників).

Після різання та розмічання виконується згинання заготовок з листового прокату на листозгинальному верстаті.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.3 Розробка кромок під зварювання

Розробка кромок виконується для забезпечення доступу сопла зварювального пальника до кореня шва та повного проплавлення з'єднання.

Для всіх зварних з'єднань твердопаливної печі, які є тавровими (z3) та мають товщину елементів 3 мм спеціальної розробки кромок не потребується – кромки залишаються під прямим кутом після різання.

4.1.3 Очищення поверхонь деталей

Наявність поверхні металу іржі, окалини, мастил, фарби призводить до утворення пор, шлакових включень, несплавлень та інших дефектів, а у найгіршому випадку – холодних або гарячих тріщин. Тому очищення поверхонь перед зварюванням є обов'язковою операцією, яка виконується у зоні шириною не менше 20 мм з кожного боку майбутнього зварного шва.

Для елементів твердопаливної печі застосовується очищення шліфувальним кругом за допомогою кутової шліфувальної машинки безпосередньо перед зварюванням. Мастила та забруднення органічного походження видаляються протиранням обрізком ганчірки, змоченим у бензині або ацетоні. Після очищення поверхні не повинно залишатися жодних слідів масла, вологи чи забруднень.

Дотримання вимог до чистоти поверхонь зони зварювання зменшує ризик виникнення пор у зварних з'єднаннях.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Складання конструкції

4.2.1 Послідовність складання твердопаливної печі

Для твердопаливної печі прийнято така послідовність складальних операцій. На першому етапі елемент бокової стінки (поз 2) з нанесеними розмічальними лініями встановлюється на складально-зварювальному столі кутики (поз 3) позиціонуються згідно розмітці та притискаються струбцинами та прихоплюються. Аналогічно проводиться складання другої стінки. На другому етапі до елемента передньої стінки (поз 1) з розміткою притискаються струбцинами деталі (поз 1) та виконується прихоплення. Третій етап- нарізання різьби на прокаті круглого $\varnothing$ 10 мм довжиною 30 мм розмічання місць прихоплення фіксаторів та п'яток ніжки (поз 4), виконується прихоплення, перпендикулярність контролюється кутником. Ніжок 4 шт. всі збираються відповідно третьому етапу.

4.2.2 Прихоплення деталей

Прихоплення для утримання деталей в правильному положенні перед зварюванням виконуються зварювальним обладнанням та зварювальними матеріалами, що і основні шви. Враховуючи, невелику товщину матеріалу (сталь S235JR товщиною 3 мм) та в своїй більшості короткі шви (від 15 мм до 32 мм) прихватки виконувати довжиною від 3 мм до 5 мм, катетом від 2 мм до 3 мм, відстань між прихватами від 12 мм до 15 мм. Прихватки розміщуються симетрично з обох сторін деталі для запобігання деформацій при зварюванні. Режим зварювання прихваток: струм $I_{зв}$ = від 70 А до 100 А, напруга U_d = від 16 В до 19 В, швидкість подачі дроту від 4,5 м/хв до 5,5 м/хв.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2.3 Складально-зварювальне пристосування

Для складання та зварювання елементів твердопаливної печі використовується складально-зварювальний стіл з оснасткою (струбцини), що виконує функції базування деталей та їх фіксацію у заданому положенні.

Технічні характеристики столу: довжина 1742 мм, ширина 1000 мм, висота 900 мм.

Використання складально-зварювального стола забезпечує: жорстку взаємну фіксацію деталей що зварюються, можливість після фіксації перед зварюванням перевірити точність збирання, зменшення деформацій завдяки виконанню зварних швів при закріплених елементах, збільшення продуктивності.

4.3 Зварювання конструкції

Розрахунок режиму зварювання плавким електродом в захисних газах (MAG) передбачає визначення площі перерізу зварного шва, вибір діаметра дроту, розрахунок сили струму через густину струму, напруги дуги через емпіричну залежність від струму та швидкості зварювання через коефіцієнт наплавлення. Розрахунок проводиться за допомогою посібника [12].

Зварні шви твердопаливної печі мають однаковий катет (z_3) та будуть виконуватися в одному просторовому положенні (нижнє). Розрахунок для типу зварного шва виробу окремо проводити не потрібно.

Площа перерізу кутового зварного шва визначається за формулою:

$$F = 0,5 \cdot K^2 \cdot \mu, \quad (4.1)$$

де F – площа перерізу шва, см^2 ;

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

K – катет шва, см;

μ – коефіцієнт опуклості шва ($\mu = 1,0 \dots 1,2$; приймається $\mu = 1,2$ для MAG).

Сила зварювального струму при MAG-зварюванні визначається через густину струму:

$$I_{зв} = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot J, \quad (4.2)$$

де $I_{зв}$ – сила зварювального струму, А;

d_e – діаметр електродного дроту, мм;

J – густина струму, А/мм² (для MAG-зварювання дротом Ø 0,8 мм J = від 70 А/мм² до 230 А/мм² залежно від режиму перенесення).

Напруга дуги в режимі коротких замикань та перехідному до струменевого визначається за емпіричною залежністю [14]:

$$U_d = 14 + 0,05 \cdot I_{зв}. \quad (4.3)$$

Швидкість зварювання розраховується за формулою:

$$V_{зв} = \frac{\alpha_n \cdot I_{зв}}{100 \cdot \gamma \cdot F}, \quad (4.4)$$

де $V_{зв}$ – швидкість зварювання, м/год;

α_n – коефіцієнт наплавлення, г/(А·год); для дроту Св-08Г2С у суміші М21 α_n = від 10 до 14; середнє значення $\alpha_n = 12$ г/(А·год);

γ – густина наплавленого металу, $\gamma = 7,85$ г/см³;

F – площа перерізу шва, см².

Швидкість подачі електродного дроту визначається з умови балансу маси наплавленого металу:

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{\Pi} = \frac{4 \cdot \alpha_{\Pi} \cdot I_{ЗВ}}{\pi \cdot d_e^2 \cdot \gamma'} \quad (4.5)$$

де V_{Π} – швидкість подачі дроту, м/год.

Виліт електрода приймається у межах $L_{\text{вил}} =$ (від 8 до 12) d_e , що для дроту $\varnothing 0,8$ мм становить від 8 мм до 12 мм. Витрата захисного газу Q_{Γ} для дроту діаметром 0,8 мм становить від 6 л/хв до 10 л/хв залежно від умов зварювання.

Розрахунок режимів для швів твердопаливної печі (зЗ , катет К = 3 мм).

Площа перерізу шва за формулою (4.1):

$$F = 0,5 \cdot 0,3^2 \cdot 1,2 = 0,054 \text{ см}^2.$$

Сила струму при густині $J = 190 \text{ А/мм}^2$ (режим коротких замикань) за формулою (4.2):

$$I_{ЗВ1} = \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \cdot 190 = 1,131 \cdot 130 = 95 \text{ А.}$$

Приймається $I_{ЗВ1} = 95 \text{ А}$. Напруга дуги за формулою (4.3):

$$U_{д1} = 14 + 0,05 \cdot 95 = 18,6 \text{ В.}$$

Приймається $U_{д1} = 19 \text{ В}$. Швидкість зварювання за формулою (4.4):

$$V_{ЗВ1} = \frac{12 \cdot 95}{100 \cdot 7,85 \cdot 0,054} = 26,9 \text{ м/год.}$$

Швидкість подачі дроту за формулою (4.5):

$$V_{\Pi1} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 95}{3,14 \cdot 0,64 \cdot 7,85} = 289 \text{ м/год} = 4,82 \text{ м/хв.}$$

Виліт електрода приймається $L_{\text{вил}} = 10 \text{ мм}$; витрата газу $Q_{\Gamma} = 10 \text{ л/хв}$.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зведена таблиця розрахованих режимів зварювання для швів твердопаливної печі наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розраховані режими МАG-зварювання балки опорної дротом Св-08Г2С Ø1,2 мм у суміші Ar + 18 % CO₂

Тип	Ізв, А	Уд, В	Vзв, м/год	Vп, м/хв	Qг, л/хв	Режим
z3-Δ3	95	19	26,9	4,82	10	КЗ

Одержані значення параметрів режимів зварювання відповідають рекомендованим діапазоном для МАG-зварювання дротом Ø 0,8 мм виробниками зварювального обладнання [12].

Розрахунок маси наплавленого металу виконується для оцінки витрат зварювального дроту. Загальна довжина зварних швів твердопаливної печі L=1,1 м, площа поперечного зварювального шва F = 0,054 см², γ – густина наплавленого металу, γ = 7,85 г/см³. Розраховується за формулою (4.12)

$$G_H = F \cdot L \cdot \gamma = 0,054 \cdot 110 \cdot 7,85 = 46,6 \text{ г} \quad (4.12)$$

Сума маса наплавленого металу для однієї твердопаливної печі становить 46,6 г, або близько 0,047 кг. З урахуванням коефіцієнта витрат дроту при МАG-зварюванні (втрати на розбризкування, вигар, залишки у механізмі подачі дорівнюють 12 %) становить 52,2 г.

Час горіння дуги для МАG-зварювання розраховується за формулою (4.13)

$$T_o = \frac{L}{V_{зв1}} = \frac{1,1}{0,4483} = 2,45 \text{ хв.} \quad (4.13)$$

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрата захисного газу розраховується за формулою (4.14):

$$Q_{г.заг} = q_{г.сер} \cdot T_o \cdot 60. \quad (4.14)$$

При середній витраті $q_{г.сер} = 10$ л/хв підстановка значень у формулу (4.14) дає результат (4.15):

$$Q_{г.заг} = 10 \cdot 0,41 \cdot 60 = 246 \text{ л} \approx 0,246 \text{ м}^3. \quad (4.15)$$

Отже, на виготовлення однієї твердопаливної печі в умовах МАГ-зварювання необхідно витратити близько 0,047 кг електродного дроту, 0,246 м³ захисної газової суміші, що становитиме основу для подальших економічних розрахунків.

4.3.2 Послідовність накладання зварних швів

Враховуючи, невелику довжину більшості зварних швів (15...32 мм), катет 3 мм, спосіб зварювання (МАГ), поелементне зварювання заготовок твердопаливної печі, задля запобігання кутових деформацій , які виникають при односторонньому накладанні кутових швів виконувати симетричне чергування швів. Зварні шви виконуються відповідно технологічній схемі. Після виконання зварних з'єднань перевіряється геометрія елементів.

4.3.3 Заходи щодо зменшення зварювальних деформацій та напружень

При розробці технології виготовлення твердопаливної печі було прийнято рішення про мінімізацію зварних з'єднань за рахунок широкого застосування виготовлення ребер жорсткості на елементах конструкції за допомогою листозгинального верстату.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Катети швів обрані мінімально достатніми для сприйняття розрахункових навантажень, що зменшує обсяг наплавленого металу та, відповідно, теплову енергію, яка вводиться у конструкцію. Елементи конструкції мають коробчасту форму, що забезпечує достатню жорсткість при зварюванні. Обраний спосіб зварювання (MAG) зменшує деформації на 30- 40 % відносно ручного дугового зварювання покритими електродами (ММА). Жорстке закріплення елементів на складально-зварювальному столі обмежує переміщення деталей у процесі зварювання та охолодження.

Таким чином, комплексні рішення дозволять виготовляти елементи твердопаливної печі з мінімальним впливом зварювальних деформацій та напружень.

4.4 Вибір зварювального устаткування

На основі розрахованих параметрів режимів зварювання, технологічних вимог до процесу та умов дрібносерійного виробництва проводимо вибір зварювального обладнання. Максимальний розрахунковий зварювальний струм для виконання шва Z3-Δ3 становить 120 А, що з урахуванням запасу потужності від 30 % до 40 % визначає необхідну верхню межу струму напівавтомата від 160 А до 180 А.

Враховуючи невелику загальну довжину швів (1,1 м) та дрібносерійне виробництво оптимальним за співвідношенням ціна-якість та технічними характеристиками для умов виготовлення твердопаливної печі є інверторний напівавтомат MAG-зварювання JASIC MIG-200 (N 220).

Технічні характеристики обраного напівавтомата JASIC MIG-200 (N 220) наведено у таблиці 4.2.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики напівавтомата JASIC MIG-200 (N 220).

Параметр	Значення
Тип джерела живлення	Інверторний, з вольт-амперною характеристикою CV (жорсткою)
Напруга живлення	Однофазна 200 В 50 Гц
Діапазон регулювання струму, А	10 – 200
Діапазон регулювання напруги, В	15,4 – 24
Напруга холостого ходу, В	53
Діаметр електродного дроту, мм	0,6 – 1,0
Швидкість подачі дроту, м/хв	1,5 – 16
Режими зварювання	MIG/MAG, MMA,
ККД джерела живлення	0,85
Маса джерела, кг	12,5
Ступінь захисту корпусу	IP 21
Клас ізоляції	F
Ціна (станом на 2025 р.), грн	34 000 – 44 000

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Допоміжне устаткування робочого місця зварника включає 18 кг, газовий редуктор Abicor Binzel для суміші $\text{Ar} + \text{CO}_2$ з робочим діапазоном від 0 до 25 л/хв, металеву щітку для очищення швів, рукавиці, інструмент для контролю (шаблони зварника, штангенциркуль, рулетку, лупу).

4.5 Контроль якості зварних з'єднань

Контроль якості зварних з'єднань твердопаливної печі здійснюється згідно стандарту ДСТУ EN ISO 5817:2018, який визначає три рівні якості (В – найвищий, С – проміжний, D – базовий) залежно від допустимих розмірів дефектів. Для твердопаливної печі, яка сприймає помірні статичні та теплові навантаження і працює у звичайних умовах експлуатації, обирається рівень якості С. Зварні з'єднання твердопаливної печі при їх можливому руйнуванні, не несуть прямої загрози життю та здоров'ю людей або матеріальним цінностям. Також, задля зменшення загального бюджету виробу обираємо візуально-вимірювальний контроль.

4.5.1 Візуально-вимірювальний контроль

Для 100% швів твердопаливної печі проводиться візуально-вимірювальний контроль згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 17637:2018. Метою контролю є виявлення поверхневих дефектів (тріщин, пор, напливів, підрізів, несплавлень) і перевірка відповідності геометричних параметрів швів вимогам креслення. Візуально-вимірювальний контроль виконується на освітленому робочому місці зварювальника з природним або штучним освітленням не менше 500 лк при відстані спостереження не більше 600 мм та куті зору не менше 30°.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для виконання візуально-вимірjuвального контролю застосовуються: шаблон зварювальника УШС-3 для вимірювання катетів кутових швів (з точністю $\pm 0,1$ мм), універсальний кутовий шаблон для вимірювання перпендикулярності деталей; лінійка металева 300 мм.

Шви, у яких при контролю виявлено неприпустимі дефекти, відбраковуються та підлягають ремонту. Ремонт полягає у механічному видаленні дефекту шляхом шліфування на глибину не менше товщини шва плюс 2 мм запасу, після чого дефектна ділянка повторно заварюється на тому ж режимі, що і основний шов, і проходить повторний візуально-вимірjuвальний контроль.

4.6 Операції після зварювання

Післязварювальні операції включають очищення швів від бризок металу та окалини, контроль якості, правку конструкції (за потреби). Очищення швів виконується металевою щіткою що застосовується з кутошліфувальною машинкою, зубилом для видалення великих бризок. Правка конструкції виконується у разі виявлення відхилень геометрії елементів твердопаливної печі понад допуск ± 4 мм. Невелика товщина деталей (3 мм) дозволяє виконувати правку ручним інструментом або механічним способом.

4.7 Маршрутна карта технологічного процесу

Маршрутна карта технологічного процесу виготовлення твердопаливної печі оформлюється у табличному вигляді відповідно до вимог ДСТУ 3951.1:2000 та містить послідовний перелік усіх операцій з зазначенням обладнання, інструменту, технологічних режимів та норм часу. Зведений перелік операцій технологічного процесу представлено у таблиці 4.3.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Стислий перелік операцій технологічного процесу виготовлення твердопаливної печі

№ п/п	Найменування операції	Устаткування	Основні переходи	Тн, хв
10	Різальна	Апарат плазмового різання стрічкова пила по металу	Різання заготовок	30
20	Очищальна	Шліфувальна машинка	Очистити заготовки	25
30	Розмічальна	Рулетка, кутник, рисувалка	Розмітити згідно креслення	15
40	Згинальна	Листогиб	Провести згинання	35
50	Фіксувальна	Струбцини	Зафіксувати заготовки	15
60	Прихвачувальна	Зварювальний апарат	Прихватити зафіксовані заготовки.	10
70	Зварювальна	Зварювальний апарат	Провести зварювання 135 способом,	15
80	Нарізальна	Плашка М10	Виконати нарізання різьби	20
90	Розмічальна	Рулетка, кутник, рисувалка	Розмітити згідно креслення місце для фіксаторів ніжки	15
100	Прихвачувальна	Зварювальний апарат	Прихватити п'ятки та фіксатори ніжки креслення	5
110	Зварювальна	Зварювальний апарат	Провести зварювання 135 способом,	10
120	Складальна	-----	Зібрати згідно креслення елементи твердопаливної печі за та зафіксувати за допомогою ніжок	15
-	Разом	-	-	210

Загальна трудомісткість виготовлення однієї твердопаливної печі за розробленим технологічним процесом становить 210 хв або 3,5 год. Це є раціональним значенням для дрібносерійного виробництва з річною програмою 60 одиниць, що відповідає сумарному трудовому навантаженню близько 210 год/рік, або приблизно 0,2 ставки одного робітника.

Висновки до розділу 4

Зроблені висновки за результатами розроблення технологічного процесу твердопаливної печі. Технологічний процес складається з 12 послідовних операцій загальною трудомісткістю 210 хв (3,5 год) на одну твердопаливну піч. Процес передбачає використання високопродуктивного заготівельного обладнання (верстат плазмового різання з ЧПК, стрічкову пилку, листозгинальний верстат), сучасне зварювальне устаткування (інверторний напівавтомат JASIC MIG-200 (N 220)).

Розраховано параметри режимів MAG-зварювання струм зварювання у діапазоні 95 А, напруга дуги 19 В, швидкість зварювання 29 м/год, швидкість подачі дроту 4,8 м/хв, витрата захисного газу 10 л/хв. Сумарна маса наплавленого металу становить 0,047 кг, витрата дроту Св-08Г2С – 0,052 кг, витрата захисної суміші Ar + CO₂ – 0,246 м³ на одну твердопаливну піч.

Розроблена технологія виготовлення твердопаливної печі по мінімізації зварних з'єднань у поєднанні з жорстким закріпленням елементів на складально-зварювальному столі дозволяє обмежити залишкові деформації. Контроль якості зварних з'єднань вибрано візуально-вимірювальний, що забезпечує достатній рівень надійності конструкції для умов експлуатації.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Невід’ємною складовою дипломного проекту є економічне обґрунтування що має на меті визначення собівартості виробу, доцільність технічних рішень з економічної точки зору та формування відпускної ціни виробу. Розрахунок собівартості включає в себе: основні матеріали, допоміжні матеріали, витрати на електроенергію, основна та додаткова заробітна плата, єдиний соціальний внесок, загальновиробничі та адміністративні витрати. Розрахунок виконується на одну твердопаливну піч та проєктується на річну програму випуску 60 одиниць.

5.1 Розрахунок витрат на основні та допоміжні матеріали

До основних матеріалів, що складають масу готового виробу, належать листовий прокат зі сталі S235JR товщиною 3 мм та круглий прокат Ø 10 мм мм. Маса прокату, необхідного для виготовлення однієї твердопаливної печі, визначається з урахуванням коефіцієнта використання металу, який при плазмовому розкрої листа становить $K_{\text{вик}} = \text{від } 0,85 \text{ до } 0,92$. Для розрахунку приймаємо середнє значення $K_{\text{вик}} = 0,88$. Тоді маса прокату, необхідного для отримання одного виробу, обчислюється за формулою (5.1):

$$G_{\text{прок}} = \frac{G_{\text{вир}}}{K_{\text{вик}}} = \frac{25}{0,88} = 28,4 \text{ кг}, \quad (5.1)$$

де $G_{\text{вир}}$ – маса готового виробу, кг;

$K_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання металу.

Витрати на основні та допоміжні зварювальні матеріали наведено у таблиці 5.1. Ціни матеріалів прийнято за станом на 2026 рік за даними сайту Metalika.ua [29] та інтернет-магазину компанії «Джейсік Україна» [31]

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Розрахунок витрат на матеріали на одну твердопаливну піч

Матеріал	К-сть	Од. вим.	Ціна за од., грн	Сума, грн
Лист S235JR 3 мм	28,4	кг	56,00	1590,4
прокат Ø 10 мм	1,25	кг	63,00	78,75
Дріт Св-08Г2С Ø 0,8	0,052	кг	110,0	5,72
Газ Ar + 18 % CO ₂	0,246	м ³	145,0	35,7
Інші допоміжні (5 %)	—	—	—	85,5
Разом	—	—	—	1796,00

Загальна сума матеріальних витрат на одну твердопаливну піч складає 1796,00 грн. Найбільшу частку в цій сумі мають основні матеріали (прокат сталі S235JR – 1590,4грн, або 88,5 % від загальних матеріальних витрат), тоді як витрати на зварювальні матеріали (дріт, газ,) становлять близько 126,9 грн, або 7,0 % від загальних.

5.2 Розрахунок витрат на електроенергію

Для MAG- зварювання при розрахунку витрат електроенергії використовується формула (5.2):

$$E_{\text{ел.MAG}} = \frac{U_{\text{д}} \cdot I_{\text{зв}} \cdot t_{\text{осн}}}{\eta_{\text{ел}} \cdot 1000}, \quad (5.2)$$

де $E_{\text{ел.MAG}}$ – витрата електроенергії на MAG-зварювання, кВт·год;

$U_{\text{д}}$ – середня напруга дуги, В;

$I_{\text{зв}}$ – середній зварювальний струм, А;

$t_{\text{осн}}$ – основний час зварювання, год;

$\eta_{\text{ел}}$ – коефіцієнт корисної дії джерела живлення (для JASIC MIG-200 (N 220) $\eta_{\text{ел}} = 0,88$).

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставляючи середні значення параметрів ($U_d = 19 \text{ В}$, $I_{зв} = 95 \text{ А}$, $t_{очн} = 0,4 \text{ год}$) у формулу (5.2), одержимо результат (5.3):

$$E_{ел.МAG} = \frac{19 \cdot 95 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 1000} = 0,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5.3)$$

Крім того, враховується витрата електроенергії на освітлення робочого місця ($0,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$), роботу допоміжного обладнання – верстат плазмового різання з ЧПК, компресор, (сумарно $3,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$). Загальна витрата електроенергії на одну твердопаливну піч як сума складових, визначається у виразі (5.4):

$$E_{ел.заг} = 0,82 + 0,3 + 3,2 = 4,32 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5.4)$$

При тарифі електроенергії для промислових споживачів України 2-го класу напруги $0,4 \text{ кВ}$ (з ПДВ) $\text{Цел} = 14,0 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$ станом на 2025 рік вартість електроенергії на одну твердопаливну піч розраховується за формулою (5.6):

$$C_{ел} = E_{ел.заг} \cdot \text{Цел} = 4,32 \cdot 14,0 = 60,5 \text{ грн}. \quad (5.5)$$

5.3 Розрахунок витрат на заробітну плату

Основна заробітна плата розраховується на основі тарифної ставки робітника відповідного розряду та фактичного часу виконання зварювальних операцій. За даними актуальних вакансій на Work.ua у Полтавській області (станом на червень 2026 року) [30] середня зарплата зварювальника 4-го розряду $35\,000 \text{ грн}$ на місяць за стандартного 40-годинного робочого тижня. Відповідно година роботи буде коштувати в середньому 200 грн .

Повний час складальних та зварювальних робіт складає $T_{зв_MAG} = 3,5 \text{ год}$.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основна заробітна плата на зварювальні операції розраховується за формулою (5.6):

$$ЗП_{\text{осн.зв}} = 200 \cdot 3,5 = 700 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ), сплачуваний роботодавцем, становить 22 % від фонду оплати праці ($ЗП_{\text{осн}}$) і визначається за формулою (5.8):

$$\text{ЕСВ} = ЗП_{\text{осн}} \cdot 0,22 = 700 \cdot 0,22 = 154 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

Сумарні витрати на оплату праці з нарахуваннями як сума виразів (5.6) та (5.7) представлені у формулі (5.8):

$$С_{\text{зп}} = ЗП_{\text{осн.зв}} + \text{ЕСВ} = 700 + 154 = 854 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

5.4 Калькуляція собівартості зварювальних робіт

Калькуляція собівартості виготовлення твердопаливної печі наведена у таблиці 5.2. До загальновиробничих витрат віднесено витрати на утримання обладнання, амортизацію основних засобів, освітлення та опалення цеху.

Основні матеріали у собівартості твердопаливної печі становлять 46 %, заробітна плата 22 %, що становить практично половину від основних матеріалів. Повна собівартість однієї твердопаливної печі становить 3905,5 грн.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.2 – Калькуляція собівартості виготовлення однієї твердопаливної печі

№	Стаття калькуляції	Сума, грн
1	Основні та допоміжні матеріали	1796,00
3	Електроенергія	60,5
4	Основна заробітна плата та ЕСВ	854
–	Виробнича собівартість	2710,5
8	Постійні витрати (оренда, податки, логістика, амортизація)	270
9	Маркетинг та реклама	120
–	Повна собівартість	3100.5
10	Прибуток ФОП (20 %)	620
11	Відсоток для ЗСУ (5%)	155
–	Відпускна ціна	3905,5

Висновки до розділу 5

За результатами економічного розрахунку повна собівартість однієї твердопаливної печі становить 3100,5 грн, відпускна ціна 3905,5 грн Найбільшу частку у собівартості займають основні матеріали (сталь S235JR) – 46 %, Витрати на заробітну плату 22 %, що становить практично половину від основних матеріалів. Враховуючи зменшення трудових ресурсів в Україні, через військову агресію РФ, при розробці технологічного процесу твердопаливної печі, потрібно добиватися максимальної продуктивності праці впроваджуючи

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сучасні технології різання з ЧПК та максимальну механізацію та автоматизацію зварювання.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

При виготовленні твердопаливної печі виконуються роботи на: верстаті плазмового різання з ЧПК, механізоване зварювання (MAG), різання на стрічковій пилі. Робота на такому обладнанні відноситься до робіт з підвищеною небезпекою. Нормативною основою заходів з охорони праці при виконанні механообробних робіт у межах дипломного проєкту є Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII, НПАОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями», та низка інших чинних нормативних актів. Ціль розділу-зниження виробничого травматизму та професійних захворювань до 0.

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при зварюванні

При виготовленні твердопаливної печі на працівників діють такі небезпечні та шкідливі фактори (ШНВФ): фізичні, хімічні, психофізіологічні та механічні.

Плазмове різання з ЧПК характеризується впливом ШНВФ: електричне, електромагнітне, ультрафіолетове, інфрачервоне, видиме світло, віброакустичними факторам [24] . Причиною виникнення являється плазмова дуга, що характеризується високою температурою (від 20000°C до 30000°C), підвищеною електричною небезпекою (робоча напруга від 100 В до 200 В), високим рівнем шуму (від 100 дБ до 200 дБ)

Вплив ШНВФ при механізованому зварювання (MAG): шкідливі речовини; ультрафіолетове, видиме, інфрачервоне випромінювання; статичне навантаження на руку; електричний струм; іскри, бризки розплавленого металу [24]. Причина виникнення: зварювальна дуга (від 3000 °C до 7000 °C), висока електрична напруга.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Різання на стрічковій пилі характеризується таким впливом ШНВФ: механічні небезпеки, шкідливий вплив мастильно-охолоджувальних рідин (ЗОР), шум та вібрація. Причина виникнення: контакт із рухомим полотном, зтягування в зони обертання, падіння важких заготовок.

Також, при підготовці зварювальних кромок буде виконуватися зачищення кутошліфувальною машинкою, основна небезпека під час роботи полягає в утворенні дрібнодисперсного пилу, який складається з частинок абразивного круга, металевої стружки, а також залишків іржі, фарби або мастил.

Гранично допустимі середньозмінні норми марганцю в повітрі 0, мг/м³ [26], рівень шуму 80 дБА по ДСН 3.3.6.037-99 [27], локальна вібрація не більше 112 дБ [28].

Обладнання, що використовується не відповідає допустимим нормам, тому потрібно застосування індивідуального та колективного захисту.

6.2 Заходи щодо забезпечення безпеки праці

При виготовленні твердопаливної печі виконується роботи підвищеної небезпеки, задля запобігання виробничого травматизму та професійних захворювань, визначаються ризики та способи їх запобігання.

Плазмове зварювання, різання та напилення металів повинно виконуватись у відповідності до вимог НПАОП 28.5-1.02-07 [13]. Для цього виділяють окремі приміщення або ізольовані сектори цеху. Допоміжні операції для плазмової обробки (механічна обробка, очищення, приготування порошків тощо) повинні проводитися за межами основних ділянок, де використовується плазмова технологія. Пристрої місцевої витяжної вентиляції повинні блокуватися з технологічним обладнанням. Ручну плазмову обробку необхідно виконувати в укритті типу витяжної шафи, внутрішні поверхні якої повинні мати звукопоглинаюче покриття.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Установки височастотної низькотемпературної плазми необхідно екранувати. Балони зі зжатыми газами потрібно встановлювати за межами ділянки плазмової обробки з наступною подачею газу до газоробірного щита.. Якщо за умовами технологічного процесу на установках неможливо застосовувати звукоізолюючі кожухи, оператори повинні знаходитися в звукоізованих кабінах з вікнами для спостереження і дистанційним керуванням процесу.

Якщо місцева витяжна і загальнообмінна вентиляція не може забезпечити належну чистоту повітря, наприклад, при різанні в замкнутих і напівзамкнутих просторах, необхідно здійснювати примусову подачу чистого повітря в зону дихання робітника.

Для усунення можливості ураження електричним струмом разом з загальними засобами електробезпеки необхідно перевіряти роботу кнопочних пристроїв дистанційного вмикання і вимикання установки з метою запобігання випадковому пуску обладнання та блокуючих пристроїв, що забезпечують автоматичне відключення електроживлення у разі зупинки подачі води для охолодження, а також блокування кожуха, що закриває струмопідвідні частини осцилятора і відключає електроживлення при зніманні кожуха. Усі операції з плазмової обробки потрібно проводити не менш ніж двома робітниками. Для обезжирення деталей перед напиленням не можна застосовувати трихлоретилен, при взаємодії якого з азотом можливе утворення фосгену.

Механізоване дугове зварювання в захисних газах. Місцевими повітроприймачами необхідно видаляти повітря [24]: - під час дугового зварювання в CO₂ – не менше ніж 50 м³/год; - під час дугового зварювання в інертних газах та сумішах газів, а також під час автоматичного зварювання в CO₂ – не менше ніж 150 м³/год.

Експлуатація балонів, контейнерів зі стиснутим і скрапленим газом, рамп, повинна здійснюватись у відповідності з нормами ДНАОП 0.00-1.07-94 [23]. Балони зі стиснутими газами слід розташовувати на відстані не ближче 5 м від

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовим заходом є забезпечення ефективної вентиляції робочої зони. Зварювальник під час виготовлення виробу буде постійно переміщатися та виконувати роботи з підготовки кромки кутошліфувальною машинкою та МАГ-зварювання. Встановлювати місцеві відсмоктувачі повітря нерационально, тож прийнято рішення придбати зварювальну маску ESAB SAVAGE A41 for air та системою примусового подавання повітря ESAB EPR-X1.1 PAPR (рисунок 6.1), що дозволить працювати з кутошліфувальною машинкою та МАГ-зварюванням в різній послідовності, не змінюючи засобу захисту.



Основні характеристики: Оптичний клас світлофільтра (ADF) 1/1/1/2,

режим шліфування, час запасу батареї до 8 год., керування швидкістю повітря в діапазоні від 170 л/хв 220 л/хв., очищення від твердих і рідких частинок та аерозолів до 99%.

					ЗВЗ2101.00.000ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.3 Електробезпека

Електробезпека при дуговому зварюванні регламентується ДСТУ ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» та НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». Основними причинами ураження персоналу електричним струмом є доторкання: до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою в робочому режимі; до струмоведучих частин, що випадково опинились під напругою; до неструмоведучих частин, що опинились під напругою внаслідок пошкодження електроізоляції; ураження електричною дугою та напругою кроку.

Допуск осіб до виконання зварювальних робіт повинен здійснюватися після їх ознайомлення з технічною документацією і проведення інструктажу з експлуатації обладнання та охорони праці

Задля забезпечення електробезпеки використовується обладнання з допустимими значеннями напруги холостого ходу, надійне заземлення корпусу джерела живлення та металоконструкцій, використання якісної ізоляції зварювальних кабелів.

Обране зварювальне обладнання (JASIC MIG-200 (N 220) із $U_{xx} = 53$ В) відповідає вимогам до напруги холостого ходу для звичайних умов зварювання (не більше 80 В змінного або 113 В постійного струму), клас захисту IP23.

Зварювальне обладнання повинно регулярно перед початком кожної зміни підлягати перевірці на відсутність замикання, оголених струмоведучих частин, справність ізоляції, дротів та кабелів живлення, цілісність кабеля та справність блокувань.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.4 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [28] приміщення, у яких виконуються зварювальні роботи, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива).

Головними джерелами пожежних ризиків при зварюванні являються: розліт крапель розплавленого металу (від 0 до 2 метрів мінімальний радіус очищення не менше 5 м.) приховане тління, теплове випромінювання (від дуги та зварювальних матеріалів) , несправність електрообладнання та кабелів.

Робоче місце зварника обладнано вуглекислотним вогнегасником ВКК-5 ємністю 5 літрів (рисунок 6.2)



Рисунок 6.2- Вуглекислотний вогнегасник ВКК-5

Після завершення зварювальних робіт проводиться обов'язковий післяпожежний нагляд упродовж не менше 2 годин.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.5 Засоби індивідуального захисту зварника

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) зварника призначені для захисту від комплексу шкідливих і небезпечних факторів: електромагнітного випромінювання дуги, бризок розплавленого металу, підвищених температур, зварювального аерозолі. Повний комплект ЗІЗ для зварника включає: маска зварника ESAB SAVAGE A41 for air системою примусового подавання повітря ESAB EPR-X1.1 PAPR, костюм зварника, черевики шкіряні з металевим носком, рукавиці типу краги.

Висновки до розділу 6

Визначено на ділянці виготовлення твердопаливної печі небезпечні та шкідливі фактори та розроблено систему заходів з охорони праці, які забезпечують безпечне виконання технологічного процесу. Основними чинниками ризику для персоналу являються: випромінювання зварювальної дуги, ризик ураження електричним струмом, високий рівень шуму, вірогідність виникнення пожежі.

Для зниження негативного впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів до допустимих рівнів запропоновано: зварювальну маску ESAB SAVAGE A41 for air та системою примусового подавання повітря ESAB EPR-X1.1 PAPR; комплексне забезпечення робочих місць первинними засобами пожежогасіння (ВКК-5 ємністю 5 літрів); комплект сертифікованих ЗІЗ для зварників (костюм зварювальника, шкіряні рукавиці краги, захисне взуття з металевим підноском), бірюші або навушники.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту розроблено раціональний технологічний процес дугового зварювання твердопаливної печі. Поставлена мета проекту досягнута, всі визначені у вступі завдання виконані у повному обсязі. За результатами роботи зроблено наступні висновки.

У першому розділі проведено конструкторсько-технологічний аналіз виробу та основного матеріалу. Встановлено, що твердопаливна піч є зварною металоконструкцією коробчастого перерізу масою 25 кг, виготовленою з сімнадцяти деталей із листового прокату та круглого прокату сталі S235JR. Розрахунковий еквівалент вуглецю сталі при типовому хімічному складі становить 0,23%, що відповідає першій групі зварюваності (добра зварюваність) без необхідності попереднього підігріву. Конструкція характеризується задовільною технологічністю, раціональним розчленуванням на деталі та симетричним розміщенням швів.

У другому розділі обґрунтовано вибір механізованого дугового зварювання в середовищі активного захисного газу (процес 135 за ДСТУ EN ISO 4063:2014, MAG) як способу виготовлення твердопаливної печі. Порівняльний аналіз чотирьох способів дугового зварювання (РДЗ, MAG, лазерне зварювання, TIG) за дев'ятьма техніко-економічними показниками показав, що MAG-зварювання забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності (від 3 кг/год до 7 кг/год), якості, універсальності просторових положень та помірних капітальних витрат для умов дрібносерійного виробництва.

У третьому розділі обґрунтовано вибір зварювальних матеріалів: суцільний електродний дріт Св-08Г2С діаметром 0,8 мм за ДСТУ 2240:2012 (аналог ER70S-6 за AWS A5.18); захисне середовище – суміш Ar + 18 % CO₂ групи M21 за ДСТУ EN ISO 14175:2016;

Механічні властивості металу шва ($\sigma_t = 470$ МПа, $\sigma_b = 570$ МПа, $KCV_{\{-29^\circ\text{C}\}} = 85$ Дж) перевищують вимоги до основного матеріалу, забезпечуючи

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівноміцність зварного з'єднання.

У четвертому розділі розроблено детальний технологічний процес виготовлення твердопаливної печі, який включає 19 операцій загальною трудомісткістю 210 хв (3,5 год). Розраховано параметри режимів MAG-зварювання для всіх шести типів швів (струм 95 А, напруга 19 В, швидкість зварювання 29,6 м/год). Сумарна маса наплавленого металу на одну балку становить 46,6 г, витрата дроту Св-08Г2С – 52,2 г, захисної суміші – 0,25 м³. Обрано сучасне зварювальне обладнання (JASIC MIG-200 (N 220)). Контроль якості передбачає візуально-вимірювальний контроль 100 % швів.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування технологічних рішень. повна собівартість однієї твердопаливної печі становить 3100,5 грн, відпускна ціна 3905,5 грн Найбільшу частку у собівартості займають основні матеріали (сталь S235JR) – 46 %, Для допомоги ЗСУ заплановано 5% з кожного виробу. Витрати на заробітну плату 22 %, що становить практично половину від основних матеріалів, що вказує на необхідність підвищення продуктивності праці.

У шостому розділі розроблено комплекс заходів з охорони праці, які включають організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи для зниження впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на зварювальника. Запропоновано зварювальну маску ESAB SAVAGE A41 for air та системою примусового подавання повітря ESAB EPR-X1.1 PAPR, вогнегасник ВКК-5 та повний комплект сертифікованих ЗІЗ (костюм зварника, шкіряні рукавиці, захисне взуття).

При розробці технології виготовлення твердопаливної печі були задіяні сучасні технології різання (верстат плазмового різання з ЧПК), однією з головних особливостей технології- широке застосування гнутих ребер жорсткості замість зварювання, застосовано зварювальну суміш Ar+CO₂ замість однокомпонентної CO₂ задля підвищення продуктивності та якості зварювання.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гаєвський О. А. Координація зварювальних робіт: навч. посіб. / О. А. Гаєвський, В. О. Гаєвський. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 168 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f552785e-6c89-4ca6-a0f9-4f1186e9d7b6/content> (дата звернення: 10.04.2026).
2. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення : чинний від 2019-03-01. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.
3. Дипломне проєктування : рекомендації до виконання дипломного проєкту : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спеціальності 131 Прикладна механіка / заг. ред. В. В. Квасницький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2-ге вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 115 с.
4. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : чинні від 1999-12-01. Київ : МОЗ України, 1999. 12 с.
5. ДСТУ 2240:2012. Дроти сталеві зварювальні. Технічні умови : чинний від 2013-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2012. 38 с.
6. ДСТУ EN ISO 14175:2016. Матеріали зварювальні. Гази та газові суміші для зварювання плавленням та споріднених процесів : чинний від 2018-01-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.
7. ДСТУ EN ISO 4063:2014. Зварювання та споріднені процеси. Номенклатура процесів і посилальні номери : чинний від 2016-01-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. 26 с.
8. ДСТУ EN ISO 5817:2018. Зварювання. Зварні з'єднання сталі, нікелю, титану та їхніх сплавів, виконані зварюванням плавленням (за винятком променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів : чинний від 2020-01-01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 28 с.
9. ДСТУ EN ISO 9692-1:2018. Зварювання та споріднені процеси. Типи підготовки з'єднання. Частина 1. Ручне дугове зварювання, дугове

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювання плавким електродом у захисному газі, газове зварювання, TIG-зварювання та променеве зварювання сталей : чинний від 2019-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 31 с.

10. Зворикін К. О. Виробництво зварних конструкцій : практикум. Частина 1 / К. О. Зворикін, В. О. Гаєвський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2019. 114 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2b0e3dde-7462-45e5-bf8e-0d6e1126a295/content> (дата звернення: 20.05.2026).

11. Зворикін К. О. Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : розрахунково-графічна робота / К. О. Зворикін, В. О. Гаєвський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2019. 76 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b5b417a6-42c9-4011-b9fd-3d8c5b824b3d/content> (дата звернення: 12.05.2026).

12. Кузнецов В. Д. Технологія та устаткування для наплавлення : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / В. Д. Кузнецов, Д. В. Степанов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2017. 78 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a0128a0b-f35e-4cbc-aa2a-bc8385a00410/content> (дата звернення: 20.05.2026).

13. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів : затв. наказом МНС України від 14.12.2012 № 1425. URL: https://dnaop.com/html/32346/doc-НПАОП_28.52-1.31-13 (дата звернення: 12.05.2026).

14. Сливінський О. А. Теорія процесів зварювання : розрахунково-графічна робота / О. А. Сливінський, В. М. Коперсак ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. 69 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/af109e1e-3c78-4988-830e-b78a40f7d575/content> (дата звернення: 20.05.2026).

15. Giudice F. FEM Simulation and Experimental Tests on the SMAW Welding of a Dissimilar T-Joint / F. Giudice, S. Missori, A. Sili // Metals. 2021. Vol. 11, No. 7. Art. 1016. DOI: 10.3390/met11071016. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/7/1016> (дата звернення: 20.05.2026).

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Grams M. R. Dimensional Analysis and Validity of Uniaxial Residual Stress Distribution for Welded Box Sections / M. R. Grams et al. // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2025. Vol. 9, No. 1. Art. 5. DOI: 10.3390/jmmp9010005. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/1/5> (дата звернення: 10.05.2026).

17. Holovenko O. Enhancing the Tensile Properties and Ductile-Brittle Transition Behavior of the EN S355 Grade Rolled Steel via Cost-Saving Processing Routes / O. Holovenko et al. // Materials. 2024. Vol. 17, No. 9. Art. 1958. DOI: 10.3390/ma17091958. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/9/1958> (дата звернення: 20.05.2026).

18. Kaczmarek R. Analysis of the Suitability of Ultrasonic Testing for Verification of Nonuniform Welded Joints of Austenitic–Ferritic Sheets / R. Kaczmarek, L. Kaczmarek, R. Krawczyk // Materials. 2024. Vol. 17, No. 17. Art. 4216. DOI: 10.3390/ma17174216. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/17/4216> (дата звернення: 30.05.2026).

19. Khrais S. Impact of Gas Metal Arc Welding Parameters on Bead Geometry and Material Distortion of AISI 316L / S. Khrais, H. Al Hmoud, A. Abdel Al, T. Darabseh // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2023. Vol. 7, No. 4. Art. 123. DOI: 10.3390/jmmp7040123. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/7/4/123> (дата звернення: 20.05.2026).

20. Zavdoveev A. V. Development of the PC-GMAW welding technology for TMCP steel in accordance with welding thermal cycle, welding technique, structure, and properties of welded joints / A. V. Zavdoveev, M. Rogante, V. D. Poznyakov et al. // Reports in Mechanical Engineering. 2020. Vol. 1, No. 1. P. 26–

21. Головки В. В., Подгаєцький В. В. Особливості окислення та легування металу шва в активних газах » // Автоматичне зварювання. – 1995. – № 3.

22. Левченко, О. Г. Міжнародна практика гігієнічної оцінки зварювальних матеріалів / О. Г. Левченко // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки : збірник матеріалів Тринадцятої всеукраїнської науково-методичної конференції, 10-12 листопада 2015 р., м. Київ. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – С.

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

226-236. URL: <https://ela.kpi.ua/items/76148d76-6407-400f-b14c-19b54c7cf9dc> (дата звернення: 20.05.2026).

23. ДСТУ ISO 15012-2:2009. Охорона здоров'я і безпека у зварюванні та споріднених процесах. Перевірка і маркування обладнання для фільтрування повітря. Частина 2. Визначення мінімального об'єму потоку повітря через зонти і насадки. – [Чинний від 2012-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2013. – 11 с.

24. Левченко, О. Г. Енергозберігаючі засоби вентиляції / Левченко О. Г., Полукаров Ю. О. // Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності : науково-технічний збірник : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 7-8 червня 2018 р.). – Київ: Основа, 2018. – С. 303–311. – Бібліогр.: 7 назв. URL: <https://ela.kpi.ua/items/da29179c-5056-4fcc-95f9-10b3d0844290> (дата звернення: 20.05.2026).

25. Левченко, О. Г. Міжнародний досвід профілактики пожеж на підприємствах / Левченко О. Г., Полукаров Ю. О. // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки : збірник матеріалів XXXIV Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), [Київ], 13-14 травня 2026 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Київ, 2026. - С. 70-72. URL: <https://ela.kpi.ua/items/b7dc3aa2-d8a1-4a32-82a7-002dff5148fa> (дата звернення: 20.05.2026).

26. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони № 1596 від 14.07.2020 р.

27. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

28. НАПБ Б.03.002-2007. Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

29. Моніторинг цін на первинному ринку металопрокату: [електронний ресурс] // Металіка. – URL: <https://metalika.ua/statistics> (дата звернення: 12.05.2026).

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Статистика зарплат в Україні. Полтавська область: [електронний ресурс] // Work.ua. – URL: <https://www.work.ua/stat/poltava/> (дата звернення: 13.05.2026).

31. Каталог зварювального обладнання та комплектуючих: [електронний ресурс] // Офіційний інтернет-магазин компанії «Джейсік Україна». – URL: <https://jasic.com.ua> (дата звернення: 13.05.2026).

					ЗВз2101.00.000ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		