

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності**

Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Проект камерної полум'яної печі з розробкою
технологічного процесу термічної обробки деталей
типу плита / Design of a Flame-Fired Chamber Furnace
with the Development of a Technological Process for the
Heat treatment of Plate-Type Parts**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг і менеджмент»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ІІМ)с-31

Ковальчук Вікторія Володимирівна

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Мисковець Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03 ” січня _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ковальчук Вікторії Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект камерної полум'яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу плита / *Design of a Flame- Fired Chamber Furnace with the Development of a Nechnological Process for*
керівник роботи Мисковець Сергій Васильович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 31.12.25 року № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи « 19 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Креслення идеталі, програма випуску N=81,45 шт., (Склад продуктів горіння палива: CO₂-3,4%, H₂O-18,5%, O₂-0,9%, N₂-77,2%).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ; розділ 1 загально-технічна частина;
розділ 2 технологічна частина; розділ 3 конструкторська частина;
висновки; список використаних джерел; додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 - Креслення та 3D модель деталі плита 1л ф.А4; 2 - Таблиця 1 Хімічний

склад природнього газу, Таблиця 2 Склад продуктів горіння палива 1л ф.А4;

3 - Креслення вікна для завантаження і вивантаження деталей 1л ф.А4; 4 - Креслення

кладки стінок та склепіння печі 1л ф.А4; 5 - Креслення Горілки ГНП - 1 1л ф.А4;

6 - Креслення трубчастого рекуператора 1л ф.А4; 7 - Креслення тари для

завантаження деталей в піч 1л ф.А4; 8 - Тепловий баланс печі 1л ф.А4;

9 - Висновки 1л ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>	<i>03.01.26</i>	<i>19.05.26</i>

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, розділ 1 Загально-технічна частина</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Технологічна частина</i>	<i>12.05.26</i>	
<i>3</i>	<i>Розділ 3 Конструкторська частина</i>	<i>19.05.26</i>	
<i>4</i>	<i>Висновки; додатки</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти _____ **Ковальчук В.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ **Мисковець С.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ковальчук В. В. Проект камерної полум'яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу плита. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Індустріальний інжиніринг і менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет.

Луцьк, 2026.

В бакалаврській роботі представлено розробку проекту полум'яної камерної газової печі, призначеної для гартування металевих виробів.

У роботі виконано розрахунок процесу горіння газоподібного палива, зокрема його теплотворну здатність, а також кількість і склад продуктів згоряння, що утворюються під час спалювання природного газу. Окрему увагу приділено визначенню тривалості нагрівання металу до необхідної температури та складанню теплового балансу печі.

З метою підвищення енергоефективності та зменшення втрат теплоти з димовими газами розроблено трубчастий рекуператор, який забезпечує підігрів повітря, що подається в піч для спалювання палива, за рахунок утилізації теплоти відхідних газів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки. Пояснювальна записка містить 39 сторінок формату А4, 8 рисунків та 13 літературних джерел. Графічна частина містить 9 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: плита, піч, продукти згоряння, рекуператор, тепловий баланс, теплова обробка, тара.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Ковальчук			Проект камерної полум'яної печі з розробкою технологічної обробки деталей типу плита			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Мисковець								3	39
Реценз.								ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)с-31			
Н. Контр.		Мисковець									
Затв.		Імбирович									

ANNOTATION

Kovalchuk V. V. Design of a chamber flame furnace with the development of a heat treatment process for plate-type parts. Manuscript.

Bachelor's qualification work in the Education Program "Industrial Engineering and Management", specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's thesis presents the design of a chamber-type gas-fired flame furnace intended for hardening metal products.

The work includes calculations of the gaseous fuel combustion process, in particular its calorific value, as well as the quantity and composition of combustion product formed during the burning of natural gas. Special attention is paid to determining the duration of metal heating to the required temperature and to the development of the furnace heat balance.

In order to improve energy efficiency and reduce heat losses with flue gases, a tubular recuperator has been designed. It provides preheating of the air supplied to the furnace for fuel combustion by utilizing the heat of exhaust gases.

The bachelor's thesis consists of a graphical part and an explanatory note. The explanatory note contains 39 pages of A4 format, 8 figures, and 13 references. The graphical part includes 9 A4 sheets presented in Appendix A.

Keywords: plate, furnace, combustion products, recuperator, heat balance, heat treatment, fixture.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1. Аналіз креслення деталі, технічних умов, визначення типу виробництва..	9
1.2. Аналіз існуючого (типового) технологічного процесу.....	10
1.3. Вибір раціонального варіанту технологічного процесу	11
1.4. Мета і задачі дипломної роботи	12
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	13
2.1. Розрахунок горіння палива	13
2.1.1. Теплотворність горіння палива	13
2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання палива.....	13
2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання палива	14
2.2. Тривалість нагріву металу	15
2.3. Тепловий баланс печі	18
2.3.1. Нагрів металу	19
2.3.2. Втрати тепла з димовими газами	19
2.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі	20
2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі	22
2.3.5. Нагрівання тари	22
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	25
3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі	25
3.2. Вибір матеріалів для побудови печі	27
3.3. Конструкція елементів печі	29
3.3.1. Канали для відводу димових газів	29
3.3.2. Вікно для завантаження і вивантаження деталей	30
3.4. Вибір горілок.....	30
3.5. Розрахунок рекуператора.....	33
3.6. Тара для завантаження деталей в піч.....	36

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ..... 37

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 38

ДОДАТКИ

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування та металургійної промисловості характеризується постійним підвищенням вимог до якості, надійності та довговічності деталей машин [1]. У зв'язку з цим особливого значення набуває вдосконалення технологічних процесів термічної обробки металів, які забезпечують формування необхідних механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів.

Одним із ключових напрямів у цій сфері є розробка та вдосконалення теплотехнічного обладнання, зокрема камерних полум'яних печей, що широко застосовуються для проведення процесів гартування, відпуску та інших видів термічної обробки сталевих виробів. Використання таких печей дозволяє забезпечити необхідний температурний режим, рівномірність нагріву та контроль параметрів процесу.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності термічних установок, зменшення теплових втрат та оптимізацію умов нагріву деталей. Особливу увагу приділено деталям типу плита, які характеризуються значними геометричними розмірами, нерівномірним розподілом маси та наявністю конструктивних особливостей, що можуть спричиняти виникнення внутрішніх напружень і деформацій у процесі термічної обробки.

Об'єктом дослідження є процес термічної обробки сталевих деталей у камерній полум'яній печі.

Предметом дослідження є теплотехнічні параметри роботи печі технологічні режими гартування деталей зі сталі 40Х.

Метою роботи є розробка конструкцій камерної полум'яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу плита, що забезпечує отримання необхідних механічних властивостей при мінімальних енергетичних витратах.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

- а) виконати аналіз конструкцій деталі та її матеріалу;
- б) обґрунтувати вибір режимів термічної обробки;
- в) провести теплотехнічні розрахунки;
- г) розробити конструкцію камерної полум'яної печі;
- д) оцінити енергоефективність запропонованих рішень.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз креслення деталі, технічних умов, визначення типу виробництва

Деталь, що підлягає термічній обробці, являє собою плиту складної конфігурації (рисунок 1.1). Вона має плоску форму з плавними переходами, радіусними заокругленнями та системою отворів різного діаметра.

Габаритні розміри становлять: довжина – 158 мм, максимальна ширина – 90мм (45 + 45).

Конструкція деталі включає центральний фігурний отвір складної форми, утворений радіусами R5, R14 та R20, а також допоміжні циліндричні отвори. У деталі передбачені отвори діаметром 10 мм.

Зовнішній контур деталі має складну форму з радіусними переходами R36, R18 та R8, що забезпечує плавність геометрії та зменшення концентрації напружень.

Наявність отворів, змінної ширини та складної конфігурації призводить до нерівномірного розподілу температури під час нагрівання, що може викликати виникнення внутрішніх напружень, деформацій та тріщин.

Деталь виготовляється зі сталі марки 40X [2].

Призначення: сталь 40X застосовується для виготовлення відповідальних деталей машин, що працюють при значних механічних навантаженнях і підлягають термічній обробці [3].

Хімічний склад сталі 40X: C = 0,36...0,44 %, Mn = 0,5...0,8 %, Si = 0,17...0,37 %, Cr = 0,8...1,1 %, Ni ≤ 0,3 %, S ≤ 0,035 %, P ≤ 0,035 % [4].

Механічні властивості [5]:

межа міцності σ_B = до 980 МПа;

межа текучості $\sigma_{0,2}$ = до 785 МПа;

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відносне видовження $\delta = 10 \%$;

ударна в'язкість KCU = до 590 кДЖ/м² .

Критичні точки: $A_{c1} = 743 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_{c3} = 782 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_{r3} = 730 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_{r1} = 693 \text{ }^{\circ}\text{C}$
[6].

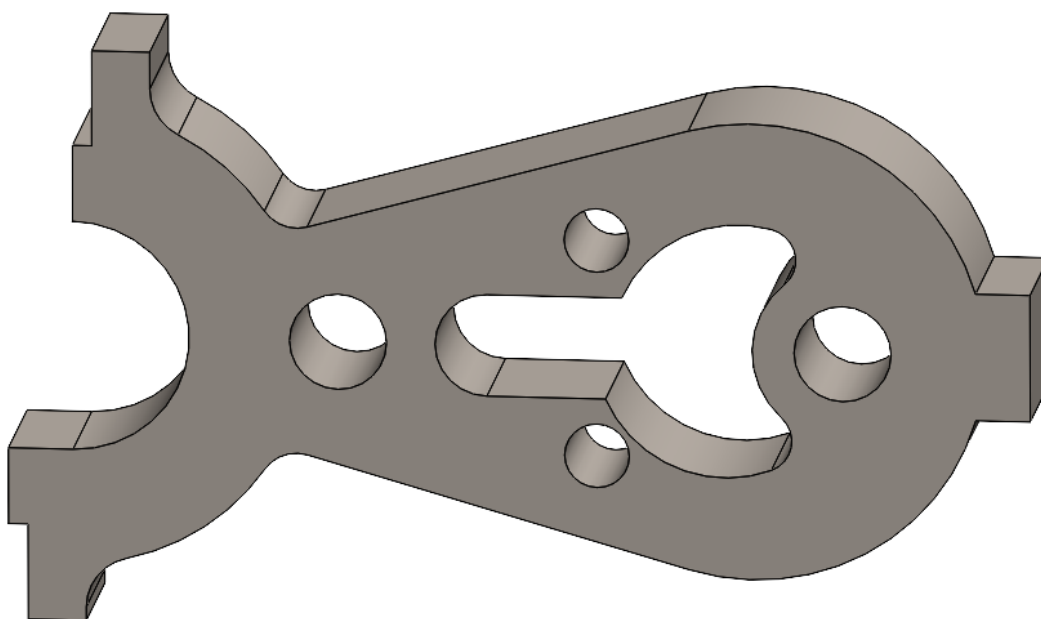


Рисунок 1.1 – 3D модель плити

1.2. Аналіз існуючого (типового) технологічного процесу

Режим і метод термічної обробки визначаються залежно від марки матеріалу, геометричних розмірів деталі, технічних вимог до неї, а також умов експлуатації.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для сталі 40Х типовим є процес гартування з наступним відпуском. Гартування проводиться при температурі 840...860 °С з охолодженням у маслі [7]. При цьому відбувається повне аустенітне перетворення структури сталі.

У результаті гартування формується мартенситна структура, яка забезпечує високу твердість і міцність. Проте після гартування матеріал набуває підвищеної крихкості, тому необхідним є проведення відпуску при температурі близько 500 °С.

Повільне охолодження після нагрівання є недоступним, оскільки це призводить до зниження твердості та погіршення експлуатаційних властивостей деталі.

1.3. Вибір раціонального варіанту технологічного процесу

З урахуванням складної геометрії деталі, наявності отворів та змінної товщини, процес нагрівання повинен забезпечувати рівномірний розподіл температури по всьому об'єму виробу.

При швидкому нагріванні поверхневі шари деталі можуть перегріватися при недостатньому прогріві внутрішніх зон, що призводить до виникнення внутрішніх напружень, деформацій та тріщин.

Для запобігання таким явищам нагрівання деталі доцільно проводити у три температурні інтервали.

Перший: 20...600 °С – для забезпечення поступового нагріву без утворення тріщин;

Другий: 600...800 °С – для вирівнювання температурного поля;

Третій: 800...860 °С – для досягнення температури гартування.

Після нагрівання проводиться гартуванням в маслі з подальшим відпуском при температурі 500 °С. Такий режим дозволяє отримати оптимальне поєднання міцності та пластичності, а також мінімізувати внутрішні напруження.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Мета і задачі дипломної роботи

Метою дипломної роботи є розробка камерної полум'яної печі та технологічного процесу термічної обробки деталей типу плита.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- а) провести необхідні технологічні та теплотехнічні розрахунки;
- б) визначити параметри процесу нагрівання та гартування;
- в) розробити конструкцію камерної печі.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок горіння палива

При визначенні параметрів горіння палива розраховують:

- а) теплотворність палива;
- б) кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива [8];
- в) кількість і склад утворених при цьому продуктів горіння (димових газів);
- г) температура горіння палива.

2.1.1. Теплотворність горіння палива

Теплотворність для газоподібного палива визначається за формулою:

$$Q_H^p = 127CO + 108H_2 + 124H_2S + 357CH_4 + \sum Q \frac{c_{mHn}}{100} = 357 + 86 + \left(\frac{63500 \cdot 7 + 91100 \cdot 0,6 + 118600 \cdot 0,7}{100} \right) = 36523,8 \text{ кДж/м}^3, \quad (2.1)$$

де CO , H_2 і тд. – відсотковий вміст відповідних компонентів в паливі. Член $\sum Q \frac{c_{mHn}}{100}$ у формулі (2.1) виражає суму добутків теплоти згорання компонентів газу (ацетилен, етилен, етан та ін.) на їх процентний вміст в газі.

2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання палива

Кількість повітря, яка необхідна для повного згорання газоподібного палива:

$$L_\delta = a_n * L_0, \quad (2.2)$$

де $a_n = 1,05$ – коефіцієнт витрат повітря.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_0 = 0,0476 \cdot \left[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right] \cdot (1 + 0,00124d_n) = 0,0476 \cdot \left[2 \cdot 86 + \left(\left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 7 + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,6 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,7 \right) - 0,3 \right] \cdot (1 + (0,00124 \cdot 10)) = 9,7 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2.3)$$

де CO, H₂ і тд. – відсотковий вміст відповідних компонентів у паливі, %;

d_n – вологовміст сухого повітря, г/см³;

У розрахунках значення d_n, як правило, приймають рівним 10 г/см³.

$$L_\delta = 1,05 \cdot 9,7 = 10,2 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання палива

Об'єм вуглекислого газу визначаємо за формулою:

$$V_{\text{CO}_2} = (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \sum m \cdot C_m\text{H}_n) \cdot 0,01 = (0,2 + 86 + (2 \cdot 7 + 3 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,7)) \cdot 0,01 = 0,36 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.4)$$

Об'єм парів води розраховуємо як:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \left(\text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{O} + 0,124 \cdot L_\delta \cdot D_n \right) \cdot 0,01 = \left(2 \cdot 81 + \left(\frac{2}{2} \cdot 7 + \frac{3}{2} \cdot 0,6 + \frac{4}{2} \cdot 0,7 \right) + 0,124 \cdot 10,2 \cdot 10 \right) \cdot 0,01 = 1,94 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.5)$$

Об'єм залишкового кисню визначимо за наступною формулою:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (a_n - 1) \cdot L_0 = 0,21(1,05 - 1) \cdot 9,7 = 0,10 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2.6)$$

Для визначення об'єму азоту використовується формула:

$$V_{\text{N}_2} = (\text{N}_2 + 79L_\delta) \cdot 0,01 = (5,2 + 79) \cdot 0,01 = 8,11 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2.7)$$

За наведеними вище розрахунками визначимо сумарний об'єм продуктів горіння:

$$V_\delta = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} = 0,36 + 1,94 + 0,10 + 8,11 = 10,5 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2.8)$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відсотковий склад продуктів згоряння визначається наступними формулами:

для вуглекислого газу:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{0,36}{10,5} \cdot 100 \% = 3,43 \% ; \quad (2.9)$$

для водяної пари:

$$CO_2 = \frac{V_{NO_2}}{V_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{1,94}{10,5} \cdot 100 \% = 18,47 \% ; \quad (2.10)$$

для кисню:

$$CO_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{0,10}{10,5} \cdot 100 \% = 0,95 \% ; \quad (2.11)$$

для азоту:

$$CO_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{8,11}{10,5} \cdot 100 \% = 77,23 \% ; \quad (2.12)$$

2.2. Тривалість нагріву металу

Тривалість нагріву для тонких деталей визначаються за формулою:

$$\tau_0 = \frac{S \cdot p \cdot C_p}{k_1 \cdot \alpha} \ln \frac{t_{печ} - t_n}{t_{печ} - t_k} \text{ с}, \quad (2.13)$$

де S – розрахункова товщина тіла, що нагрівається, м;

k – коефіцієнт форми (для циліндра $k = 2$);

p – щільність кг/м;

C_p – середня теплоємність Дж/кг · град;

α – коефіцієнт тепловіддачі Вт/м · град;

$t_{печ}$ – температура печі, °С;

t_n – початкова температура тіла, °С;

t_k – кінцева температура тіла, °С.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середня теплоємність в інтервалі температур:

$$C_{Pt_n}^{lk} = \frac{i_0^{lk} - i_0^{ln}}{t_k - t_n}, \quad (2.14)$$

де i_0^t – тепловміст при температурі t , кДж/кг.

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha^* = \sigma_{\text{печ}} \frac{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4}{t_{\text{печ}} - t_n}, \quad (2.15)$$

де $t_{\text{печ}} (T_{\text{печ}})$ – температура печі, °С (К);

$t_n (T_n)$ – температура поверхні, °С (К);

$\sigma_{\text{печ}} = 4,07 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$.

При використанні формули (2.13) враховується середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в заданому інтервалі температур:

$$\alpha = \frac{\alpha_n \cdot \alpha_k}{2}, \quad (2.16)$$

де α_n – коефіцієнт тепловіддачі початку інтервалу;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі кінця інтервалу;

Під час розрахунку тривалості нагріву процес нагрівання деталі під гартування (860 °С) поділяється три температурні інтервали: перший – 20...600 °С, 600...800 °С та 800...860 °С.

Для розрахунку приймаємо такі параметри:

$S = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$k = 1$;

$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$;

$i_0^{20} = 46,9 \text{ кДж/кг}$;

$i_0^{600} = 340,8 \text{ кДж/кг}$;

$i_0^{800} = 550,6 \text{ кДж/кг}$;

$i_0^{860} = 589,4 \text{ кДж/кг}$;

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середня теплоємність для першого інтервалу:

$$C_{Pt_n}^{lk} = \frac{i_0^{lk} - i_0^{ln}}{t_k - t_n} = \frac{340,8 - 46,9}{600 - 20} = 0,50 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$$

Середня теплоємність для другого інтервалу:

$$C_{Pt_n}^{lk} = \frac{i_0^{lk} - i_0^{ln}}{t_k - t_n} = \frac{550,6 - 340,8}{800 - 600} = 1,5 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$$

Середня теплоємність для третього інтервалу:

$$C_{Pt_n}^{lk} = \frac{i_0^{lk} - i_0^{ln}}{t_k - t_n} = \frac{589,4 - 550,6}{860 - 800} = 0,65 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

$$T_{неч} = 900 \text{ } ^\circ \text{C} \text{ } (T_{неч} = 1173,15 \text{ K});$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_1^{20} = 4,07 \frac{\left(\frac{1173,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{293,15}{100}\right)^4}{900 - 20} = 87,26 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\alpha_2^{600} = 4,07 \frac{\left(\frac{1173,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{873,15}{100}\right)^4}{900 - 600} = 178,12 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\alpha_3^{800} = 4,07 \frac{\left(\frac{1173,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{1073,15}{100}\right)^4}{900 - 800} = 231,11 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\alpha_4^{860} = 4,07 \frac{\left(\frac{1173,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{1133,15}{100}\right)^4}{900 - 860} = 249,71 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

Середні значення коефіцієнтів тепловіддачі визначаються як:

для першого інтервалу:

$$\alpha_1 = \frac{87,6 + 178,12}{2} = 132,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

для другого інтервалу:

$$\alpha_2 = \frac{178,12 + 231,11}{2} = 204,62 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

для третього інтервалу:

$$\alpha_3 = \frac{231,11 + 249,71}{2} = 240,41 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{град.}$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість нагріву в першому інтервалі температур (20...600 °С) визначається за формулою:

$$\tau_1 = \frac{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 0,50}{1 \cdot 132,69} \ln \frac{900 - 20}{900 - 600} = 397,91 \text{ с.}$$

Тривалість нагріву в другому інтервалі температур (600...800 °С) визначається за формулою:

$$\tau_2 = \frac{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 1,05}{1 \cdot 204,62} \ln \frac{900 - 600}{900 - 800} = 553,18 \text{ с.}$$

Тривалість нагріву в третьому інтервалі температур (800...860 °С) визначається за формулою:

$$\tau_3 = \frac{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 0,65}{1 \cdot 240,41} \ln \frac{900 - 800}{900 - 860} = 243 \text{ с.}$$

Загальна тривалість нагріву:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{н.з.с.}} &= \tau_{01} + \tau_{02} + \tau_{03} = 397,91 + 553,18 + 243 = 1194,09 \text{ с.} = 19,9 \text{ хв.} \\ &= 0,32 \text{ год.} \end{aligned}$$

2.3. Тепловий баланс печі

У процесі експлуатації печі відбувається постійний теплообмін, що полягає у передачі теплоти від більш гарячих тіл до більш холодних.

Для оцінки ефективності роботи печі складається її тепловий баланс, який відображає співвідношення між надходженням та витрати теплоти.

До статей приходу теплоти відносять теплоту, що утворюється при спалюванні палива, а також теплоту, яка повертається в робочий простір печі за рахунок використання рекуператора.

Видаткова частина теплового балансу включає такі складові:

- а) нагрів металу;
- б) витрати теплоти з продуктами горіння;
- в) витрати через стіни, склепіння та черинь печі;

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

г) витрати тепла через вікна печі;

д) витрати тепла на нагрів тари.

2.3.1. Нагрів металу

Теплота, що витрачається на нагрів металу, тобто деталей, які піддаються термічній обробці, є основною корисною складовою теплового балансу печі.

Кількість теплоти, необхідної для нагрівання металу, визначається за формулою:

$$Q_{\text{мет}} = C_{\text{мет}}(t_{\text{мет}}^k - t_{\text{мет}}^n) \Pi = 0,65(860 - 20) \cdot 105 = 57330 \text{ кДж}, \quad (2.17)$$

$C_{\text{мет}}$ – теплоємність матеріалу тари, кДж/(кг · °С):

$$C_{\text{мет}} = \frac{i_0^{t_k} - i_0^{t_n}}{t^k - t^n} = \frac{590 - 46,9}{860 - 20} = 0,65 \text{ кДж},$$

де $t_{\text{мет}}^k, t_{\text{мет}}^n$ – кінцева і початкова температура тари, °С;

Π – продуктивність печі, кг/год:

$$\Pi = \frac{N_c \cdot m_g}{\tau_{\text{н.з.с.}}} = \frac{81,45 \cdot 1,2}{0,93} = 105 \text{ кг/год}, \quad (2.18)$$

де m – маса деталі, кг;

N_c – кількість садок в рік, шт.;

$\tau_{\text{н.з.с.}}$ – час нагріву садки, год.

2.3.2. Втрати тепла з димовими газами

Продукти, що утворюються при спалюванні палива, виходячи з печі, несуть із собою велику кількість тепла, яка визначається за формулою [9]:

$$Q_{\text{н.г.}} = i_{\text{н.г.}} \cdot V_{\text{н.г.}} = \frac{i_{\text{O}_2} \cdot \% \text{O}_2 + i_{\text{N}_2} \cdot \% \text{N}_2 + i_{\text{CO}_2} \cdot \% \text{CO}_2 + i_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \% \text{H}_2\text{O}}{100} \cdot V_{\delta} =$$
$$\frac{1850,01 \cdot 3,43\% + 1434,15 \cdot 18,47\% + 1247,42 \cdot 0,95\% + 1180,35 \cdot 77,23\%}{100} \cdot 10,5 = 13143,69 \text{ кДж/м}^3, \quad (2.19)$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $i_{n.г.}$ – теплоємність продуктів горіння, кДж/м³;

$V_{n.г.}$ – об'єм продуктів горіння, м³/м³.

2.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі

Зовнішня поверхня печі має більш високу температуру, ніж навколишнє середовище, тому відбувається безупинна віддача тепла печі навколишньому повітрю за рахунок конвекції і навколишньому простору за рахунок випромінювання.

Кількість тепла, що втрачається поверхнею печі, можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{пов}} = k(t_1 - t_4)F. \quad (2.20)$$

де, k – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м · °С);

Для вогнетривкого шару (для стін і черені):

$$Q_{\text{пов}}^1 = k(t_1 - t_2)F = 1,05 \cdot (850 - 140) \cdot 10,38 = 7738,29 \text{ кДж},$$

де k_1 – коефіцієнт теплопередачі вогнетривкого шару:

$$k_1 = (0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{850 + 140}{2} = 1,05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)},$$

$t_1 = 850 \text{ °С}$ – температура на внутрішній стороні стіни, °С;

$t_2 = 140 \text{ °С}$ – температура на зовнішній стороні стіни, °С;

$F = 10,38 \text{ м}^2$ – площа стін і черені.

Для теплоізоляційного шару (для стін і черені):

$$Q_{\text{пов}}^2 = k_2(t_3 - t_4)F = 0,19 \cdot (140 - 60) \cdot 10,38 = 157,78 \text{ кДж},$$

$$k_2 = (0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{t_3 + t_4}{2} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{140 + 60}{2} = 0,19 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)},$$

де $k_1 = 1,05$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційного шару;

$t_2 = t_3 = 140 \text{ °С}$ – температура на внутрішній стороні стіни;

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$t_4 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура на зовнішній стороні стіни;

$F = 10,38\text{ м}^2$ – площа стін і черені.

Для вогнетривкого шару склепіння:

$$Q_{\text{пов}}^3 = k_1(t_1 - t_2)F = 1,05 \cdot (850 - 140) \cdot 2,05 = 1528,3 \text{ кДж},$$

де $k_1 = 1,05$ – коефіцієнт теплопередачі вогнетривкого шару;

$F = 2,05\text{ м}^2$ – площа склепіння.

Для теплоізоляційної засипки склепіння:

$$Q_{\text{пов}}^4 = k_3(t_2 - t_4)F = 0,09 \cdot (140 - 60) \cdot 2,05 = 14,76 \text{ кДж},$$

де $k_3 = 1,05$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційного шару склепіння;

$$k_3 = (0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{t_3 + t_4}{2} = 0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{140 + 60}{2} \\ = 0,09 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}.$$

Втрати тепла через вікно для вогнетривкого шару:

$$Q_{\text{пов}}^5 = k_1(t_1 - t_2)F \cdot \tau_{\text{зак.в.}} = 1,05 \cdot (850 - 140) \cdot 2,05 \cdot 0,91 = 1390,73 \text{ кДж},$$

де $k_1 = 1,05$ – коефіцієнт теплопередачі вогнетривкого шару;

$t_1 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$;

$t_3 = t_2 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$;

$\tau_{\text{зак.в.}} = 0,91$ – частка часу протягом години коли вікно закрите;

$F = 0,55\text{ м}^2$ – площа вікна:

$$F_{\text{вік}} = 475 \cdot 1162 = 0,55\text{ м}^2.$$

Втрати тепла через вікно для теплоізоляційного шару:

$$Q_{\text{пов}}^6 = k_2(t_3 - t_4)F \cdot \tau_{\text{зак.в.}} = 0,19 \cdot (250 - 80) \cdot 0,55 \cdot 0,91 = 16,16 \text{ кДж},$$

де $t_4 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Втрати тепла через поверхню печі визначаються підсумуванням втрат тепла на всіх її елементах (стінах, черені та вікні):

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{пов}}^1 + Q_{\text{пов}}^2 + Q_{\text{пов}}^3 + Q_{\text{пов}}^4 + Q_{\text{пов}}^5 + Q_{\text{пов}}^6 = 7738,29 + 157,78 + \\ 1528,3 + 14,76 + 1390,73 = 10829,86 \text{ кДж}. \quad (2.21)$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі

У момент відкриття завантажувального і розвантажувального вікон печі з камери нагрівання за рахунок випромінювання втрачається тепло. Кількість тепла можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{вік}} = 5,7 F_{\text{вік}} \varphi \tau \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \quad (2.22)$$

де $F_{\text{вік}}$ – площа відкритого вікна, м²;

φ – коефіцієнт діафрагмування, що залежить від конфігурації вікна і товщини стіни, $\varphi = 0,6$;

τ – частка часу протягом години, коли вікно відкрите, $\tau = 1$ год;

T_n – температура в печі, К.

$$\tau_{\text{від.в.}} = \frac{1}{\tau_{\text{заг.}}} \cdot \tau_{\delta} = \frac{1}{0,93} \cdot 0,084 = 0,09 \text{ год};$$

$$\tau_{\text{зак.в.}} = 1 - \tau_{\text{від.в.}} = 1 - 0,09 = 0,91 \text{ год};$$

$$Q_{\text{вік}} = 5,7 \cdot 0,55 \cdot 0,6 \cdot 0,09 \cdot \left(\frac{1173,15}{100} \right)^4 = 3206,6 \text{ кДж.}$$

2.3.5. Нагрівання тари

Тепло, витрачене на нагрівання тари, визначається за формулою:

$$Q_m = C_m (t_m^k - t_m^n) \cdot G_m \text{ кДж}, \quad (2.23)$$

де C_m – теплоємність матеріалу тари, $C_m = 0,628 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_m^k, t_m^n – кінцева і початкова температури тари, $t_m^k = 900 ^\circ\text{C}$, $t_m^n = 20 ^\circ\text{C}$;

G_m – маса тари, що нагрівається за 1 год., кг.

Загальний об'єм тари (без кутника): $V_{\text{тари}} = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Маса тари (без кутника):

$$m_{\text{тари}} = 2,66 \cdot 10^{-3} \cdot 7,78 \cdot 10^{-3} = 20,69 \text{ кг.}$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маса кутника: $m_k = 10,81$ кг.

Маса усієї тари: $M_{тари} = 20,69 + 10,81 = 31,5$ кг.

Маса тари, що нагрівається за 1 год:

$$M_m = \frac{1}{\tau_{заг}} \cdot M_{тари} = \frac{1}{0,93} \cdot 31,5 = 33,87 \frac{\text{кг}}{\text{год}},$$

Тепло, витрачене на нагрівання тари:

$$Q_m = C_m(t_m^k - t_m^n)G_m = 0,628(900 - 20) \cdot 33,87 = 18717,9 \text{ кДж}$$

Після визначення всіх статей складається рівняння теплового балансу:

$$1,18(Q_{мет} + Q_m + Q_{п.г.}B + Q_{пов} + Q_{вік}) = Q_H^P B + Q_{рек} B, \quad (2.24)$$

де $Q_{рек}$ – кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, визначається за формулою:

$$Q_{рек} = L_\delta i_0 = 10,2 \cdot 533 = 5436,6 \text{ кДж}, \quad (2.25)$$

де L_δ – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці палива;
 i_0 – тепловміст підігрітого повітря, кДж/м³.

З рівняння теплового балансу визначаються витрати палива:

$$B = \frac{1,18 \cdot (Q_{мет} + Q_m + Q_{пов} + Q_{вік})}{Q_H^P + Q_{рек} - 1,18 Q_{п.г.}} \text{ м}^3, \quad (2.26)$$

$$B = \frac{1,18 \cdot (57330 + 18717,9 + 10829,86 + 3206,6)}{36523,8 + 5436,6 - 1,18 \cdot 13143,69} = 4,02 \text{ м}^2$$

Інші витрати:

$$\begin{aligned} Q_{ін} + Q_{мет} + Q_m + Q_{п.г.}B + Q_{пов} + Q_{вік} &= Q_H^P B + Q_{рек} B, \\ Q_{ін} &= (Q_H^P B + Q_{рек}) \cdot B - Q_{мет} - Q_m - Q_{п.г.}B - Q_{пов} - Q_{вік} \text{ кДж} \quad (2.27) \\ Q_{ін} &= Q_H^P B + Q_{рек} B - Q_{мет} - Q_m - Q_{п.г.}B - Q_{пов} - Q_{вік} \\ &= 36523,8 \cdot 4,02 + 5436,6 \cdot 4,02 - 57330 - 18717,9 - 13143,69 \\ &\quad \cdot 4,2 - 10829,86 - 3206,6 = 25758,81 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Весь прихід тепла у піч:

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} + Q_{\text{рек}}^{\text{B}} = 36523,8 \cdot 4,02 + 5436,6 \cdot 4,02 = 168680,8 \text{ кДж.} - 100\%.$$

Горіння палива 146630,5 – 86,93%

Тепло, яке повертається у піч через рекуператор 22050,26 – 13,07%

Втрати з продуктами горіння 52829,9 кДж – 31,32%

Інші витрати 25758,81 кДж – 15,27%

Нагрів тари 18717,9 кДж – 11,10%

Нагрів металу 57330 кДж – 33,99%

Втрати через вікна 3206,6 кДж – 1,90%

Втрати через стіни, склепіння і черинь печі 10829,86 – 6,42%

Коефіцієнт корисної дії печі:

$$\text{ККД} = \frac{57330}{146630,5} \cdot 100\% = 39 \%$$

Графічне зображення теплового балансу печі показано на рисунку 2.1.

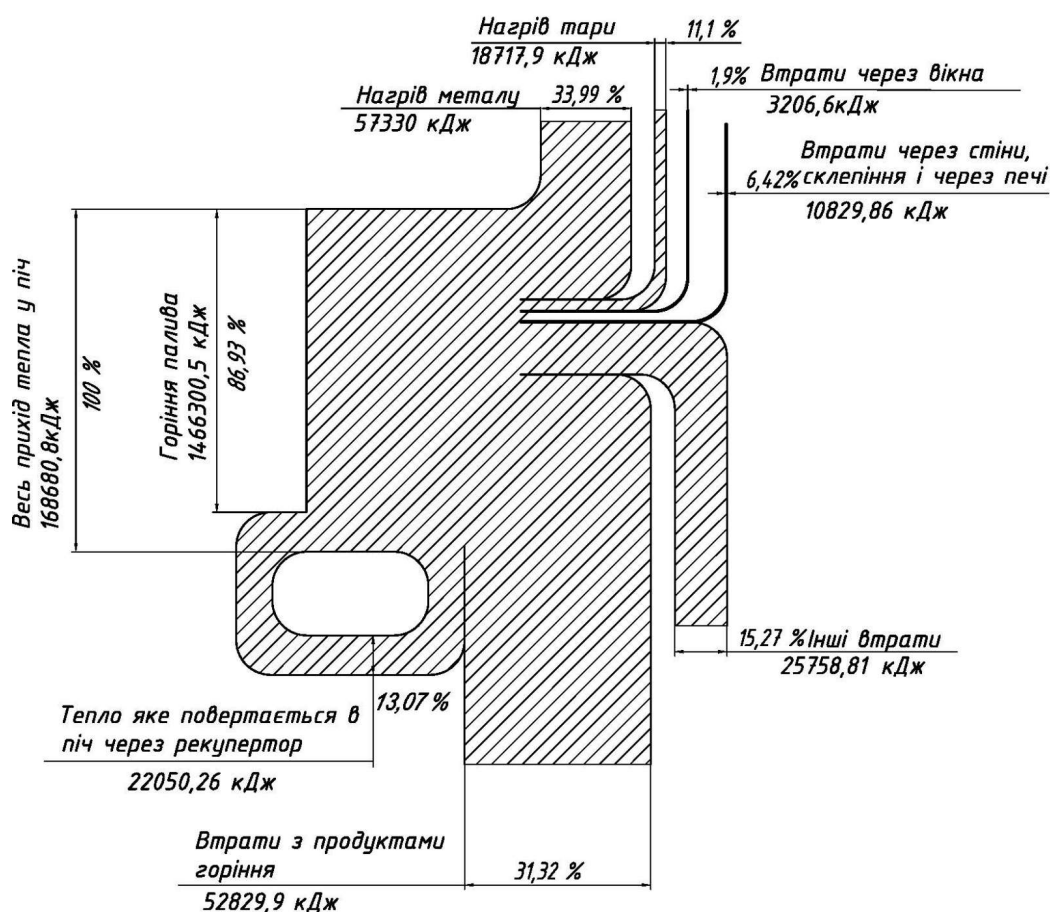


Рисунок 2.1 – Тепловий баланс печі

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі

Для визначення розмірів робочої камери печі необхідно встановити кількість деталей у садці. Садкою називають сукупність деталей, які завантажуються в піч за один цикл.

Кількість деталей у садці визначається за формулою:

$$N_c = \frac{N}{K_c} = \frac{150000}{1841,60} = 81,45 \text{ шт.}, \quad (3.1)$$

де N – програма випуску, шт.;

K_c – кількість садок в рік.

З урахуванням прийнятої схеми розташування заготовок у садці кількість деталей становить $N = 84$ шт.

Річна кількість садок визначається за формулою:

$$K_c = \frac{\Phi_{p.o.} \cdot K_z \cdot n}{\tau_{zag.}} = \frac{2015 \cdot 0,85 \cdot 1}{0,93} = 1841,60 \approx 1842 \text{ шт.} \quad (3.2)$$

де $\Phi_{p.o.}$ – фонд роботи обладнання в одну зміну, приймаємо 2015 год.;

n – кількість робочих змін, $n = 1$;

$\tau_{zag.}$ – загальний час садки, год.

Визначаємо загальний час садки:

$$\tau_{zag.} = \tau_{н.з.с.} + \tau_{\delta} = 0,70 + 0,23 = 0,93 \text{ год.}, \quad (3.3)$$

де $\tau_{н.з.с.}$ – час нагріву заготовки у садці, год.;

τ_{δ} – додатковий час, год,

$$\tau_{\delta} = \frac{1}{3} \cdot \tau_{н.з.с.} = \frac{1}{3} \cdot 0,70 = 0,23 \text{ год.}, \quad (3.4)$$

Час нагріву заготовки в садці:

$$\tau_{н.з.с.} = \tau \cdot a = 0,32 \cdot 2,2 = 0,70 \text{ год.}, \quad (3.5)$$

де τ – час нагріву заготовки, год.;

a – коефіцієнт, що враховує спосіб розташування заготовок в печі.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ширина черені печі:

$$B_n = z_1 \cdot l + (z_1 + 1) \cdot \delta = 9 \cdot 158 + (9 + 1) \cdot 6 = 1482 \text{ мм}, \quad (3.6)$$

де z_1 – кількість рядків;

l – довжина заготовки, мм;

δ – зазор між торцями заготовки, $\delta = 6$ мм.

Довжина черені (де проходить нагрів деталей):

$$L_n = z_2 \cdot b + (z_1 + 1) \cdot \delta = 9 \cdot 90 + (9 + 1) \cdot 6 = 870 \text{ мм}, \quad (3.7)$$

де z_2 – кількість заготовок у рядку;

b – ширина заготовки, мм;

δ – зазор між торцями заготовки, $\delta = 6$ мм.

Проведемо перерахунок розмірів печі з врахуванням розмірів цегли і швів

Отже:

довжина:

$$L_{\text{заг.}} = \frac{1682}{233} = 7 \cdot 233 + 130 = 1761 \text{ мм}; \quad (3.8)$$

ширина:

$$B_{\text{заг.}} = \frac{1070}{233} = 5 \cdot 233 - 3 = 1162 \text{ мм}; \quad (3.9)$$

Тоді висота камери печі:

$$H = 1,2 \cdot B_n = 1,2 \cdot 1162 = 1394,4 \text{ мм}; \quad (3.10)$$

Тоді, при перерахунку на розміри цегли і швів:

$$H = (21 \cdot 68) - 3 = 1425 \text{ мм}. \quad (3.11)$$

Розміри робочої камери печі вказано на рисунку 3.1.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

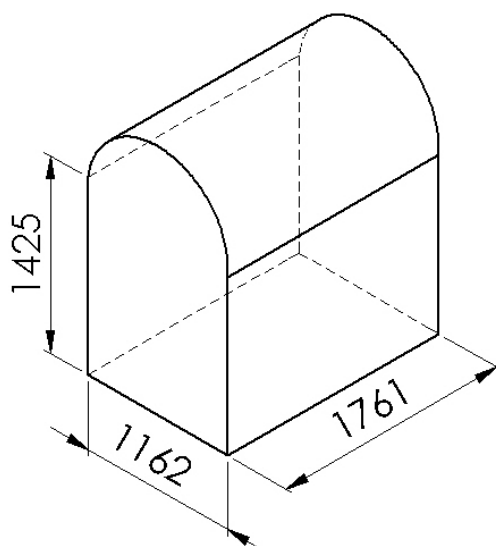


Рисунок 3.1

3.2. Вибір матеріалів для побудови печі

Вибір матеріалів для побудови печі здійснюється на основі результатів теплотехнічних розрахунків та з урахуванням температурних умов її роботи [10]. Оскільки висота стін печі перевищує 1 м (1425мм), робоча температура в зоні нагріву досягає понад 1200 °С, що вимагає використання відповідних вогнетривких матеріалів.

Конструкція передбачає виконання стін, череня та склепіння двошаровими: з внутрішнього вогнетривкого та зовнішнього теплоізоляційного шару. Така конструкція забезпечує надійну роботу печі при високих температурах та зменшення тепловтрат у навколишнє середовище.

Внутрішній шар кладки виконується із шамоту класу А, який характеризується високою вогнетривкістю, термічною стійкістю та здатністю зберігати міцність при температурах понад 1200 °С [11]. Товщина цього шару приймається в межах 230...250мм.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зовнішній теплоізоляційний шар виконується з діатомітової цегли товщиною 120...250 мм [12]. Використання даного матеріалу обумовлене його низькою теплопровідністю, що дозволяє зменшити втрати теплоти через огорожувальні конструкції печі та підвищити її енергоефективність [13].

Для забезпечення міцності та герметичності кладки застосовується шамотний розчин, який забезпечує надійне з'єднання елементів конструкції та стійкість до високих температур.

Таким чином, обрана конструкція печі та використанні матеріали забезпечують необхідний температурний режим, надійність роботи та мінімізацію тепловтрат.

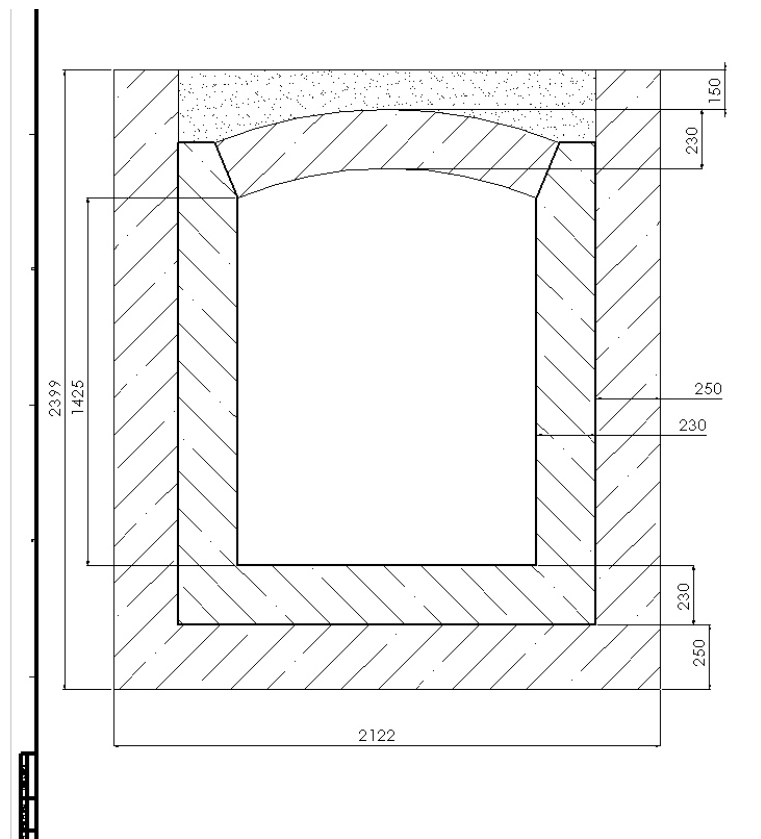


Рисунок 3.2 – Кладка стінок і склепіння печі

3.3. Конструкція елементів печі

3.3.1. Канали для відводу димових газів

Канали для відведення димових газів розташовуються у бокових стінах вікон для завантаження деталей (рисунок 3.3). У зоні склепіння вони об'єднуються в один потік, після чого на виході з печі встановлюється рекуператор. Таке конструктивне рішення дозволяє запобігти підтягуванню холодного повітря з приміщення цеху через зазори між вікном та його кришкою.

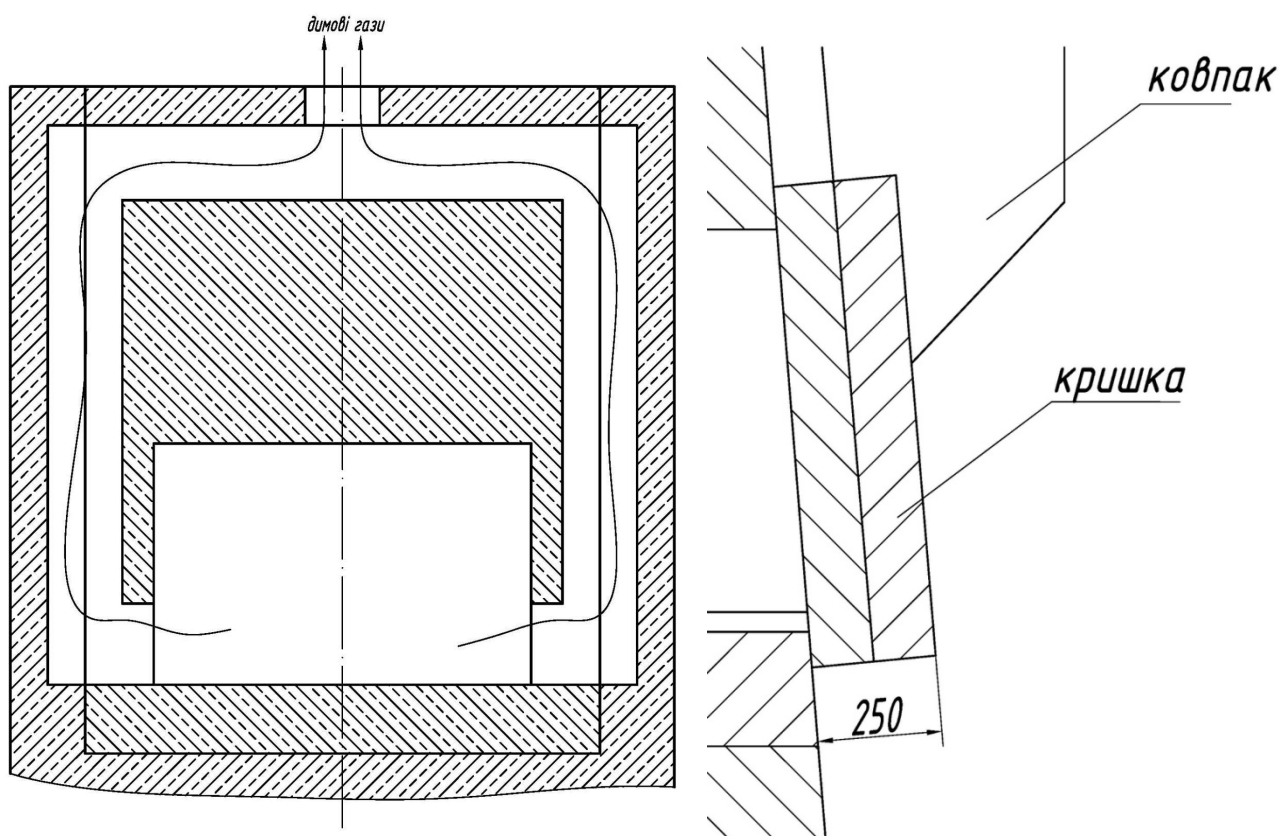


Рисунок 3.3 – Облаштування каналів для відводу димових газів

3.3.2. Вікно для завантаження і вивантаження деталей

Кришка вікна завантаження вивантаження деталей виконується у два шари: вогнетривкий шар та теплоізоляційний. Зовнішня поверхня обшивається листовою сталлю та покривається алюмінієвою фарбою для захисту від теплового впливу.

Для забезпечення щільного прилягання кришки до вікна розташовують під кутом 5° до вертикалі (рисунок 3.4). Піднімання та опускання кришки здійснюється за допомогою тросової системи через ролики, привід якої забезпечується двома пневмоциліндрами.

З метою уловлювання димових газів, що виділяються під час відкривання кришки, встановлюється спеціальний ковпак. Він виготовляється з листової сталі та під'єднується до системи відведення димових газів.

3.4. Вибір горілок

Вибір горілок для спалювання газоподібного палива визначається сукупністю технологічних, експлуатаційних та економічних чинників. До основних з них належать конструкція та продуктивність печі, температура в робочому просторі, вид і тиск газу, повнота його згоряння, а також вартість обладнання та зручність його обслуговування. Під видом газу розуміють його склад, теплотворну здатність та ступінь очищення.

Основною умовою правильного виробу горілки є врахування наявного тиску газу та за можливості, його використання без дроселювання.

При спалюванні неочищеного газу у печах великої продуктивності застосовують прості горілки – головки з роздільною подачею газу і повітря, а також спеціальні горілки для такого типу палива. У першому випадку температура підігріву повітря практично не обмежується, у другому – може досягати $400...500^{\circ}\text{C}$.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У разі використання газу з низькою теплотворною здатністю (4600...5000 кДж/м³) для забезпечення високої температури в робочому просторі печі (понад 1200 °С) доцільно застосовувати горілки зовнішнього змішування. Вони дозволяють безпечно підігрівати як газ, так і повітря до високих температур.

Для середніх і малих ковальських печей, які працюють на газі з теплотворенням вище 5000 кДж/м³, без використання тепла димових газів на підігрів повітря і газу, застосовують інжекційні горілки. Багаторічний досвід роботи печей за даними горілками довів їх переваги: вони компактні і нечутливі до струсів від ударів молота.

Горілки з зовнішнім, або внутрішнім змішуванням газу з повітрям використовують для середніх і малих ковальських печей з підігрівом повітря до 500...600 °С.

Кількість горілок визначається на етапі проектування печі. Збільшення їх кількості дозволяє зменшити потужність окремих горілок і спростити їх конструкцію, а також забезпечити регулювання теплового режиму шляхом відключення частини з них. Водночас надмірна кількість горілок ускладнює їх розміщення, збільшує кількість трубопроводів і підвищує вартість обладнання та складність обслуговування. Тому при проектуванні доцільно обирати оптимальну кількість горілок, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл температури в робочому просторі печі.

У даній конструкції печі горілки розташовуються у шаховому порядку на протилежних бокових стінках. При довжині печі $L = 1,76$ м передбачається встановлення двох горілок ($N(\Gamma) = 2$.)

Продуктивність горілки визначається за формулою:

$$P_{\Gamma} = K_{з.г.} \cdot \frac{B}{N_{\Gamma}}, \quad (3.12)$$

де $K_{з.г.}$ – коефіцієнт запасу;

B – витрати палива: 4,02 м³;

N_{Γ} – кількість горілок в печі.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставивши дані в формулу (3.12), отримаємо:

$$\Pi_r = 1,15 \cdot \frac{4,02}{2} = 2,3 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Вибираємо горілку ГНП – 1 (рисунок 3.6).

В піч встановлюємо 2 (дві) горілки типу ГНП – 1. Основні характеристики даної горілки:

$\Pi_e = 2,3$ – продуктивність горілки, м³/год;

$D_{газ} = 20$ – діаметр підводу газу мм,

$D_{пов} = 36$ – діаметр підводу повітря мм,

$D_l = 25$ – діаметр вихідного сопла горілки мм,

$L = 203$ – довжина горілки мм.

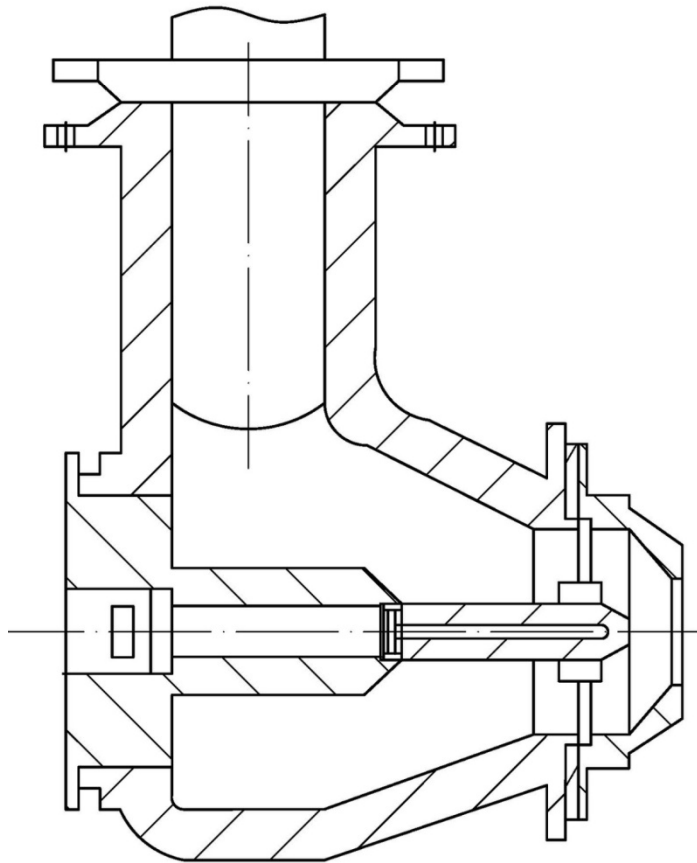


Рисунок 3.6 – Горілка ГНП – 1

3.5. Розрахунок рекуператора

При проектуванні трубчастого рекуператора метою розрахунків є визначення ефективної поверхні нагріву і деяких інших величин, які характеризують конструкцію.

Вихідними формулами для розрахунку рекуператора є:

– рівняння тепловіддачі:

$$Q = kF\Delta t_c; \quad (3.13)$$

– рівняння теплового балансу:

$$V_\delta(i'_\delta - i''_\delta)\xi = V_n(i'_n - i''_n), \quad (3.14)$$

де Q – кількість тепла, що передається через всю поверхню нагріву, кДж;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м² град;

F – поверхня нагріву рекуператора, м²;

Δt_c – середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям, °С;

V_δ – витрати продуктів горіння, м³;

i'_δ – початковий тепловміст диму, кДж/м³;

i''_δ – кінцевий тепловміст диму, кДж/м³;

ξ – коефіцієнт, який враховує втрати тепла через кладку рекуператора;

i'_n – кінцевий тепловміст повітря, кДж/м³;

i''_n – початковий тепловміст повітря, кДж/м³;

V_n – витрати повітря, м³.

Коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\delta} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} = \frac{1}{\frac{1}{87,28} + \frac{0,002}{24,8} + \frac{1}{98,03}} = 46 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}, \quad (3.15)$$

α_δ – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки, Вт/м² град;

S – товщина стінки, м;

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/м · град;

α_n – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря або газу, Вт/м² град;

Коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки:

$$\alpha_{\delta}^k = (7,4 + 0,00924t_{\delta}) \frac{W_0^{0,65}}{d^{0,35}} = (7,4 + 0,00924 \cdot 730) \frac{2^{0,65}}{0,02^{0,35}} = 87,28 \text{ Вт/м}^2 \text{ град} \quad (3.16)$$

де t_{δ} – температура диму, °С;

W_0 – швидкість руху диму, м/с;

d_0 – діаметр труби, м;

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря:

$$\alpha_{\delta}^k = (7,4 + 0,0058t_{\delta}) \frac{W_0^{0,65}}{d^{0,35}} = (7,54 + 0,0058 \cdot 210) \frac{5^{0,65}}{0,02^{0,35}} = 98,03 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}, \quad (3.17)$$

Де t_n – температура повітря, °С;

W_0 – швидкість руху повітря, м.

Кінцевий тепловміст диму:

$$i_{\delta}'' = i_{\delta}' - \frac{V_n}{V_{\delta}\xi} (i_n' - i_n'') = 1251,78 - \frac{9,7}{10,5 \cdot 0,5} (533,0 - 26,0) = 315,04 \text{ кДж/м}^3. \quad (3.18)$$

Середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям:

$$\Delta t_c = \frac{(t_{\delta}' - t_n') - (t_{\delta}'' - t_n'')}{\ln \frac{(t_{\delta}' - t_n')}{(t_{\delta}'' - t_n'')}} = \frac{(860 - 20) - (600 - 400)}{\ln \frac{860 - 20}{600 - 400}} = 495,97 \text{ °С}, \quad (3.19)$$

Поверхня нагріву рекуператора F:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_c} \cdot B = \frac{4951,89}{46 \cdot 495,97} \cdot 4,02 = 0,87 \text{ м}^2; \quad (3.20)$$

$$L_{\text{заг}} = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{0,87}{3,14 \cdot 0,02} = 13,85 \text{ м}. \quad (3.21)$$

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо мінімальну кількість трубок в рекуператорі:

$$k = 13,85/0,5 = 27,7;$$

Приймаємо 28 трубок довжиною 500 мм з розташуванням 4·7. Відстань між трубками 20мм, відстань між стіною і трубкою 20мм. Схема коридорного пучка показана на рисунку 3.5.

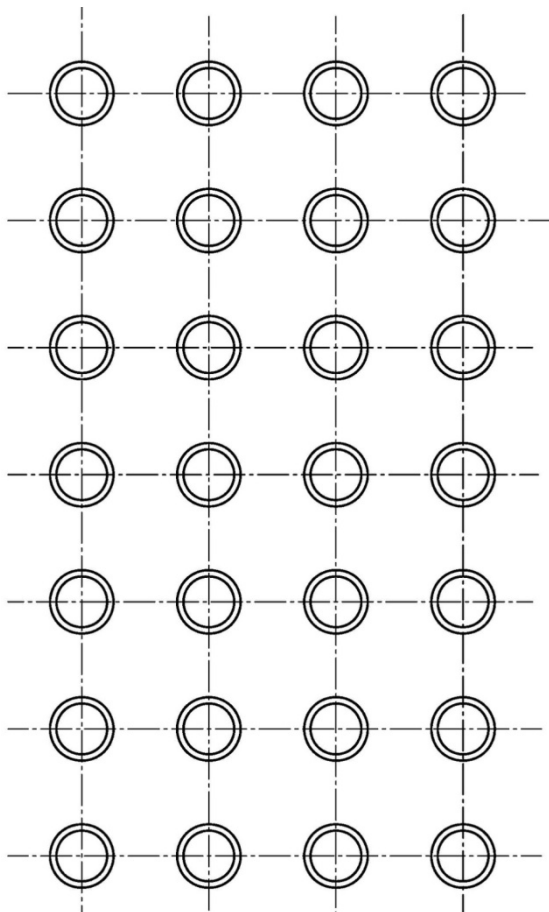


Рисунок 3.5 – схема коридорного пучка

Рекуператор обладнується двома колекторами для димових газів і двома колекторами для повітря. До повітряних колекторів приварюються фланці з внутрішнім діаметром 200 мм і зовнішнім 400 мм для під'єднання до системи подачі повітря для спалювання. Рекуператор виготовляється з жароміцної високолегованої сталі EN 1.4842 (10X18H18Ю4Д).

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6. Тара для завантаження деталей в піч

Тара виготовляється з жароміцної високолегованої сталі EN 1.4842 (10X18H18Ю4Д) і являє собою прямокутний контур розміром 870·1482 мм (рисунок 3.6).

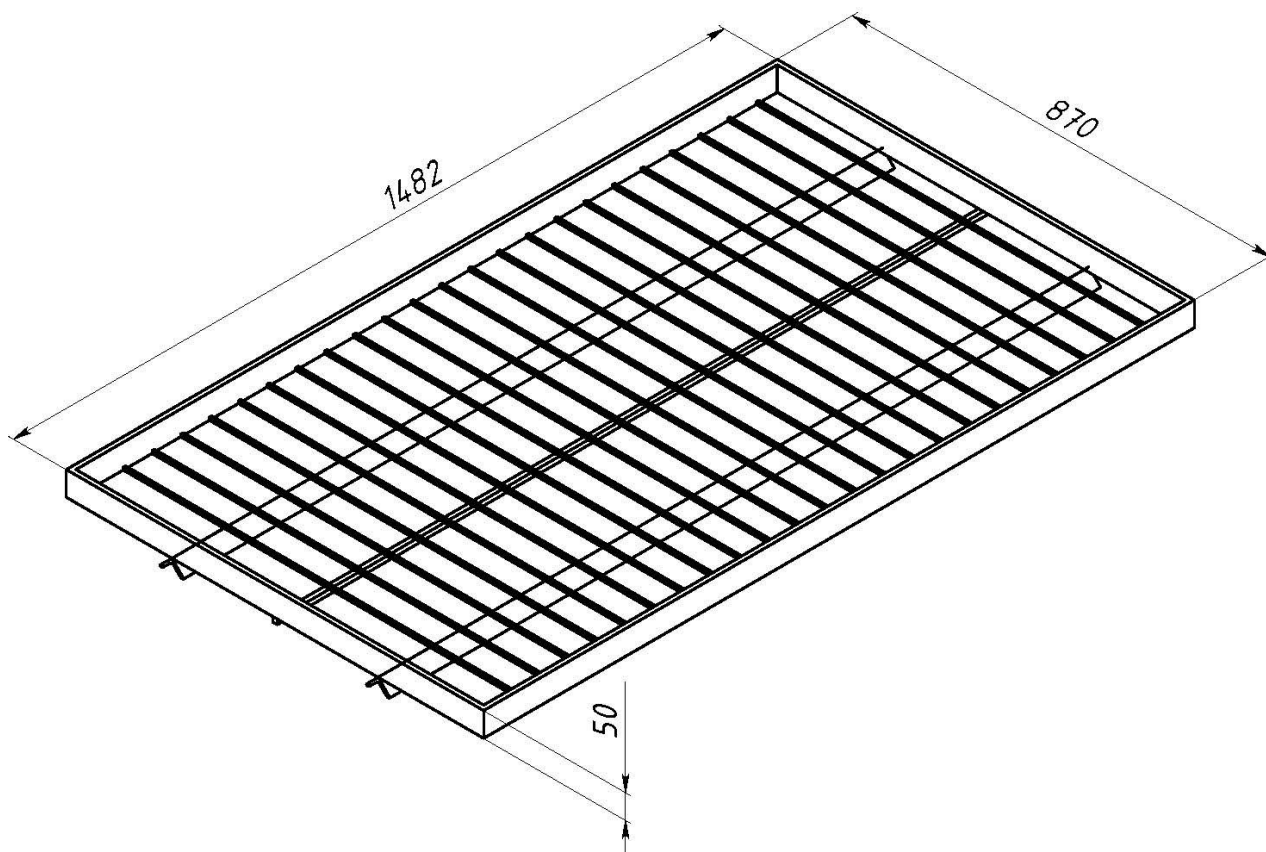


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд тари для завантаження деталей в піч

В нижній частині якого знаходиться зварна решітка з металевих прутів квадратного січення розмірами 10·10 та 5·5 мм. Для заштовхування тари в піч вона монтується на двох кутниках розмірами 35·35·5 мм. Крок прутів 5·5 мм вибивається з такого розрахунку, щоб деталь опиралась як мінімум на два прути, в нашому випадку через 60 мм.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було розроблено проект камерної полум'яної печі для термічної обробки деталей типу плита зі сталі 40Х та обґрунтовано технологічний процес їх гартування з подальшим відпуском.

Проведений аналіз конструкції деталей показав, що складна геометрія та наявність отворів зумовлюють необхідність рівномірного нагрівання для запобігання виникненню внутрішніх напружень і деформацій. На основі цього обрано багатоступеневий режим нагріву в трьох температурних інтервалах.

У технологічній частині виконано розрахунок процесу горіння газоподібного палива, визначено необхідні параметри для ефективності роботи печі та складено її тепловий баланс. Це дозволило оцінити ефективність використання теплоти на основі джерела теплових втрат.

У конструкторській частині розраховано основні параметри робочої камери печі та обґрунтовано вибір матеріалів для її виготовлення. Використання сучасних теплоізоляційних і вогнетривких матеріалів забезпечує зменшення теплових втрат, підвищення довговічності конструкції та ефективності роботи обладнання.

З метою підвищення енергоефективності печі розроблено рекуператор, який забезпечує використання теплоти відхідних газів для підігріву повітря, що подається на горіння. Це сприяє зменшенню витрат палива та підвищенню коефіцієнта корисної дії печі.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих технологічних і конструктивних рішень та можуть бути використані при вдосконаленні процесів термічної обробки і модернізації теплотехнічного обладнання у машинобудівному виробництві.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Металознавство: підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко та ін. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Київ: ІВЦ «Політехніка», 2002. – 384 с.
2. Кузін О. А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – Львів: Афіша, 2002. – 304 с.
3. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, О. А. Носко. – Дніпро: НМетАУ, 2008. – 348 с.
4. Термічна обробка: методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Матеріалознавство» та «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство, галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Ю.П. Фещук. – Луцьк: ЛНТУ, 2022. – 74 с.
5. Устаткування процесів теплової обробки: методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів спеціальності 6.090100 – «Прикладне матеріалознавство» усіх форм навчання / С.В. Мисковець, Ю.П. Фещук, О.Д. Клименко – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – 44 с.
6. Устаткування процесів теплової обробки ОТ: конспект лекцій для студентів спеціальності 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Н. П. Зайчук. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – 100 с.
7. Леговані сталі та сплави: навчальний посібник / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 171 с.
8. Технологія конструкційних матеріалів: підручник / М. Н. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін.; за ред. М. Н. Сологуба. – Київ: Вища школа, 2002. – 374 с.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів / В. В. Атаманюк. – Київ: Кондор, 2016. – 528 с.

10. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник / О. М. Герасименко, В. О. Лещенко. – Київ: Професіонал, 2004. – 560 с.

11. ДСТУ EN 10083–1:2016. Сталі для гартування і відпуску. Технічні умови постачання. Частина 1. Загальні технічні умови. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 24 с.

12. Матеріалознавство: підручник / П. Г. Лихацький, О. І. Буря, В. В. Черняк. – Київ: Каравела, 2012. – 368 с.

13. Стадник М. М. Теорія термічної обробки металів: навчальний посібник / М. М. Стадник. – Львів: Новий Світ–2000, 2011. – 280 с.

					БП 4426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		