

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 втулка / **Design of Flame-Fired Chamber Furnace
with the Development of a Technological Process for the
Heat Treatment of Bushing-Type Parts****

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг і менеджмент»

**Виконала: здобувачка вищої освіти
групи ПМ(ІІМ)с-31**

Козловська Катерина Юріївна

(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.

“___” _____ 20__ року

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

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____

керівник роботи _____,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ року № _____

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«___» _____ 202__ р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «___» _____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка

Здобувач вищої освіти _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Козловська К.Ю. Проект камерної полум'яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу втулка. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Індустріальний інжиніринг і менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, 3 розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел, додатків.

У роботі розроблено проект полум'яної печі, призначеної для термічної обробки деталі.

Розрахункова частина охоплює термохімічний аналіз реакції горіння: кількісно оцінено виділення теплоти, встановлено фазовий а об'ємний склад продуктів окиснення газового палива. Окремо встановлено розрахункову тривалість нагрівання садки та побудовано зведений тепловий баланс печі.

Для скорочення теплових втрат із газами, що відводяться, розроблено конструкцію трубчастого рекуператора. Принцип його дії ґрунтується на передачі частини теплоти димових газів для попереднього підігріву повітря, що подається до печі з метою спалювання газоподібного палива.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить 39 сторінок формату А4, 8 рисунків та 13 літературних джерела. Графічна частина містить 7 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: втулка, паливо, тепловий баланс, тара, піч, рекуператор.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Козловська			Проект камерної полум'яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу втулка		Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Мисковець							3	39
Реценз.							ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)с-31			
Н. Контр.		Мисковець								
Затв.		Імбирович								

ANNOTATION

Kozlovska K.Yu. Design of a Flame-Fired Chamber Furnace with the Development of a Technological Process for the Heat Treatment of Bushing- Type Parts. Manuscript.

Bachelor's qualification work of OP "Industrial Engineering and Management" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification thesis consists of an introduction, 3 chapters, conclusions and recommendations, a list of references, and appendices.

The work presents an engineering design of a flame-fired furnace intended for treatment processing of mechanical components.

The computational section covers a thermochemical examination of the combustion reaction: the heat output was quantified, and both the phase and volumetric composition of gaseous fuel oxidation products were established. The calculated heating duration of the charge was determined separately, and a consolidated thermal balance of the furnace was compiled.

To reduce heat losses associated with the removed gases, a tubular recuperator was designed. Its operating principle is based on extracting a portion of flue gas thermal energy and directing it toward preheating the combustion air supplied to the furnace burners.

The bachelor's thesis consists of an explanatory note and a graphical section. The explanatory note contains 39 pages of A4 format, 8 figures and 13 references. The graphical section includes 7 sheets of A4 format in application A.

Key words: bushing, fuel, thermal balance, charge, furnace, recuperator.

					БП 4526.00.00.000 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 та задачі дипломної роботи	12
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	13
2.1. Розрахунок горіння палива	13
2.1.1. Теплотворність 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	18
2.3.2. Втрати тепла з димовими газами	19
2.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі	19
2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі	21
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	31
3.5. Розрахунок рекуператорів	33
3.6. Тара для завантаження деталей в піч	36
ВИСНОВКИ	37

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 38

ДОДАТКИ

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Термічна обробка металевих деталей є невід’ємною складовою сучасного машинобудівного виробництва [1]. Від якості нагрівання та витримки деталей безпосередньо залежать їх механічні характеристики, довговічність та надійність під час експлуатації. Особливої актуальності це набуває при обробці легованих сталей, поведінка яких у процесі нагріву суттєво відрізняється від вуглецевих аналогів.

Об’єктом дослідження у даній кваліфікаційній роботі є процес термічної обробки деталі типу «втулка», виготовленої зі сталі 45Х. Ця конструкційна хромиста сталь широко застосовується у деталях, що функціонують в умовах підвищеного зносу та значних механічних навантажень, і потребує ретельно підбраного режиму термообробки для забезпечення необхідного комплексу властивостей.

Предметом дослідження є камерна полум’яна піч – теплотехнічне обладнання, призначене для нагрівання заготовок перед загартуванням [2]. Вибір саме цього типу печі зумовлений характером виробництва та розмірами оброблюваних деталей.

Мета роботи полягає у розробці проекту камерної полум’яної печі та технологічного процесу термічної обробки деталей типу «втулка» з урахуванням теплотехнічних, конструкторських та технологічних вимог [3].

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- а) проведено аналіз конструкції деталі та вимог до матеріалу;
- б) обґрунтовано раціональний режим термічної обробки;
- в) виконано розрахунки процесу горіння газоподібного палива, тривалості нагрівання металу та теплового балансу печі;
- г) визначено геометричні параметри робочої камери;
- г) здійснено вибір конструкційних матеріалів для кладки, типу горілок;
- д) розроблено рекуператор для утилізації теплоти відхідних газів.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практична цінність роботи полягає у можливості безпосереднього використання отриманих результатів при проектуванні або модернізації термічних дільниць машинобудівних підприємств.

					БП 4526.00.00.000 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 нагріванню під гартування, є втулкою циліндричної форми (рисунок 1.1). Відповідно, геометричні параметри втулки такі: зовнішній діаметр основного циліндра – 36 мм, висота – 32 мм, діаметр наскрізного центрального отвору 14 мм. У верхній частині деталь має кільцевий фланцевий виступ шириною 12 мм та висотою 0,5 мм. На зовнішній циліндричній поверхні наявна кільцева канавка глибиною 1,5 мм та шириною 0,4 мм. У нижній частині виконані фаски 0,8×0,8 мм. Зовнішні діаметри ступінчастої частини становлять 26,4 мм, 28,5 мм та 30,08 мм.

За даними тривимірного моделювання у середовищі SolidWorks масові характеристики деталі такі [4]: маса – 289,09 г; об'єм – 36826,43 мм³; площа поверхні – 13011,03 мм². Щільність матеріалу прийнята 7820 кг/м³, що відповідає табличному значенню для сталі 45Х згідно з марочником сталей і сплавів.

Деталь виготовлена зі сталі 45Х (ГОСТ 4543-71) – конструкційна легована хромиста сталь [5].

Призначення: сталь 45Х застосовується для виготовлення валів, шестерень, осей, болтів, шатунів та інших деталей, до яких висуваються вимоги підвищеної твердості, зносостійкості та міцності, що працюють при незначних ударних навантаженнях.

Замінники: 40Х, 50Х, 45ХЦ, 40ХГТ, 40ХФ, 40Х2АФЕ.

Хімічний склад сталі 45Х (ГОСТ 4543-71): С = 0,41...0,49 %, Si = 0,17...0,37 %, Mn = 0,50...0,80 %, Cr = 0,80...1,10 %, Ni ≤ 0,30 %, Cu ≤ 0,30 %, S ≤ 0,035 %, P ≤ 0,035 % [6].

Механічні властивості [7]:

а) Межа міцності $\sigma_B = 1030$ МПа;

б) Межа плинності $\sigma_T = 835$ МПа;

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- в) Відносне видовження $\delta_5 = 9 \%$;
- г) Відносне звуження $\psi = 45 \%$;
- г) Ударна в'язкість $KCU = 490 \text{ кДж/м}^2$;
- д) Твердість після відпалу: $HB \leq 229$;
- е) Модуль пружності $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Технологічні властивості: зварюваність – важкозварювальна (вимагає підігріву до $200-300^\circ\text{C}$ та термообробки після зварювання); чутлива до флокенів; схильна до відпускнуї крихкості.

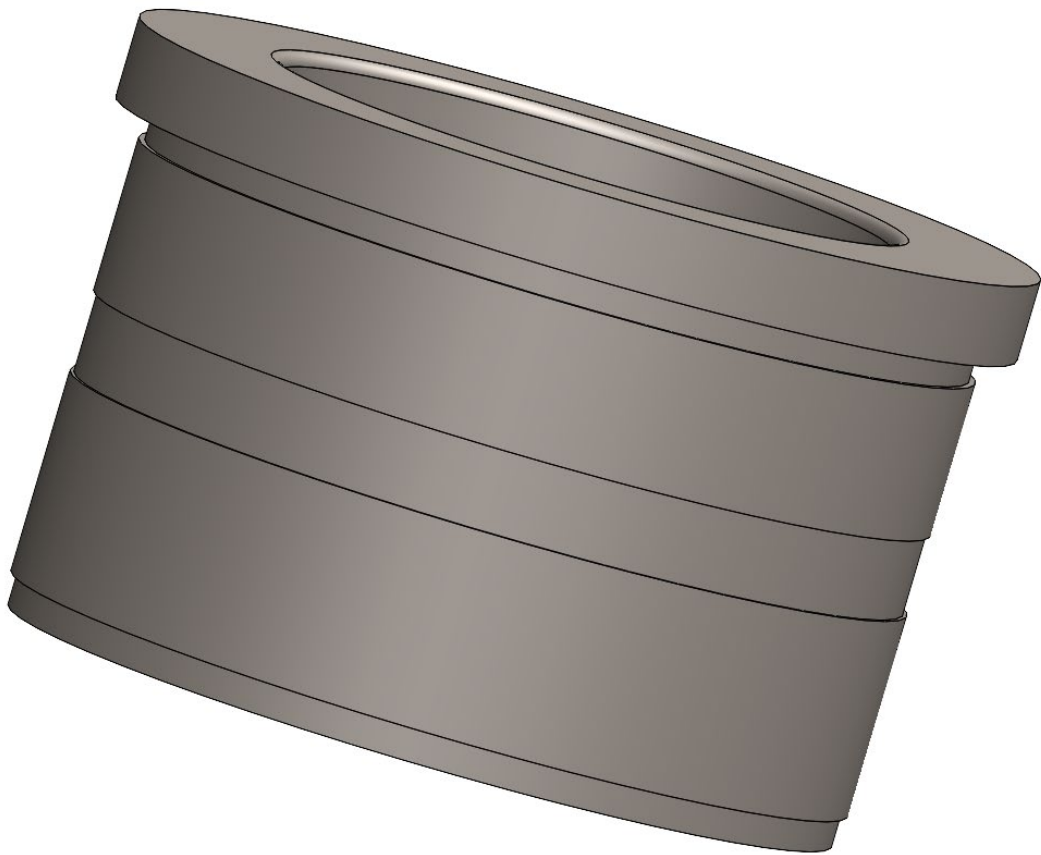


Рисунок 1.1 – 3D модель деталі втулка

1.2. Аналіз існуючого (типового) технологічного процесу

Режим і метод нагрівання призначаються з урахуванням марки матеріалу, габаритів і конфігурації заготовок, технічних вимог до готових виробів,

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеру наступних операцій механічної та теплової обробки, обсягів виробництва та ряду інших чинників.

Сталь 45X належить до конструкційних легованих хромистих сталей, що загартовуються у маслі [8]. Стандартний режим термічної обробки: загартування від 840°C (охолодження в маслі) з наступним відпуском при 520°C (охолодження у воді) [9]. При нагріванні до температури загартування відбувається повне розчинення карбідів у аустеніті. Швидке охолодження в маслі фіксує пересичений твердий розчин та забезпечує мартенситне перетворення. Загартування в маслі порівняно з водяним охолодженням суттєво зменшує ризик тріщиноутворення та деформацій. Відпуск при 520°C знімає загартувальні напруження та забезпечує підсумковий комплекс властивостей: $\sigma_B = 1030$ МПа, $\sigma_T = 835$ МПа, KCU = 490 кДж/м², твердість HB ≤ 229.

1.3. Вибір раціонального варіанту технологічного процесу

При нагріванні масивних заготовок між поверхневими і центральними шарами виникають температурні градієнти, що спричиняють виникнення термічних напружень [10]. Ці напруження концентруються в зонах дефектів і можуть спровокувати тріщиноутворення або деформацію виробу. Деформація може виявлятися у жолобленні або короблінні деталі, що є неприпустимим. Принципова складність нагрівання масивних заготовок полягає в тому, що поверхневі шари можуть бути перегріті ще до того, як центральна зона досягне потрібної температури.

Нагрівання втулки зі сталі 45X здійснюється у три температурні інтервали [11]:

20...600°C - початковий рівномірний прогрів без утворення тріщин і дефектів;

600...800°C - зона інтенсивних структурних перетворень ($A_{c1} = 735^\circ\text{C}$), уповільнення швидкості нагрівання для вирівнювання температури по перетину;

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

800...850°C - рівномірний нагрів до температури аустенізації та загартування.

1.4. Мета та задачі дипломної роботи

Головна мета дипломного проекту – проект камерної полум’яної печі з розробкою технологічного процесу термічної обробки деталей типу втулка. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- а) Здійснити потрібні технологічні та конструкторські розрахунки;
- б) Спроектувати обладнання, необхідне для практичного впровадження технологічного процесу.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок горіння палива

У процесі розрахунку спалювання палива встановлюються наступні чотири характеристики [12]:

- а) теплотворність палива;
- б) кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива;
- в) кількість і склад продуктів повного спалювання палива;
- г) температура горіння палива.

2.1.1. Теплотворність палива

Для газоподібного палива визначається за формулою [13]:

$$Q_H^p = 127CO + 108H_2 + 234H_2S + 357CH_4 + \sum Q \frac{C_m H_n}{100} = 357 \cdot 85 + \\ + \left(\frac{63500 \cdot 8 + 91100 \cdot 0,5 + 118600 \cdot 0,8}{100} \right) = 36829,30 \text{ кДж/м}^3, \quad (2.1)$$

де CO, H₂ і т.д. – відсотковий вміст відповідних компонентів в паливі. Член $\sum Q \frac{C_m H_n}{100}$ 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 спалювання одиниці газоподібного палива:

$$L_{\partial} = \alpha_n \cdot L_o, \quad (2.2)$$

Де $\alpha_n = 1,05$ – коефіцієнт надлишку повітря.

Згідно цієї формули визначаємо теоретичну кількість повітря, яка необхідна

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для спалювання одиниці газоподібного палива:

$$L_o = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] (1 + 0,00124d_n) = 0,0476 \cdot \left[2 \cdot 85 + \left(2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 8 + \left(3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,5 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,8 - 0,2 \right] \cdot (1 + 0,00124 \cdot 10) = 9,9 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (2.3)$$

де CO, H₂ і т.д. – відсотковий вміст відповідних компонентів в паливі, %;

d_n – вологовміст сухого повітря, г/см³;

Звичайно в розрахунках d_n приймається рівним 10 г/м³.

$$L_{\partial} = \alpha_n \cdot L_o = 1,05 \cdot 9,9 = 10,40 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання палива

Об'єм вуглекислого газу розраховуємо за формулою:

$$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m C_m H_n) 0,01 = (0,3 + 85 + 2 \cdot 8 + 3 \cdot 0,5 + 4 \cdot 0,8) \cdot 0,01 = 1,06 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.4)$$

Для знаходження об'єму парів води розраховуємо використовуємо формулу:

$$V_{H_2O} = \left(H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O + 0,124 L_{\partial} d_n \right) 0,01 = \left(2 \times 85 + \frac{2}{2} \cdot 8 + \frac{3}{2} \cdot 0,5 + \frac{4}{2} \cdot 0,8 + 0,124 \cdot 10,40 \cdot 10 \right) \cdot 0,01 = 1,93 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.5)$$

Об'єм залишкового кисню обчислюємо наступним чином:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha_n - 1)L_o = 0,21 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,9 = 0,10 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.6)$$

Об'єм азоту визначаємо як:

$$V_{N_2} = (N_2 - 79L_{\partial}) 0,01 = (5,2 + 79 \cdot 10,40) \cdot 0,01 = 8,27 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.7)$$

На основі проведених вище розрахунків, обчислюємо сумарний об'єм продуктів горіння:

$$V_{\partial} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} = 1,06 + 1,93 + 0 + 0,10 + 8,27 = 11,36 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.8)$$

Для вуглекислого газу відсотковий склад продуктів горіння визначається:

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\partial}} 100\% = \frac{1,06}{11,36} \cdot 100\% = 9,33\%. \quad (2.9)$$

Для парів води відсотковий вміст обчислюється:

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{\partial}} 100\% = \frac{1,93}{11,36} \cdot 100\% = 16,99\%. \quad (2.10)$$

Для кисню відсоткова частка визначається наступним чином:

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\partial}} 100\% = \frac{0,10}{11,36} \cdot 100\% = 0,88\%. \quad (2.11)$$

Для азоту відсотковий вміст розраховується за формулою:

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\partial}} 100\% = \frac{8,27}{11,36} \cdot 100\% = 72,80\%. \quad (2.12)$$

2.2. Тривалість нагріву металу

Для тонких тіл тривалість нагріву можна знайти за такою формулою:

$$\tau = \frac{S \rho C_p}{k_1 \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{п}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{к}}}, \quad (2.13)$$

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

k_1 – коефіцієнт форми (для плити $k=1$);

ρ – щільність, кг/м³;

C_p – середня теплоємність, Дж/кг·град;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/кг·град;

$t_{\text{печ}}$ – температура печі, °С;

$t_{\text{п}}$ – початкова температура тіла, °С;

$t_{\text{к}}$ – кінцева температура тіла, °С.

Середнє значення теплоємності в інтервалі температур:

$$C_{p_{t_{\text{п}}}}^{t_{\text{к}}} = \frac{i_0^{t_{\text{к}}} - i_0^{t_{\text{п}}}}{t_{\text{к}} - t_{\text{п}}}, \quad (2.14)$$

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

При обчисленні часу нагріву для гартування деталі до 850°С, температурний проміжок розділяють на три інтервали: 1 – 20...600°С, 2 – 600...800°С, 3 – 800...850°С.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для проведення розрахунків використовуємо наступні параметри:

$$S = 15 \cdot 10^{-3};$$

$$k = 1;$$

$$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3 \text{ (7,85 г/м}^3\text{)};$$

$$i_0^{20} = 47,3 \text{ кДж/кг};$$

$$i_0^{600} = 343,3 \text{ кДж/кг};$$

$$i_0^{800} = 547,7 \text{ кДж/кг};$$

$$i_0^{850} = 583,9 \text{ кДж/кг}.$$

Середнє значення теплоємності для першого інтервалу:

$$C_{p_{20}}^{600} = \frac{i_0^{600} - i_0^{20}}{t_k - t_{\pi}} = \frac{343,3 - 47,3}{600 - 20} = 0,510 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Середнє значення теплоємності для другого інтервалу:

$$C_{p_{600}}^{800} = \frac{i_0^{800} - i_0^{600}}{t_k - t_{\pi}} = \frac{547,7 - 343,3}{800 - 600} = 1,022 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Середнє значення теплоємності для третього інтервалу:

$$C_{p_{800}}^{850} = \frac{i_0^{850} - i_0^{800}}{t_k - t_{\pi}} = \frac{583,9 - 547,7}{850 - 800} = 0,724 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

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

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

$t_{\pi}(T_{\pi})$ – температура поверхні, °С (К).

$\sigma_{\text{печ}} = \varepsilon \sigma_0$ – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м²·К⁴.

де $\sigma_0 = 5,76 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$;

ε – степінь чорноти.

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

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

Отже, визначаємо коефіцієнти тепловіддачі:

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

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

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

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

$$\alpha^{850} = 4,07 \cdot \frac{\left(\frac{1173,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{1123,15}{100}\right)^4}{900 - 850} = 246,52 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Для формули (2.13) використовується середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в інтервалі температур:

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

де α_n – коефіцієнт тепловіддачі початку інтервалу;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі кінця інтервалу.

Згідно формули (2.16) розраховується середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для першого інтервалу:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{20} + \alpha_{600}}{2} = \frac{87,26 + 178,12}{2} = 132,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

для другого інтервалу:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_{600} + \alpha_{800}}{2} = \frac{178,12 + 231,11}{2} = 204,62 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

для третього інтервалу:

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_{800} + \alpha_{850}}{2} = \frac{231,11 + 246,52}{2} = 238,82 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Тривалість нагріву в першому інтервалі температур:

$$\tau_1 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 510}{1 \cdot 132,69} \ln \frac{900 - 20}{900 - 600} = 487,04 \text{ с}.$$

Тривалість нагріву в другому інтервалі температур:

$$\tau_2 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 1022}{1 \cdot 204,62} \ln \frac{900 - 600}{900 - 800} = 644,85 \text{ с}.$$

Тривалість нагріву в третьому інтервалі температур:

$$\tau_3 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \cdot 724}{1 \cdot 238,82} \ln \frac{900 - 800}{900 - 850} = 246,06 \text{ с}.$$

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний час нагріву знаходиться за формулою:

$$\tau_{\text{н.з.с.}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 487,04 + 644,85 + 246,06 = 1377,95 \text{ с.} = 22,97 \text{ хв.} = 0,38 \text{ год.}$$

2.3. Тепловий баланс печі

Під час роботи печі незмінно відбувається передача теплоти від об'єктів з вищою температурою до об'єктів із нижчою температурою.

Тепловий баланс печі враховує усі джерела надходження та втрати теплоти.

До прибуткової частини теплового балансу входить теплота, що виділяється під час згоряння палива, а також теплота, яка повертається у піч за допомогою рекуператора.

Видаткова частина балансу складається з декількох складників:

- а) нагрів металу;
- б) втрати з продуктами горіння;
- в) втрати через стіни, склепіння, і черинь печі;
- г) втрати теплоти через вікна печі;
- г) втрати тепла на нагрів тари.

2.3.1. Нагрів металу

Єдиною корисною частиною теплового балансу є теплота, яка застосовується для нагрівання металу, а саме деталей, що проходять термічну обробку.

Кількість тепла на нагрів металу визначається за формулою:

$$Q_{\text{мет}} = C_{\text{мет}}(t_{\text{мет}}^{\text{к}} - t_{\text{мет}}^{\text{п}})\Pi, \quad (2.17)$$

де $C_{\text{мет}}$ – теплоємність металу, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{мет}}^{\text{к}}, t_{\text{мет}}^{\text{п}}$ – кінцева і початкова температура металу, °С;

Π – продуктивність печі, кг/год.

Згідно з формулою зазначеною вище теплоємність металу обраховується:

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{\text{мет}} = \frac{i_0^{t_K} - i_0^{t_{\Pi}}}{t_K - t_{\Pi}} = \frac{583,9 - 47,3}{850 - 20} = 0,65 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Продуктивність печі визначається за формулою:

$$\Pi = \frac{N_c \cdot m_g}{\tau_{\text{заг}}} = \frac{208 \cdot 0,29}{0,71} = 84,96 \text{ кг/год}, \quad (2.18)$$

де m – маса деталі, кг;

N_c – кількість садок в рік, шт.;

$\tau_{\text{заг}}$ – загальний час нагріву садки, год.

$$Q_{\text{мет}} = 0,65 \cdot (850 - 20) \cdot 84,96 = 45835,92 = 4,58 \cdot 10^4 \text{ кДж}.$$

2.3.2. Втрати тепла з димовими газами

Димові гази, що утворюються під час згоряння палива та виходять із печі, містять певну кількість теплоти, яку визначають за формулою:

$$Q_{\text{п.г.}} = C_{\text{п.г.}} \cdot t_{\text{п.г.}} \cdot V_{\text{п.г.}} = \frac{i_{\text{CO}_2} \% \text{CO}_2 + i_{\text{H}_2\text{O}} \% \text{H}_2\text{O} + i_{\text{O}_2} \% \text{O}_2 + i_{\text{N}_2} \% \text{N}_2}{100} V_{\text{п.г.}} = \quad (2.19)$$

$$= \frac{1843,15 \cdot 9,33 + 1427,82 \cdot 16,99 + 1240,35 \cdot 0,88 + 1173,20 \cdot 72,80}{100} \cdot 11,36 = 14535,56 \text{ кДж/м}^3,$$

де $C_{\text{п.г.}}$ – теплоємність продуктів горіння, кДж/(м³·°C);

$t_{\text{п.г.}}$ – температура продуктів горіння, °C;

$V_{\text{п.г.}}$ – об'єм продуктів горіння, м³/м³.

2.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі

Оскільки температура зовнішньої поверхні печі є вищою за температуру довкілля, відбувається стабільна передача теплоти у навколишнє повітря шляхом конвекції та у довкільний простір шляхом випромінювання.

Кількість тепла, що втрачається поверхнею печі, розраховується за формулою:

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

де k – коефіцієнт теплопередачі вогнетривкого шару, Вт/(м·°C):

t_1 – температура на внутрішній стороні стіни, °C;

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

t_4 – температура на зовнішній стороні стіни, °C;

Для вогнетривкого шару (для стін і черені):

$$Q_{\text{пов}}^1 = k_1(t_1 - t_2)F = 1,06 \cdot (900 - 140) \cdot 7,82 = 6299,79 \text{ кДж},$$

де $t_1 = 900^\circ\text{C}$ – температура на внутрішній стороні стіни;

$t_2 = 140^\circ\text{C}$ – температура на зовнішній стороні стіни;

$t_3 = 140^\circ\text{C}$ – температура на внутрішній стороні стіни;

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

$F = 7,82 \text{ м}^2$ – площа стін і черені.

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі вогнетривкого шару:

$$k_1 = (0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} = (0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{900 + 140}{2} = 1,06 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Для теплоізоляційного шару (для стін і черені):

$$Q_{\text{пов}}^2 = k_2(t_3 - t_4)F = 0,19 \cdot (140 - 60) \cdot 7,82 = 118,86 \text{ кДж},$$

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

Для вогнетривкого шару склепіння:

$$Q_{\text{пов}}^3 = k_1(t_1 - t_2)F = 1,06 \cdot (900 - 140) \cdot 1,48 = 1192,29 \text{ кДж},$$

де $F = 1,48 \text{ м}^2$ – площа склепіння.

Для теплоізоляційної засипки склепіння:

$$Q_{\text{пов}}^4 = k_3(t_2 - t_4)F = 0,17 \cdot (140 - 60) \cdot 1,48 = 20,13 \text{ кДж},$$

$$k_3 = (0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{t_3 + t_4}{2} = (0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{140 + 60}{2} = 0,17 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Втрати тепла через вікно (вогнетривкий шар):

$$Q_{\text{пов}}^5 = k_1(t_1 - t_2)F \cdot \tau_{\text{зак.в.}} = 1,06 \cdot (900 - 250) \cdot 0,46 \cdot 0,75 = 237,71 \text{ кДж},$$

де $t_1 = 900^\circ\text{C}$;

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

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

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_4 = 80^{\circ}\text{C};$$

$\tau_{\text{зак.в.}} = 0,75$ – частка часу протягом години коли вікно закрите.

F – площа вікна, м^2 :

$$F_{\text{вік}} = 430 \cdot 1062 = 0,46 \text{ м}^2,$$

$$h_{\text{вік}} = \frac{1}{3}H = \frac{1}{3} \cdot 1289 = 429,6 \approx 430 \text{ мм.}$$

Втрати тепла через вікно (теплоізоляційний шар):

$$Q_{\text{пов}}^6 = k_2(t_3 - t_4)F \cdot \tau_{\text{зак.в.}} = 0,19 \cdot (250 - 80) \cdot 0,46 \cdot 0,75 = 11,14 \text{ кДж.}$$

Втрати тепла через поверхню печі знаходять шляхом сумування теплових втрат усіх її елементів (стінах, черені та вікні):

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{пов}}^1 + Q_{\text{пов}}^2 + Q_{\text{пов}}^3 + Q_{\text{пов}}^4 + Q_{\text{пов}}^5 + Q_{\text{пов}}^6 = 6299,79 + 118,86 + 1192,29 + 20,13 + 237,71 + 11,14 = 7879,92 \text{ кДж} \quad (2.21)$$

2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі

Під час відкриття завантажувального та розвантажувального вікон печі з камери нагрівання внаслідок теплового випромінювання, відбувається втрата тепла. Кількість тепла визначають 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, м^2 ;

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

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

T_n – температура в печі, К.

$$\tau_{\text{від.в.}} = \frac{1}{\tau_{\text{заг.}}} \cdot \tau_{\partial} = \frac{1}{0,71} \cdot 0,18 = 0,25 \text{ год}; \quad (2.23)$$

$$\tau_{\text{зак.в.}} = 1 - \tau_{\text{від.в.}} = 1 - 0,25 = 0,75 \text{ год}; \quad (2.24)$$

$$Q_{\text{вік}} = 5,7 \cdot 0,46 \cdot 0,6 \cdot 0,25 \cdot \left(\frac{1173,15}{100} \right)^4 = 7449,69 \text{ кДж.}$$

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.5. Нагрівання тари

Кількість тепла, що витрачається на нагрівання тари, визначають за такою формулою:

$$Q_m = C_m(t_m^k - t_m^n) \cdot G_m \text{ кДж}, \quad (2.25)$$

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

t_m^k – кінцева температура тари, $t_m^k = 950^\circ\text{C}$;

t_m^n – початкова температура тари, $t_m^n = 20^\circ\text{C}$;

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

Загальний об'єм тари (без кутника): $V_{\text{тари}} = 1,924 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Маса тари (без кутника):

$$m_{\text{тари}} = 1,924 \cdot 10^{-3} \cdot 7,85 \cdot 10^3 = 15,10 \text{ кг.}$$

Маса кутника: $m_k = 10,72 \text{ кг.}$

Маса усієї тари: $M_{\text{тари}} = 25,82 \text{ кг.}$

Маса тари, що нагрівається за 1 год:

$$M_m = \frac{1}{\tau_{\text{заг}}} \cdot M_{\text{тари}} = \frac{1}{0,71} \cdot 25,82 = 36,37 \text{ кг/год.}$$

Тепло, витрачене на нагрівання тари:

$$Q_m = 0,628 \cdot (900 - 20) \cdot 36,37 = 20099,52 \text{ кДж,}$$

Після обчислення усіх теплових складових формують загальне рівняння теплового балансу:

$$1,18(Q_{\text{мет}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{п.г.}} \cdot B + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{вік}}) = Q_{\text{н}}^p \cdot B + Q_{\text{рек}} \cdot B, \quad (2.26)$$

де $Q_{\text{рек}}$ – кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, кДж;

B – витрати палива, м^3 .

Обсяг тепла, яке через рекуператор надходить назад до печі, розраховують за такою формулою:

$$Q_{\text{рек}} = L_{\theta} i_0 = 10,40 \cdot 533 = 5543,20 \text{ кДж}, \quad (2.27)$$

Де L_{θ} – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці палива;

i_0 – тепловміст підігрітого повітря, кДж/ м^3 .

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрати палива знаходять шляхом використання рівняння теплового балансу:

$$B = \frac{1,18 \cdot (Q_{\text{мет}} + Q_{\text{Т}} + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{вік}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{рек}} - 1,18 Q_{\text{п.г.}}} \text{ м}^3, \quad (2.28)$$

$$B = \frac{1,18 \cdot (45835,92 + 20099,52 + 7879,92 + 7449,69)}{36829,30 + 5543,20 - 1,18 \cdot 14535,56} = 3,80 \text{ м}^3$$

Інші витрати:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ін}} + Q_{\text{мет}} + Q_{\text{Т}} + Q_{\text{п.г.}} B + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{вік}} &= Q_{\text{н}}^{\text{р}} B + Q_{\text{рек}} B, \\ Q_{\text{ін}} &= (Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{рек}}) \cdot B - Q_{\text{мет}} - Q_{\text{Т}} - Q_{\text{п.г.}} B - Q_{\text{пов}} - Q_{\text{вік}} \text{ кДж} \quad (2.29) \\ Q_{\text{ін}} &= Q_{\text{н}}^{\text{р}} B + Q_{\text{рек}} B - Q_{\text{мет}} - Q_{\text{Т}} - Q_{\text{п.г.}} B - Q_{\text{пов}} - Q_{\text{вік}} \\ &= 36829,30 \cdot 3,80 + 5543,20 \cdot 3,80 - 45835,92 - 20099,52 \\ &\quad - 14535,56 \cdot 3,80 - 7879,92 - 7449,69 = 24515,32 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Весь прихід тепла у піч:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} B + Q_{\text{рек}} B = 36829,30 \cdot 3,80 + 5543,20 \cdot 3,80 = 161015,50 \text{ кДж} - 100\%.$$

Горіння палива 139968,78 кДж – 86,93%

Тепло, яке повертається у піч через рекуператор 21046,72 кДж – 13,07%

Втрати з продуктами горіння 101071 кДж – 34,30%

Інші витрати 24515,32 кДж – 15,23%

Нагрів тари 20099,52 кДж – 12,48%

Нагрів металу 45835,92 кДж – 28,47%

Втрати через вікна 7449,69 кДж – 4,63%

Втрати через стіни, склепіння і черинь печі 7879,92 кДж – 4,89%

Коефіцієнт корисної дії печі:

$$\text{ККД} = \frac{45835,92}{139968,78} \cdot 100\% = 33\%$$

На рисунку 2.1 подано графічне відображення теплового балансу печі.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

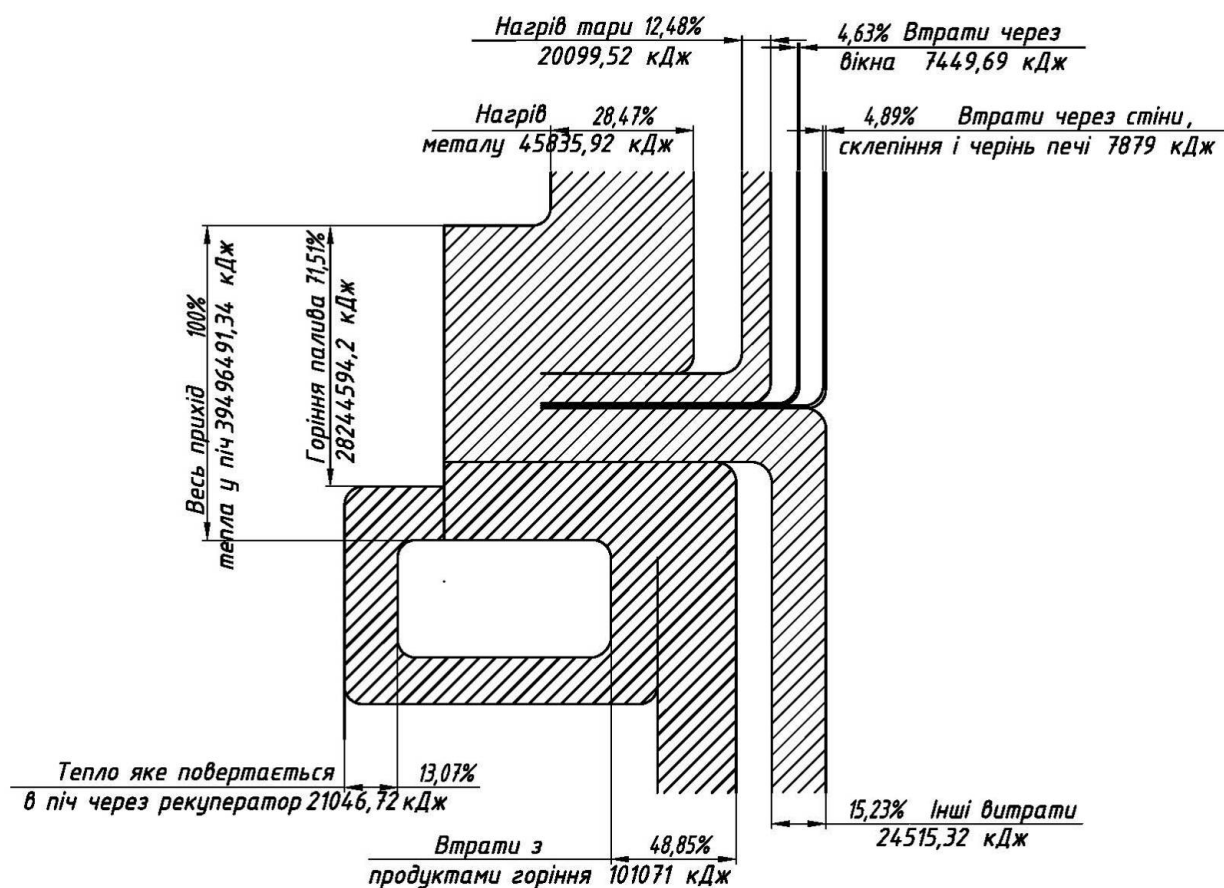


Рисунок 2.1 – Тепловий баланс печі

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі

Щоб визначити габарити робочої камери печі, потрібно встановити число виробів у садці. Садкою називають деталі, які одночасно поміщаються у піч.

Для початку визначаємо час нагріву заготовки у садці:

$$\tau_{\text{н.з.с.}} = \tau \cdot \alpha = 0,38 \cdot 1,4 = 0,53 \text{ год.}, \quad (3.1)$$

де τ – час нагріву заготовки, год.;

α – коефіцієнт, що враховує спосіб розташування заготовки в печі.

Додатковий час розраховуємо за формулою:

$$\tau_{\text{д}} = \frac{1}{3} \tau_{\text{н.з.с.}} = \frac{1}{3} \cdot 0,53 = 0,18 \text{ год.} \quad (3.2)$$

Обчислюємо загальний час садки:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{н.з.с.}} + \tau_{\text{д}} = 0,53 + 0,18 = 0,71 \text{ год.} \quad (3.3)$$

Таким чином, кількість деталей у садці розраховуємо за формулою:

$$N_{\text{с}} = \frac{N}{K_{\text{с}}}, \quad (3.4)$$

де N – програма випуску, шт.;

$K_{\text{с}}$ – кількість садок в рік.

Кількість садок в рік обчислюється за формулою:

$$K_{\text{с}} = \frac{\Phi_{\text{р.о.}} \cdot K_{\text{з}} \cdot n}{\tau_{\text{заг}}} = \frac{2015 \cdot 0,85 \cdot 1}{0,71} = 2412,32 \approx 2413, \quad (3.5)$$

де $\Phi_{\text{р.о.}}$ – фонд роботи обладнання в одну зміну, приймаємо 2015 год. при однозмінній роботі підприємства;

n – кількість робочих змін, $n = 1$;

$K_{\text{з}}$ – коефіцієнт завантаження обладнання $K_{\text{з}} = 0,85$.

$$N_{\text{с}} = \frac{N}{K_{\text{с}}} = \frac{500000}{2413} = 207,21 \text{ шт.}$$

Враховуючи розташування заготовок у садці, приймаємо $N_{\text{с}} = 208$ шт.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо співвідношення:

$$\frac{B}{L} = \frac{2}{3} = \frac{12}{18} = 0,67.$$

Довжина – 56, ширина – 56.

Ширина черені печі:

$$B_n = z_1 b + (z_1 + 1) \delta = 12 \cdot 56 + (12 + 1) \cdot 8 = 776 \text{ мм}, \quad (3.6)$$

де z_1 – кількість рядків;

l – довжина заготовки, мм;

δ – зазор між торцями заготовки, $\delta = 8$ мм.

Довжина черені (де проходить нагрів деталей):

$$L_n = z_2 l + (z_2 + 1) \delta = 18 \cdot 56 + (18 + 1) \cdot 8 = 1160 \text{ мм}, \quad (3.7)$$

де z_2 – кількість заготовок у рядку;

l – ширина заготовки, мм;

δ – зазор між торцями заготовки, мм.

$$\frac{B}{L} = \frac{776}{1160} = 0,67.$$

Зважаючи, що потрібно вживати тару, додаємо 200 мм (10 см) зазору до довжини та ширини черені.

З врахуванням розмірів цегли та швів маємо таку довжину та ширину (шов 3 мм). Ширина цегли: $230 + 3 = 233$ мм.

Отже, ширина:

$$B_n = \frac{776 + 200}{233} = \frac{976}{233} = 4,19;$$

$$B_n = 3 \cdot 233 + 130 = 1062 \text{ мм}. \quad (3.8)$$

Довжина:

$$L_{\text{заг}} = \frac{1160 + 200}{233} = \frac{1360}{233} = 5,84;$$

$$L_{\text{заг}} = 6 \cdot 233 - 3 = 1395 \text{ мм}.$$

(3.9)

Висота камера печі:

$$H = 1,2 B_n = 1,2 \cdot 1062 = 1274,4 \quad (3.10)$$

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При перерахунку на розміри цегли і швів, виходить:

$$H = (19 \cdot 68) - 3 = 1289 \quad (3.11)$$

На рисунку 3.1 показано розміри робочої камери печі.

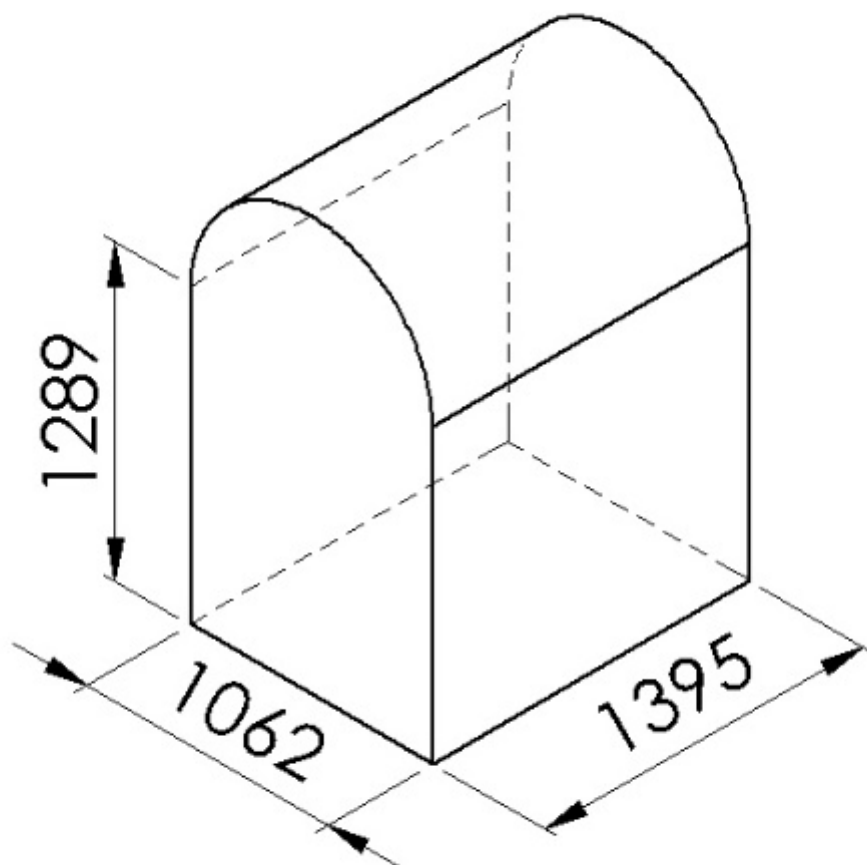


Рисунок 3.1

3.2. Вибір матеріалів для побудови печі

Підбір матеріалів для зведення печі здійснюється на підставі виконаних вище теплотехнічних розрахунків.

Стіни, склепіння та черинь формуються із двошарової конструкції, що включає вогнетривкий та теплоізоляційний шар (рисунк 3.2).

Для стінових конструкцій передбачено:

а) зовнішній шар (шар теплоізоляції) завтовшки 120 ... 250 мм, матеріал – трепелова або діатомітова цегла.

б) внутрішній шар (товщина кладки) завтовшки 230 ... 350 мм, виконаний із шамоту класу А;

Для склепіння:

а) зовнішній шар завтовшки 120 ... 150 мм, ізоляційна засипка.

б) внутрішній шар завтовшки 230 ... 350 мм, виконаний із шамоту класу А;

Вибір шамоту класу А для внутрішнього шару склепіння зумовлений висотою робочої камери $H = 1289$ мм (понад 1 м), що відповідає підвищеним вимогам щодо жаростійкості матеріалів. Шамот класу А витримує температуру до 1300°C , що забезпечує надійну роботу конструкції в умовах температур, що наближається до 950°C у робочому просторі печі.

Для забезпечення щільності кладки використовується рідкий шамотний розчин на основі мертелю марки МШ-36 або МШ-39 (товщина швів – до 0,5 мм). Склад розчину у об'ємних частках 60 ... 70% меленого шамоту класу А, 30 ... 40% вогнетривкої глини (каоліну), за потреби додається рідке скло у кількості до 5% від загальної маси. Витрата води на 1 м^3 сухої суміші становить 600 л.

Діатомітова (трепелова) цегла марки 700 характеризується такими показниками: густина – 700 кг/м^3 , коефіцієнт теплопровідності – $0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3}(T-273)\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, межа міцності на стиснення – 0,981 МПа, гранична температура застосування – 900°C .

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

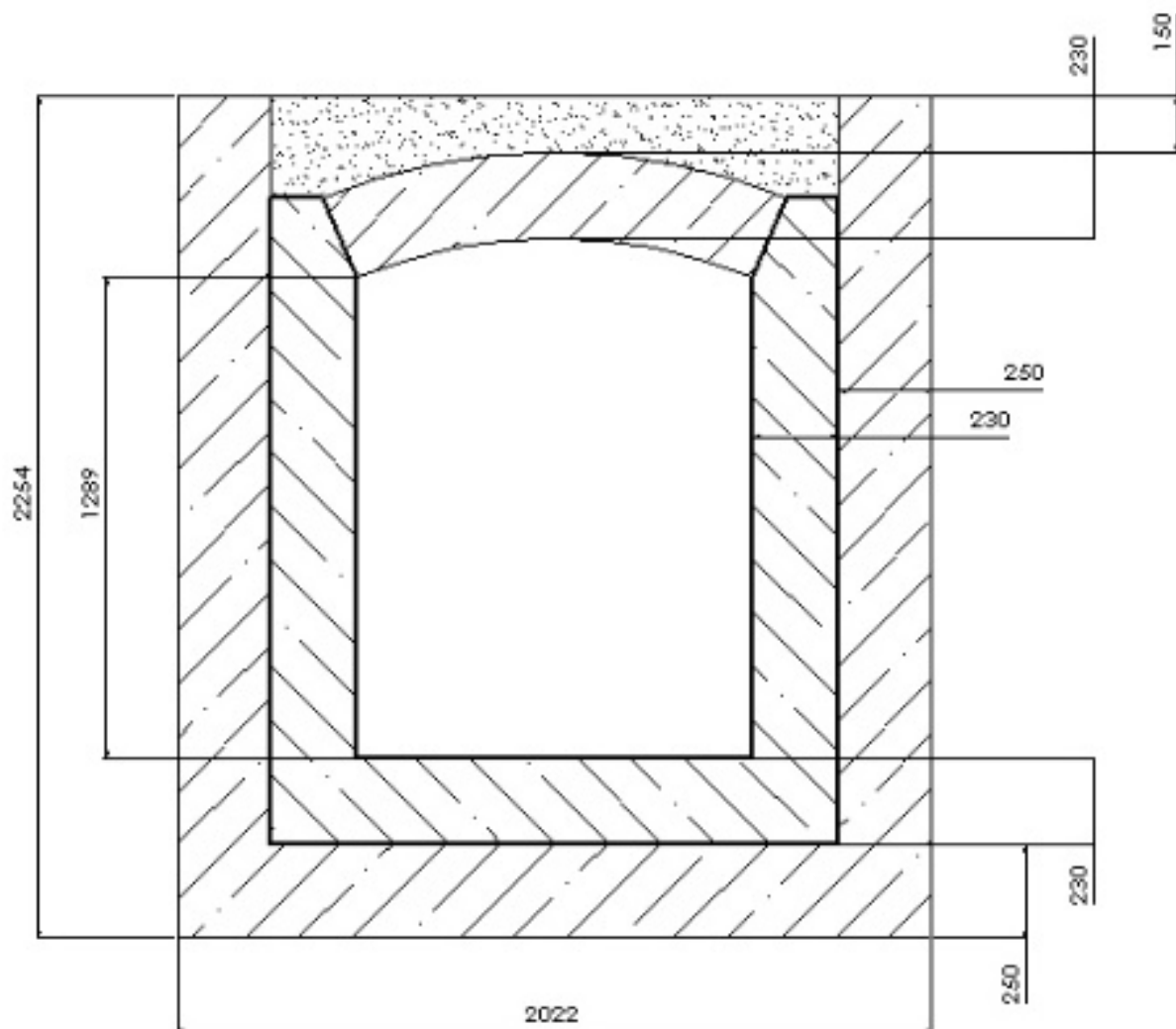


Рисунок 3.2 – Кладка стінок і склепіння печі

3.3. Конструкція елементів печі

3.3.1. Канали для відводу димових газів

Відведення димових газів здійснюється через канали, розміщені у бічних стінках завантажувального вікна (рисунок 3.3). У зоні склепіння ці канали об'єднуються, а на виході з печі монтується рекуператор. Подібне конструктивне рішення щодо розміщення димовідвідних каналів унеможливилює проникнення

холодного повітря з виробничого приміщення крізь зазори між вікном та його кришкою.

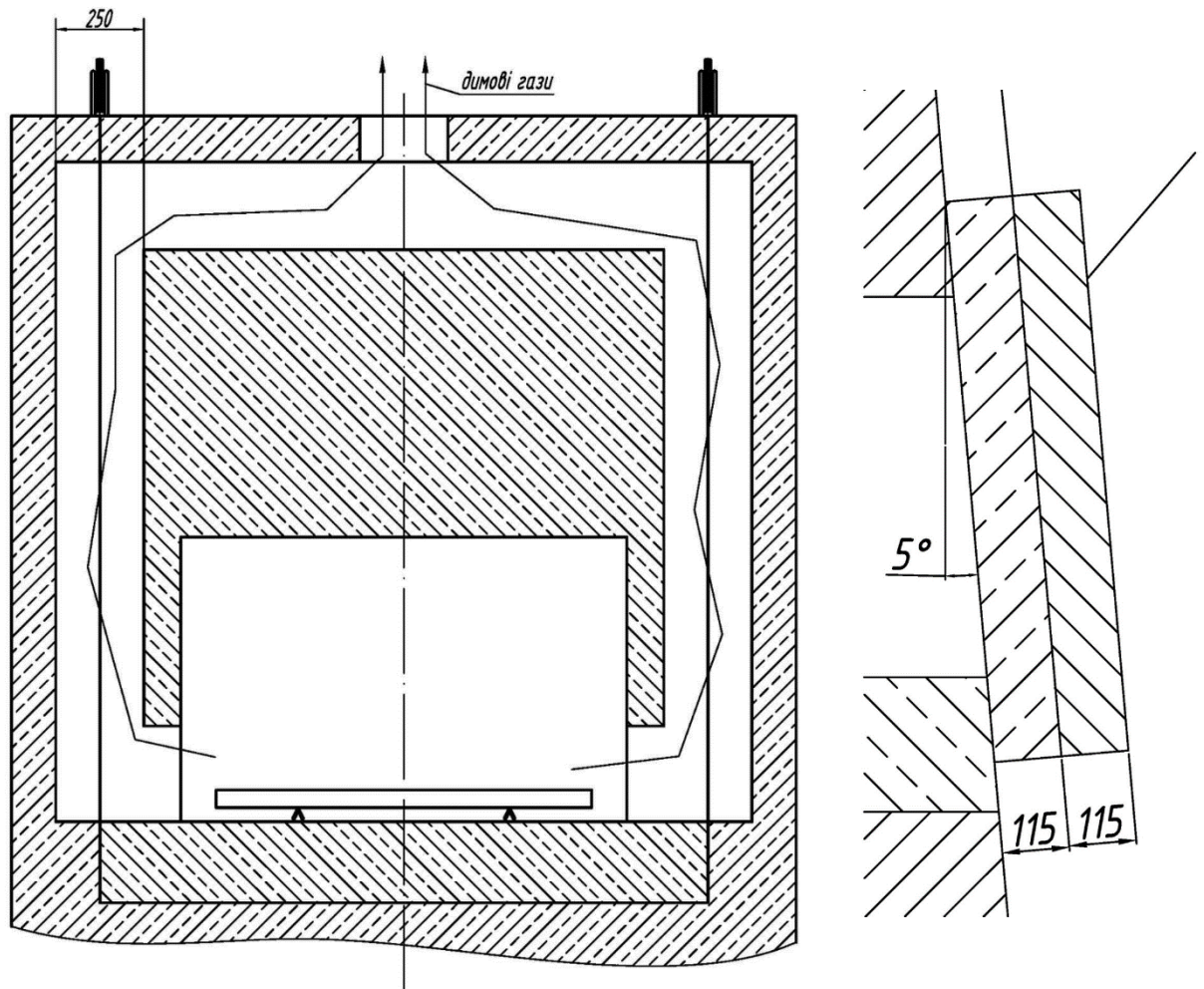


Рисунок 3.3 – Облаштування каналів для відводу димових газів

3.3.2. Вікно для завантаження і вивантаження деталей

Кришка завантажувально-вивантажувального вікна має двошарову конструкцію, що включає вогнетривкий та теплоізоляційний шари. Зовнішня поверхня кришки облицьовується сталевим листом і вкривається алюмінієвою фарбою. З метою забезпечення герметичного прилягання, вікно встановлюється під кутом 5° відносно вертикальної площини (рисунок 3.4). Підйом і опускання кришки здійснюється за допомогою тросово-роlikової системи, що приводиться в дію двома пневмоциліндрами.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для уловлювання димових газів, що виринає назовні в момент відкривання кришки, передбачено встановлення витяжного ковпака. Його виготовляють із листової сталі та підключають до загальної системи димовідведення.

3.4. Вибір горілок

Вибір горілок для спалювання газоподібного палива визначається сукупністю технологічних, експлуатаційних та економічних чинників. До них належить конструктивні особливості та продуктивність печі, температурний режим у робочому просторі, характеристики газу та його тиск, ефективність процесу згоряння, а також витрати на встановлення і зручність обслуговування обладнання. Під видом газу мають на увазі його склад, теплотворну здатність і рівень очищення.

Головною умовою правильного підбору горілок є орієнтація на наявний тиск газу з можливістю його використання без додаткового дроселювання.

У випадку використання неочищеного газу у великих печах застосовують прості типи горілок – головки з окремою подачею повітря і газу або спеціалізовані горілки для такого палива. При цьому в першому варіанті температура підігріву повітря практично не має обмежень, тоді як у другому її значення зазвичай знаходяться в межах 400 ... 500°C.

Якщо застосовується газ із невисокою теплотворною здатністю (4600 ... 5000 кДж/м³), для забезпечення високих температур у робочій камері печі (понад 1200°C) доцільно використовувати горілки із зовнішнім змішуванням. Їх особливістю є можливість безпечного підігріву як газу, так і повітря до високих температур.

Для ковальських печей середніх і малих розмірів, що працюють на газі з теплотворною здатністю понад 5000 кДж/м³ без використання теплоти відхідних газів, найчастіше застосовують інжекційні горілки. Практичний досвід їх

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації підтверджує ефективність таких горілок: вони відзначаються компактністю та стійкістю до механічних впливів, зокрема ударів молота.

Горілки із зовнішнім або внутрішнім змішуванням газу з повітрям також використовують у печах середнього та малого типу за умови підігріву повітря до 500 ... 600°C.

Кількість горілок визначається на стадії проектування печі. Збільшення їх кількості призводить до зменшення потужності окремої горілки та спрощення її конструкції. Це дозволяє гнучко регулювати тепловий режим шляхом відключення частини горілок. Водночас надмірна кількість горілок ускладнює його експлуатацію. Тому доцільно обирати оптимально мінімальну кількість горілок, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл температури в робочій камері печі.

Розміщення горілок виконується у шаховому порядку на протилежних сторонах бічних стін печі. При довжині $L=1,395$ м, у камерній печі встановлюється $N_2 = 2$ горілки.

Розрахунок продуктивності горілки виконують за такою формулою:

$$P_r = K_{з.г.} \cdot \frac{B}{N_r}, \quad (3.12)$$

де $K_{з.г.}$ - коефіцієнт запасу;

B – витрати палива;

N_2 – кількість горілок в печі.

Після підстановки необхідних значень у формулу (3.12) отримуємо:

$$P_r = 1,15 \cdot \frac{3,80}{2} = 2,2 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Вибираємо горілку ГПП - 1 (рисунок 3.4).

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

$P_2 = 5$ - продуктивність горілки, м³/год.;

$D_{газ} = 9$ - діаметр підводу газу, мм;

$D_{пов} = 34$ - діаметр підводу повітря, мм;

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$D_1 = 25$ - діаметр вихідного сопла горілки, мм;

$L = 95$ - довжина горілки, мм.

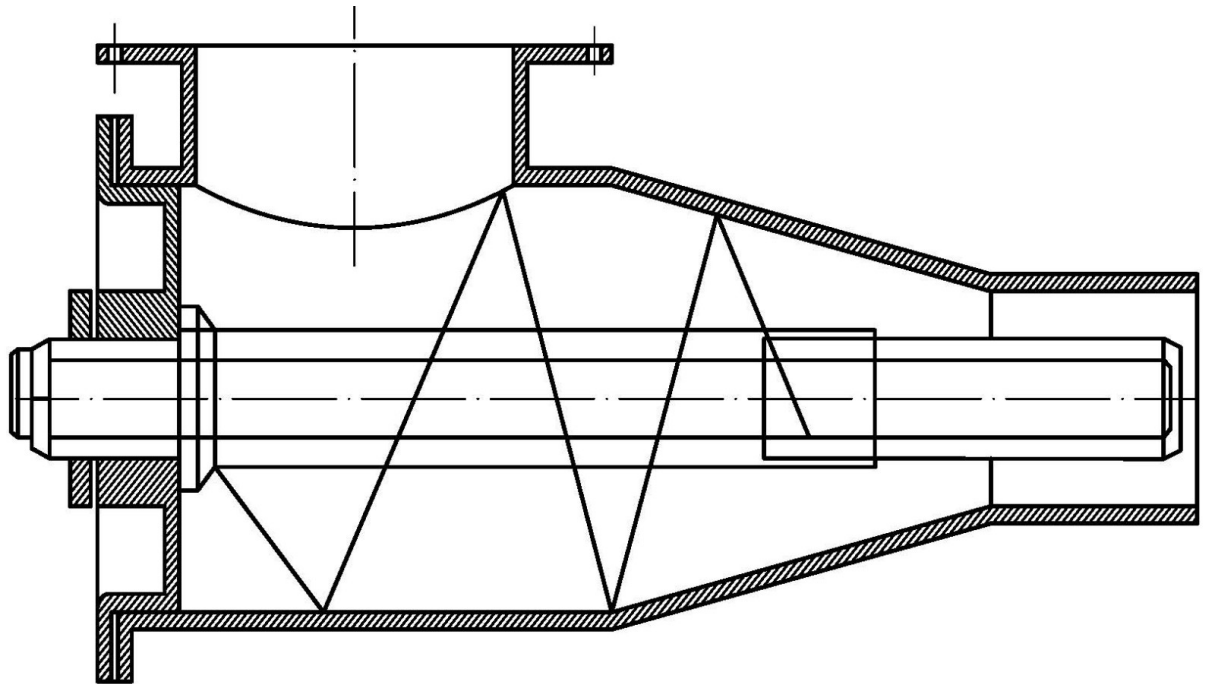


Рисунок 3.4 – Горілка ГПП - 1

3.5. Розрахунок рекуператорів

Під час проектування трубчастого рекуператора основним завданням розрахунків є знаходження ефективної площі поверхні нагрівання та інших параметрів, що визначають особливості конструкції.

Для виконання розрахунку рекуператора використовують такі вихідні формули:

Рівняння теплопередачі

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

Рівняння теплового балансу

$$V_d(i'_d - i''_d)\xi = V_n(i'_n - i''_n), \quad (3.14)$$

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

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²град;

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

F – поверхня нагріву рекуператора, м²;

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

V_∂ – витрати продуктів горіння, м³;

i'_∂ – початковий тепловміст диму, кДж/м³;

i''_∂ – кінцевий тепловміст диму, кДж/м³;

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

i'_∂ – початковий тепловміст повітря, кДж/м³;

i''_∂ – кінцевий тепловміст повітря, кДж/м³;

V_n – витрати повітря, м³.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі застосовують таку формулу:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\partial} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} = \frac{1}{\frac{1}{87} + \frac{0,002}{24,80} + \frac{1}{98,03}} = 46 \text{ Вт/м}^2\text{град}, \quad (3.15)$$

де α_∂ – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки, Вт/м²град;

S – товщина стінки, м;

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

α_n – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря або газу, Вт/м²град.

Коефіцієнт передачі тепла від димових газів до поверхні стінки:

$$\begin{aligned} \alpha_\partial^k &= (7,4 + 0,00924t_\partial) \frac{W_0^{0,65}}{d_0^{0,35}} = (7,4 + 0,00924 \cdot 725) \frac{2^{0,65}}{0,02^{0,35}} = \\ &= 87 \text{ Вт/м}^2\text{град}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де t_∂ – температура диму, °С;

W_0 – швидкість руху диму, м/с;

d_0 – діаметр труби, м.

Коефіцієнт передавання тепла від поверхні стінки до повітря:

$$\begin{aligned} \alpha_n^k &= (7,54 + 0,0058t_n) \frac{W_0^{0,65}}{d_0^{0,35}} = (7,54 + 0,0058 \cdot 210) \frac{5^{0,65}}{0,02^{0,35}} = \\ &= 98,03 \text{ Вт/м}^2\text{град}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

де t_∂ – температура повітря, °С;

W_0 – швидкість руху повітря, м/с.

Тепловміст димових газів у кінцевому стані:

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$i_{\partial}'' = i_{\partial}' - \frac{V_n}{V_{\partial\xi}} (i_n' - i_n'') = 1279,56 - \frac{9,9}{11,36 \cdot 0,5} (533,0 - 26,0) = 395,88 \text{ кДж/м}^3. \quad (3.18)$$

Середнє значення перепаду температур між продуктами згоряння та повітрям:

$$\Delta t_c = \frac{(t_{\partial}' - t_n') - (t_{\partial}'' - t_n'')}{\ln \frac{t_{\partial}' - t_n''}{t_{\partial}'' - t_n'}} = \frac{(850 - 20) - (600 - 400)}{\ln \frac{850 - 20}{600 - 400}} = 448,69 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.19)$$

Поверхня нагріву рекуператора:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_c} \cdot B = \frac{5019,30}{46 \cdot 448,69} \cdot 3,80 = 0,92 \text{ м}^2; \quad (3.20)$$

$$L_{\text{заг}} = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{0,92}{3,14 \cdot 0,02} = 14,65 \text{ м}. \quad (3.21)$$

Обчислюємо найменшу необхідну кількість трубок у рекуператорі:

$$k = 14,65 / 500 = 30;$$

Приймаємо 30 трубок довжиною 500мм з розташуванням 5×6. Відстань між трубками 20мм, відстань між стіною і трубкою 20мм. Схема коридорного пучка показана на рисунку 3.5.

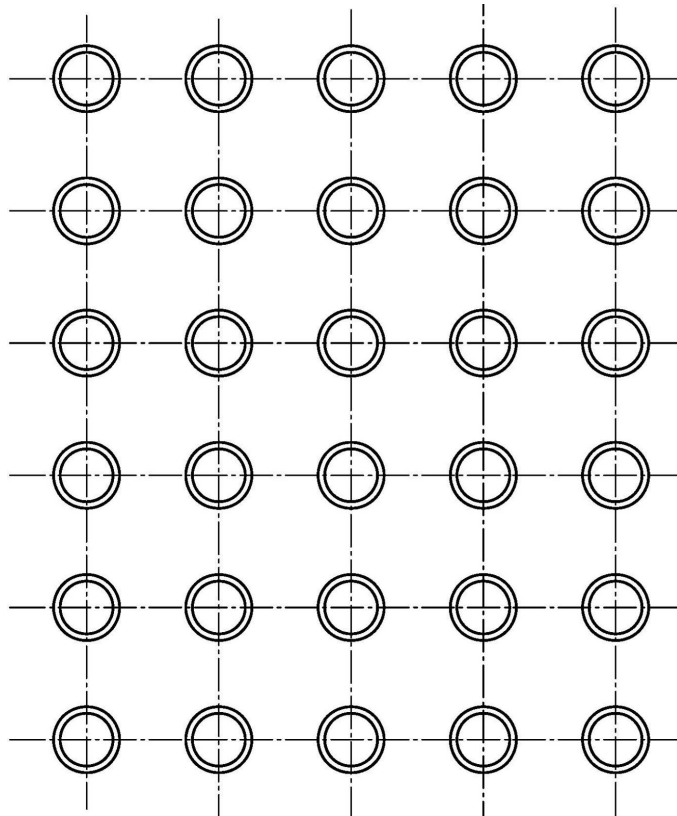


Рисунок 3.5 – Схема коридорного пучка

Конструкція рекуператора передбачає наявність двох колекторів для відведення димових газів та двох – для подачі повітря (рисунок 3.8). До колекторів повітряної системи приварюють фланці із внутрішнім діаметром 200 мм та зовнішнім 400 мм, які забезпечують приєднання до системи подавання повітря на горіння. Для виготовлення рекуператора використовується жаростійка високолегована сталь марки EN 1.4842 (10X18H18Ю4Д).

3.6. Тара для завантаження деталей в піч

Тару виготовляють із сталі EN 1.4842 (10X18H18ЮД). Її конструкція має форму прямокутного контуру з габаритними розмірами 776×1160мм (рисунок 3.6)

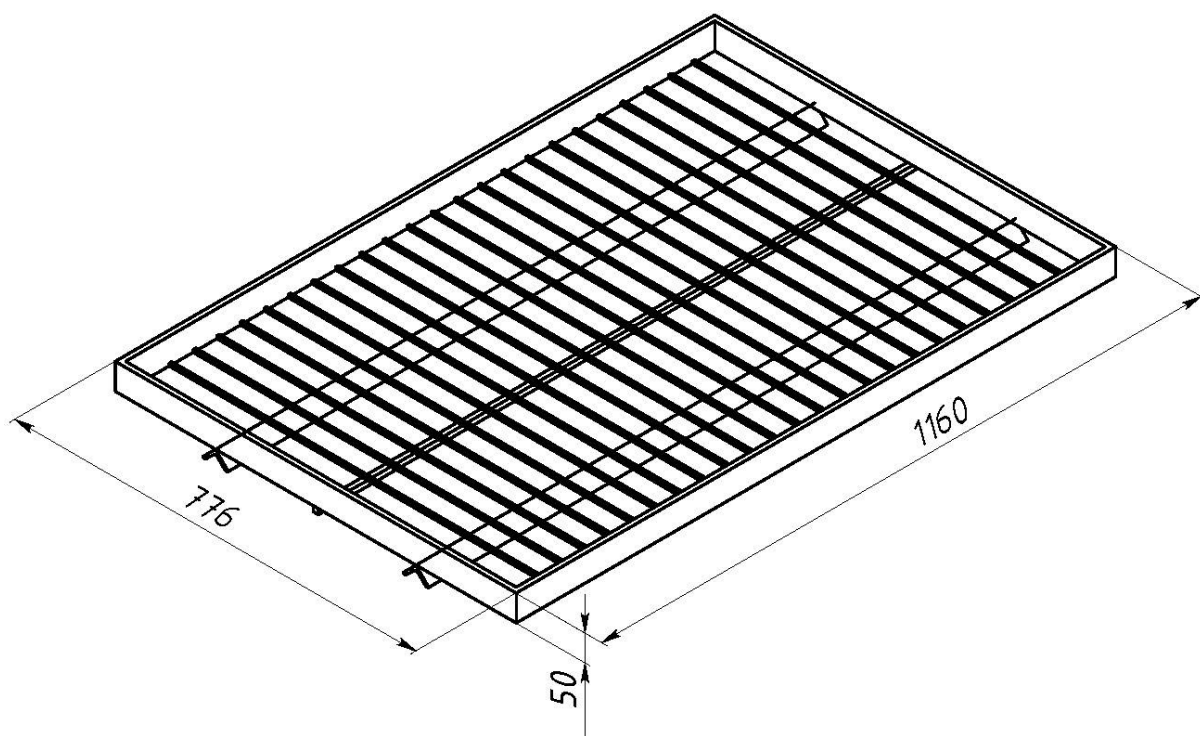


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд тари для завантаження деталей в піч

У нижній частині конструкції розташована зварна решітка, виготовлена з металевих прутів квадратного перерізу 10×10мм та 5×5мм. Для переміщення тари всередину печі її встановлюють на два кутники розміром 35×35×5мм. Відстань між прутами перерізом 5×5мм приймають із умови забезпечення опори деталі щонайменше на два пруту, у цьому випадку крок становить 46 мм.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі розроблено проект камерної полум'яної печі та технологічний процес термічної обробки деталі типу «втулка» зі сталі 45Х.

Проаналізовано конструкцію деталі та обґрунтовано режим термічної обробки.

Проведено розрахунок горіння газоподібного палива, у якому визначено теплотворність палива, необхідну кількість повітря для спалювання, а також об'єм і склад продуктів горіння. Розраховано тривалість нагріву металу у трьох температурних інтервалах з урахуванням структурних перетворень у сталі.

Складено тепловий баланс печі, який враховує витрати теплоти на нагрів металу, втрати з димовими газами, через стіни, склепіння та черинь печі, через вікна, а також на нагрів тари.

На основі проведених розрахунків визначено розміри робочої камери печі, підібрано матеріали для кладки та вибрано горілки для спалювання газоподібного палива. Для зниження витрат палива спроектовано трубчастий рекуператор, який повертає частину теплоти димових газів через підігрів повітря, що подається до печі.

Розроблена піч може застосовуватись на підприємствах машинобудівної галузі для термічної обробки деталей подібного типу. Використання природного газу як основного енергоносія є практичною перевагою особливо з огляду на сучасні умови енергоспоживання.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойченко Б. М. Теорія і технологія термічної обробки матеріалів: підручник. Київ : Основа, 2005. 512 с.

2. Термічна обробка : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спец. 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заоч. форм навч. / уклад. Н. П. Зайчук, Ю. П. Фещук. Луцьк : ЛНТУ, 2024. 96 с.

3. Термічна обробка : метод. Вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Матеріалознавство» та «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спец. 132 Матеріалознавство, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад. Н. П. Зайчук, Ю. П. Фещук. Луцьк : ЛНТУ, 2022. 74 с.

4. ДСТУ EN 10083-1:2017. Сталі для гартування і відпуску. Технічні умови постачання.

5. Устаткування процесів теплової обробки : метод. вказівки до викон. самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство» галузь знань 13 Механічна інженерія спец. 132 Матеріалознавство денної та заоч. форм навч. / уклад. С. В. Мисковець, Н. П. Зайчук. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 32 с.

6. Лисиця А. М. Промислові печі та теплотехнічні установки : навчальний посібник. Львів : Новий Світ-2000, 2018. 412 с.

7. ДСТУ 2439-94. Термічна обробка металів. Терміни та визначення.

8. Технології матеріалів : метод. вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм спец. 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заоч. форм навч. / уклад. Д. А. Гусачук, С. В. Мисковець. Луцьк : ЛНТУ, 2024 56 с.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Лахтін Ю. М. Термічна обробка металів і сплавів : навчальний посібник. Харків : Прапор, 2010. 368 с.

10. Марочник сталей і сплавів : довідник / за ред. В. Г. Сорокіна. Київ : Наукова думка, 2011. 850 с.

11. Куцова В. З., Коваленко І. В. Матеріалознавство : навчальний посібник. Дніпро : НМетАУ, 2017. 326 с.

12. Використання комп'ютерних технологій в матеріалознавстві : метод. вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Матеріалознавство» та «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спец. 132 Матеріалознавство галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад. С. В. Мисковець, Ю. П. Фещук. Луцьк : ЛНТУ, 2023. 20 с.

13. Технологія нагріву та нагрівальне обладнання : метод. вказівки до виконання самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Прикладна механіка» галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальності 131 Прикладна механіка денної та заоч. форм навч. / уклад. С. В. Мисковець, Н. П. Зайчук. – Луцьк : Луцький НТУ, 2019. – 44 с.

					БП 4526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		