

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»**

**Розробка технологічного процесу та обладнання
термічної обробки деталі опора/Development of
technological process and equipment for heat treatment
of support parts**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМс-31

Клімашевський Ілля Володимирович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Мисковець Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

Кашицький Віталій Павлович

(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: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03” січня 2026 року

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

Клімашевський Ілля Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка технологічного процесу та обладнання термічної обробки деталі опора/Development of technological process and equipment for heat treatment of support parts*

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 деталі, програма випуску N=1250000шт. склад природного газу: $CH_4=86\%$, $C_2H_6=7\%$, $C_3H_8=0,6\%$, $C_4H_{10}=0,7\%$, $N_2=5,2\%$, $O_2=0,3\%$*

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

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

1. Мета і задачі дипломної роботи - 1л. ф.А4, 2. Креслення деталі - 1л. ф.А4,

3.Хімічний склад природного газу і продуктів горіння палива-1л. ф.А4, 4. Креслення печі -

2л. ф.А4 5. Креслення горілки і рекуператора -1л. ф.А4, 6. Технологічний процес-1л. ф.А4,

7. Тепловий баланс печі - 1л. ф.А4, 8.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 Технічне обґрунтування</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, висновки</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти _____ *Клімашевський І.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Клімашевський Ілля Володимирович. Розробка технологічного процесу та обладнання термічної обробки деталі опора. Рукопис.

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

В даній роботі запропоновано вдосконалення технологічного процесу термічної обробки деталі опора.

Проведені технологічні розрахунки часу нагріву деталі опора для нормалізації.

Спроектовано необхідне технологічне обладнання для операції нормалізації.

Спроектовано і проведено необхідні розрахунки допоміжного оснащення: рекуператора та тари для деталей.

Робота складається з графічної частини та пояснювальної записки. Пояснювальна записка містить 40 сторінку формату А4, 7 рисунків, 4 таблиці та 13 літературних джерела. Графічна частина містить 9 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: опора, термічна обробка, нормалізація, цементация, паливо, тара, піч.

					БП 3526.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Клімашевський				Розробка технологічного процесу та обладнання термічної обробки деталі опора	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Мисковець						З	40
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМС-З		
Н. Контр.	Мисковець							
Затв.	Імдірович							

ANNOTATION

Klimashevsky Ilya Volodymyrovych. Development of a technological process and equipment for heat treatment of a support part. Manuscript.

Bachelor's qualification work of the OP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

This work proposes an improvement in the technological process for heat treatment of a support part.

Technological calculations of the heating time of the support part for normalization were carried out.

The necessary technological equipment for the normalization operation was designed.

The necessary calculations of auxiliary equipment were designed and carried out: a recuperator and containers for parts.

The work consists of a graphic part and an explanatory note. The explanatory note contains 40 pages of A4 format, 7 figures, 4 tables and 13 literary sources. The graphic part contains 9 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: support, heat treatment, normalization, cementation, fuel, container, furnace.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	8
1.1. Аналіз креслення деталі, технічних умов, визначення типу виробництва	8
1.2. Аналіз типового технологічного процесу термічної обробки.....	11
1.3. Вибір раціонального технологічного процесу	11
1.4. Мета і задачі дипломного проєкту	12
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	13
2.1. Розрахунок горіння палива.....	13
2.1.1. Теплотворення палива	13
2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива	13
2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання газоподібного палива..	14
2.2. Тривалість нагріву металу.....	16
2.3. Тепловий баланс печі.....	18
2.3.1. Нагрів металу.....	19
2.3.2. Втрати тепла з димовими газами.....	20
2.3.3. Витрати тепла через стіни, склепіння і під печі.....	20
2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі	22
2.3.5. Нагрів тари.....	23
2.3.6. Кількість тепла, що повертається через рекуператор	23
2.3.7. Розрахунок теплового балансу печі	23
2.4. Проєктний технологічний процес термічної обробки.....	25
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	28
3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі	28
3.2. Вибір матеріалів для побудови печі.....	31
3.3. Вибір горілок	32
3.4. Розрахунок рекуператора	32

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Тара для завантаження деталей у піч	37
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

При проведенні термічної обробки підвищується якість виробів або з'являються додаткові властивості, що забезпечують зменшення витрат металу в процесі експлуатації.

Нагрів сталі при термічній обробці проводиться у термічних печах. Термічні печі класифікують:

- за технологічними ознаками та призначенням (гартувальні, цементаційні, відпускні тощо);
- за способом нагріву (електричні, полум'яні, непрямого нагріву)
- за середовищем робочого простору (повітряне, газове, рідке);
- за конструкцією (камерні, ковпакові, печі-ванни);
- за режимом роботи (періодичної та безперервної дії);
- за ступенем механізації (механізовані і не механізовані).

У даному проєкті буде розроблено технологічний процес термічної обробки деталі опора виготовленої зі сталі 12Х2Н4А, та спроектовано камерну полум'яну піч для нормалізації.

При виконанні даного проєкту штучний інтелект не застосовувався

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

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

Деталь опора призначена для фіксації штока гідроциліндра підйомника тракторного причепа. Загальний вигляд деталі показано на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 – 3D модель деталі опора

Деталь виготовляється зі сталі 12Х2Н4А ДСТУ 7806:2015, котра широко застосовується для виготовлення таких деталей як зубчасті колеса, вали, ролики, поршневі пальці та інші великі особливо відповідальні цементовані деталі, до

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

яких пред'являються вимоги високої міцності, пластичності і в'язкості серцевини і поверхневої твердості, що працюють під дією ударних навантажень або при від'ємних температурах до мінус 120 °С [1].

Конструкційна сталь 12Х2Н4А належить до аустенітного класу, головною особливістю якого є відносно малий вміст вуглецю [2]. Легування сталей хромом, молібденом і ванадієм підвищує температури рекристалізації. Використовуються в загартованому, нормалізованому і високо відпущеному стані. Іноді загартування заміняють нормалізацією. В результаті цього утворюються пластинчасті продукти перетворення аустеніту, які забезпечують більш високу жароміцність. Межа повзучості цих сталей повинна забезпечити залишкову деформацію в межах 1% за час 10000...100000 годин роботи.

Основними легуючими елементами сталі 12Х2Н3А є хром та нікель. Хімічний склад сталі 12Х2Н4А зображений в таблиці 1.1 [3]:

Таблиця 1.1

Хімічний елемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Вміст, %	0,09 – 0,15	0,17 – 0,37	0,3 – 0,6	3,25 – 3,65	до 0,025	до 0,025	1,25 – 1,65	до 0,3

Не менш важливими є і фізичні властивості. Вони вказані у таблиці 1.2 для заданої марки сталі. До них відносять модуль пружності, коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт теплопровідності (теплоємність сталі) і густину.

Слід зауважити, що такі фізичні властивості як коефіцієнти лінійного розширення та теплоємність, і густина змінюють свої параметри із зміною температури.

Таблиця 1.2

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Модуль пружності $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Коефіцієнт лінійного розширення α , рад.	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м · град)	Густина ρ , кг/м ³
20	2	-	-	7840
100	-	11	25	7820
400	-	14,7	19	7710
600	-	15,6	-	7630

Із таблиці 1.2 видно, що із зростанням температури густина (щільність) та коефіцієнт теплопровідності сталі спадають, а значення коефіцієнта лінійного розширення навпаки зростає.

Переваги сталі 12Х2Н4А:

- висока твердість та зносостійкість поверхні;
- висока міцність і в'язкість серцевини;
- добра прогартовуваність;
- висока втомна міцність;

Недоліки сталі 12Х2Н4А:

- складність термічної обробки (багатство ступінчастий процес);
- менша корозійна стійкість у порівнянні з нержавіючими сталями.

Аналіз існуючого технологічного процесу

Отже сталь 12Х2Н4А – це високоякісна цементована конструкційна легрована сталь, яка підходить для виготовлення важко навантажених деталей, які вимагають високої поверхневої твердості і в'язкої серцевини.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Аналіз типового технологічного процесу термічної обробки

В загальному термічна обробка сталі 12Х2Н4А включає в себе декілька етапів:

- цементация: насичення поверхневого шару вуглецем за температури 900...950° С;
- нормалізація: для зняття внутрішніх напружень після цементації;
- гартування серцевини: нагрів до температури 860 ...880° С та охолодження в оливі;
- відпал: для підготовки до гартування поверхні;
- гартування поверхні: нагрів до температури 760...790° С і охолодження в оливі;
- низький відпуск: нагрів до температури 150...200° С для зняття напружень і підвищення в'язкості.

Слід відмітити що при роботі зі сталлю необхідно строго контролювати процес цементації. Дуже важливо забезпечити рівномірне насичення поверхні шаром вуглецю. Кожен етап термічної обробки цієї сталі має визначне значення для досягнення необхідних властивостей тому необхідно точне дотримання всіх режимів термічної обробки.

1.3. Вибір раціонального технологічного процесу

Виходячи з експлуатаційних вимог до деталі опора, вимог до високої твердості серцевини не виставляється, тому пропонується гартування серцевини і пов'язані з ним операції не проводити. Це дасть можливість заощадити кошти на її виготовлення.

Отже проектний технологічний процес матиме такий вигляд:

- цементация: насичення поверхневого шару вуглецем за температури 900...950° С;

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- нормалізація: для зняття внутрішніх напружень після цементації;
- гартування поверхні: нагрів до температури 760...790° С і охолодження в оливi;
- низький відпуск: нагрів до температури 150...200° С для зняття напружень і підвищення в'язкості.

1.4. Мета і задачі дипломного проєкту

Метою дипломного проєкту є розробити технологічний процес термічної обробки деталі опора та проєкт камерної полум'яної печі для нормалізації.

Відповідно для цього необхідно зробити таке:

- провести необхідні технологічні розрахунки горіння палива, тривалості нагрів металу;
- скласти тепловий баланс печі;
- розробити технологічний процес термічної обробки деталі опора;
- розробити проєкт камерної полум'яної пічі для нормалізації деталей опора.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок горіння палива

При розрахунку горіння палива визначають такі параметри:

- теплотворення палива;
- кількість повітря, яка йде на спалювання одиниці палива;
- кількість і склад утворених при спалюванні палива продуктів горіння [4].

2.1.1. Теплотворення палива

Теплотворення для газоподібного палива визначається за формулою:

$$Q_n^p = 127CO + 108H_2 + 234H_2S + 357CH_4 + \sum Q \frac{C_m H_n}{100},$$

де CO , H_2 і т. д. – відсотковий вміст відповідних компонентів в пальному.

Член $\sum Q \frac{C_m H_n}{100}$ виражає суму добутків теплоти згорання компонентів газу на їх процентний вміст в газі.

$$Q_n^p = 357 \cdot 86 + 635 \cdot 7 + 911 \cdot 0,6 + 1186 \cdot 0,7 = 36523,8 \text{ кДж/м}^3.$$

2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива

Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива для газоподібного палива:

$$L_0 = \alpha_n L_0,$$

де α_n – коефіцієнт витрат повітря, що рівний 1,05;

L_0 – теоретична кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$L_0 = 1,05 \cdot 9,82 = 10,31 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_o = 0,0476 \cdot [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum (m + \frac{n}{4})C_mH_n - O_2] \times \\ \times (1 + 0,00124 \cdot d_n) \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

де C^p, H^p, O^p, H_2 і т.д. – вміст відповідних компонентів у пальному, %;

d_n – волого вміст сухого повітря, г/м³.

Звичайно в розрахунках d_n приймається рівним 10 г/м³.

$$L_o = 0,0476 \cdot [2 \cdot 86 + (2 + \frac{6}{4}) \cdot 4 + (3 + \frac{8}{4}) \cdot 0,6 + (4 + \frac{10}{4}) \cdot 0,7 - 0,3] \times \\ \times (1 + 0,00124 \cdot 10) = 9,82 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання газоподібного палива

Кількість продуктів спалювання газоподібного палива:

вміст вуглекислого газу:

$$V_{CO_2} = (CO_2 + CH_4 + \sum mC_mH_n) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

де CO_2, CH_4 – вміст вуглекислого газу та метану, %;

C_mH_n – добуток згорання компонентів газу.

$$V_{CO_2} = (0,2 + 86 + (2 \cdot 7) + (3 \cdot 0,6) + (4 \cdot 0,7)) \cdot 0,01 = 1,048 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

вміст води:

$$V_{H_2O} = \left(2CH_4 + \sum \frac{n}{2}C_mH_n + H_2O + 0,124L_o d_n \right) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

де CH_4 – відсотковий вміст метану, %;

H_2O – відсотковий вміст води, %;

L_o – кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива для газоподібного палива, м³/м³;

d_n – волого вміст сухого повітря, г/м³.

$$V_{H_2O} = (2 \cdot 86 + (3 \cdot 7) + (4 \cdot 0,6) + (5 \cdot 0,7) + 0,124 \cdot 10,31 \cdot 10) \cdot 0,01 = 2,11 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

вміст кисню:

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha_n - 1)L_0 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

де α_n – коефіцієнт витрат повітря, що рівний 1,05;

L_0 – теоретична кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,05 - 1) \cdot 10,31 = 0,1031 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

вміст азоту:

$$V_{N_2} = (N_2 + 79 \cdot L_0) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

N_2 – відсотковий вміст азоту, %;

L_0 – кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива для газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$V_{N_2} = (5,2 + 79 \cdot 10,31) \cdot 0,01 = 8,19 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Сумарний об'єм продуктів горіння:

$$V_0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$V_0 = 1,048 + 2,11 + 0,1031 + 8,19 = 11,45 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Відсотковий вміст продуктів горіння:

вуглекислого газу:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_0} \cdot 100 \% = \frac{1,48}{11,45} \cdot 100 \% = 9,15 \%,$$

де V_{CO_2} – вміст вуглекислого газу у паливі, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

V_0 – сумарний об'єм продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

води:

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_0} \cdot 100 \% = \frac{2,11}{11,45} \cdot 100 \% = 18,42 \%,$$

де V_{H_2O} – вміст води у паливі, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

V_0 – сумарний об'єм продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

КИСНЮ:

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_o} \cdot 100 \% = \frac{0,1031}{11,45} \cdot 100 \% = 0,9 \%,$$

де V_{O_2} – вміст кисню у паливі, м³/м³;

V_o – сумарний об'єм продуктів горіння, м³/м³.

азоту:

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_o} \cdot 100 \% = \frac{8,19}{11,45} \cdot 100 \% = 71,52 \%,$$

де V_{N_2} – вміст азоту у паливі, м³/м³;

V_o – сумарний об'єм продуктів горіння, м³/м³.

2.2. Тривалість нагріву металу

Час нагріву деталі за температурою розіб'ємо на три інтервали:

I – 20...600 °С, II – 600...800 °С, III – 800...890 °С [4].

Тривалість нагріву визначимо за формулою:

$$\tau = \frac{S \rho C_p}{k_1 \alpha} \ln \frac{t_{печ} - t_n}{t_{печ} - t_k},$$

де S – розрахункова товщина тіла, що нагрівається (половина товщини при двохсторонньому нагріві);

k_1 – коефіцієнт форми, який для циліндра дорівнює 2;

ρ – щільність, кг/м³;

C_p – середня теплоємність, Дж/кг·град;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·град;

$t_{печ}$ – температура печі, °С;

t_n – початкова температура тіла, °С;

t_k – кінцева температура тіла, °С.

Для першого інтервалу температур 20...600°С тривалість нагріву рівна:

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau_1 = \frac{7,8 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,568 \cdot 10^3}{2 \cdot 158,435} \cdot \ln \frac{1000 - 20}{1000 - 600} = 314,8 \text{ с} = 5,247 \text{ хв.} = 0,0874 \text{ год.}$$

Розрахунки другого і третього інтервалів занесені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Температурний інтервал	Тривалість нагріву металу τ , год.	Середня теплоємність $C_{pt_n}^{t_k}$, кДж/кг · град	Коефіцієнт тепловіддачі α^* , Вт/м ² · град.
I (20...600°C)	0,0874	0,568	108,76
II (600...800°C)	0,0769	0,963	208,11
III (800...890°C)	0,0631	1,084	294,77

Середня теплоємність в інтервалі температур:

$$C_{pt_n}^{t_k} = \frac{i_0^{t_k} - i_0^{t_n}}{t_k - t_n},$$

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

Для першого інтервалу температур 20...600°C середня теплоємність рівна:

$$C_{pt_1}^{t_k} = \frac{(339,1 - 9,3) \cdot 10^3}{600 - 20} = 0,568 \text{ кДж/кг · град.}$$

Розрахунки другого і третього інтервалів занесені в таблицю 3.1.

Коефіцієнт тепловіддачі:

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

де $t_{nec}(T_{nec})$ – температура печі, °C(°K);

$t_n(T_n)$ – температура поверхні, °C(°K);

$\sigma_{nec} = \varepsilon \sigma_0$ - приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м² · °K⁴;

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

ε – степінь чорноти.

$$\alpha_1^* = 4,07 \frac{\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4}{1000 - 20} = 108,76 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

Розрахунки другого і третього інтервалів (α_2^* та α_3^*) занесені в таблицю 3.1

Коефіцієнт тепловіддачі для інтервалу температур 800...1000°С рівний:

$$\alpha_3^* = 4,07 \frac{\left(\frac{1273}{100}\right)^4 - \left(\frac{1073}{100}\right)^4}{1000 - 800} = 264,66 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

Середнє значення коефіцієнту тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{\alpha_n + \alpha_k}{2},$$

$$\alpha_1 = \frac{108,76 + 208,11}{2} = 158,435 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.},$$

$$\alpha_2 = \frac{208,11 + 264,66}{2} = 236,385 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.},$$

$$\alpha_3 = \frac{264,66 + 294,77}{2} = 279,715 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

Загальний час нагріву:

$$\tau = 314,8 + 276,7 + 227,05 = 818,55 \text{ с} = 13,64 \text{ хв.} = 0,2274 \text{ год.}$$

2.3. Тепловий баланс печі.

При роботі печі йде постійна передача тепла від тіл з більшою температурою до тіл з меншою температурою.

При складанні теплового балансу печі, враховують усі джерела надходження і витрати тепла у печі.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До прибуткової частини теплового балансу відносять тепло, яке отримане від спалювання газоподібного палива та тепла яке буде повернуте через рекуператор у піч.

До видаткової частини балансу відносять такі статті витрат:

- нагрів металу;
- нагрів тари;
- втрати тепла з продуктами горіння;
- втрати тепла через склепіння стіни та черинь печі;
- втрати тепла через відкриті вікна печі.

2.3.1. Нагрів металу

Тепло, витрачене на нагрів металу, тобто деталей, що піддаються термічній обробці, – це єдина корисна складова балансу. Кількість тепла на нагрівання металу визначається за формулою

$$Q_{мет} = (i_k - i_n) \Pi,$$

де Π – продуктивність печі, кг/год;

i_k, i_n – кінцевий і початковий тепловміст металу, кДж/м³.

$$Q_{мет} = (629,3 - 9,3) \cdot 429 = 265980 \text{ кДж}.$$

Продуктивність печі:

$$\Pi = \frac{N_c \cdot m_d}{\tau_{заг}},$$

де m_d – маса деталі, що рівна 0,812 кг;

N_c – кількість деталей у садці, шт;

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

$$\Pi = \frac{224 \cdot 0,812}{0,424} = 428,98 \text{ кг/год}.$$

Приймаємо $\Pi = 429$ кг/год.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.2. Втрати тепла з димовими газами

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

$$Q_{n.g.} = i_{n.g.} \cdot V_{n.g.}$$

де $V_{n.g.}$ – об'єм продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$i_{n.g.}$ – сумарний тепловміст продуктів горіння при температурі 900°C , $\text{кДж}/\text{м}^3$.

$$Q_{n.g.} = 1365,4 \cdot 11,45 = 15634,97 \text{ кДж}.$$

$$i_{n.g.} = \frac{i_{CO_2} \cdot CO_2 + i_{H_2O} \cdot H_2O + i_{O_2} \cdot O_2 + i_{N_2} \cdot N_2}{100\%},$$

де i_{CO_2} – тепловміст вуглекислого газу, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

CO_2 – відсотковий вміст вуглекислого газу, %;

i_{H_2O} – тепловміст води, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

H_2O – відсотковий вміст води, %;

i_{O_2} – тепловміст кисню, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

O_2 – відсотковий вміст кисню, %;

i_{N_2} – тепловміст азоту, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

N_2 – відсотковий вміст азоту, %.

2.3.3. Витрати тепла через стіни, склепіння і під печі

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

Кількість тепла, що витрачається стінами печі вогнетривкого шару можна визначити за формулою [4]:

$$Q_{ст.в} = k_{ст} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F,$$

де $k_{ст}$ – коефіцієнт теплопередачі шамотної цегли, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

t_1 – температура в печі, 1200 °С;

t_2 – температура на межі вогнетривкого і теплоізоляційного шару, 230 °С;

F – площа стінок печі, 1,26 м².

$$k_{ui} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 1,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)},$$

$$Q_{cm.г} = 1,2 \cdot (1000 - 210) \cdot 12,78 = 12115,44 \text{ кДж.}$$

Кількість тепла, що витрачається стінами печі теплоізоляційного шару можна визначити за формулою:

$$Q_{cm.m.iz.} = k_o \cdot (t_3 - t_4) \cdot F,$$

де k_o – коефіцієнт теплопередачі діатомітової цегли, Вт/(м·°С);

t_3 – температура на межі внутрішнього і теплоізоляційного шару, 210 °С;

t_4 – температура зовнішніх стінок печі 60 °С.

$$Q_{cm.m.iz.} = 0,294 \cdot (210 - 60) \cdot 12,78 = 563,59 \text{ кДж,}$$

$$k_o = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot 210 = 0,294 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

Кількість тепла, що витрачається склепінням печі внутрішнього шару можна визначити за формулою:

$$Q_{ск.г} = k_{ui} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F,$$

де k_{ui} – коефіцієнт теплопередачі шамотної цегли, Вт/(м·°С);

t_1 – температура в печі, 1200 °С;

t_2 – температура на межі вогнетривкого і теплоізоляційного шару, 230 °С;

F – площа внутрішнього шару, 1,8 м².

$$Q_{ск.г} = 1,2(1000 - 210) \cdot 1,8 = 1706,4 \text{ кДж.}$$

Кількість тепла, що витрачається теплоізоляційним шаром можна визначити за формулою:

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{ск.т.і} = k_{із.з.вулк.} \cdot (t_3 - t_4) \cdot F,$$

де $k_{із.з.вулк.}$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційного шару, Вт/(м·°С);

t_3 – температура на межі внутрішнього і теплоізоляційного шару, 210 °С;

t_4 – температура зовнішніх стінок печі 60 °С.

F – площа теплоізоляційного шару, 1.8 м².

$$k_{із.з.вулк.} = 0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3} \cdot 210 = 0.117 \text{ Вт/(м·°С)},$$

$$Q_{ск.т.і} = 0,117 \cdot (210 - 60) \cdot 1,8 = 31,59 \text{ кДж.}$$

Загальні витрати тепла через стіни:

$$Q_{заг} = Q_{ст.в} + Q_{ст.т.із} + Q_{ск.в} + Q_{ск.т.із},$$

$$Q_{заг} = 12115,44 + 563,59 + 1706,4 + 31,59 = 14417,21 \text{ кДж.}$$

2.3.4. Втрати теплоти через вікна печі

У момент відкриття завантажувального та розвантажувального вікон печі з камери нагрівання за рахунок випромінювання витрачається тепло. Кількість тепла можна визначити за формулою [4]:

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

де $F_{вік}$ – площа відкритого вікна, 1,32 м²;

φ – коефіцієнт діафрагмування, що залежить від конфігурації вікна і товщини стіни, 0,55;

τ – частка часу протягом години, коли вікно відкрите, 0,25 год;

T_n – температура в печі, 1273К.

$$Q_{вік} = 5,7 \cdot 1,32 \cdot 0,55 \cdot 0,25 \cdot 26261,14 = 27168,46 \text{ кДж.}$$

$$F_{вік} = \frac{1}{3} H \cdot B, \text{ м}^2,$$

де H – висота камери печі, м;

B – ширина камери печі, м.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\text{вк}} = \frac{1}{3} \cdot 1,6698 \cdot 1,128 = 1,32 \text{ м}^2.$$

2.3.5. Нагрів тари

Тепло витрачене на нагрів тари, – небажана складова балансу. Чим важча тара, тим менше к.к.д. печі. Тара – піддони і пристосування для розміщення деталей на піддоні. Кількість тепла на нагрівання тари за 1 год. визначається по формулі:

$$Q_m = C_m (t_m^k - t_m^n) G_m,$$

де C_m – теплоємність матеріалу тари, кДж/(кг · °С);

t_m^k, t_m^n – кінцева і початкова температура тари, °С;

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

$$Q_m = 0,628 \cdot (1000 - 20) \cdot 56,6 = 34833,9 \text{ кДж}.$$

2.3.6. Кількість тепла, що повертається через рекуператор

Кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, визначається за формулою:

$$Q_{\text{рек}} = L_{\text{д}} i_0,$$

де $L_{\text{д}}$ – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці палива, 10,31 м³/м³;

i_0 – тепловміст підігрітого повітря, 395,7 кДж/м³.

$$Q_{\text{рек}} = 10,31 \cdot 395,7 = 4079,67 \text{ кДж}.$$

2.3.7. Розрахунок теплового балансу печі

Після визначення всіх статей складаємо рівняння теплового балансу:

$$(Q_{\text{мет}} + Q_m + Q_{\text{п.г.}} B + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{вк}} + Q_{\text{ін}}) = Q_{\text{н}}^p B + Q_{\text{рек}} B,$$

$$B = \frac{(Q_{\text{мет}} + Q_m + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{вк}})}{\frac{Q_{\text{ін}} + Q_{\text{рек}}}{1,18} - Q_{\text{п.г.}}},$$

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де B – витрати палива, м^3 ;

$Q_{\text{мет}}$ – тепло що йде на нагрів металу, кДж;

Q_t – тепло що йде на нагрів тари, кДж;

$Q_{\text{нов}}$ – втрати тепла через стіни, склепіння і черинь печі, кДж;

$Q_{\text{вік}}$ – втрати тепла через вікна, кДж;

$Q_{\text{рек}}$ – тепло яке повертається в піч через рекуператор, кДж;

$Q_{\text{п.г.}}$ – втрати тепла з продуктами горіння, кДж;

$Q_{\text{ін}}$ – інші витрати тепла, кДж.

$$B = \frac{(265980 + 34833,9 + 12115,44 + 27168,46)}{\frac{36523,8 + 4079,67}{1,18} - 15634,97} = 18,1 \text{ м}^3.$$

Прибуткові статті балансу.

Горіння палива (Q_n^p) – 89,9% (661243,7 кДж);

Тепло рекуператора ($Q_{\text{рек}}$) – 10,1% (77920,36 кДж);

Весь прихід тепла у піч – 100% (739164 кДж)

Видаткові статті балансу.

Втрати з продуктами горіння ($Q_{\text{п.г.}}$) – 38,5% (282956,8 кДж);

Інші витрати ($Q_{\text{ін}}$) – 14,9 % (109566,5 кДж);

Нагрів тари (Q_t) – 4,7 % (34 833,9 кДж);

Нагрів металу ($Q_{\text{мет}}$) – 36,2 % (265 980 кДж);

Втрати через вікна ($Q_{\text{вік}}$) – 3,7 % (27 168,46 кДж);

Втрати через стіни, склепіння і черинь печі ($Q_{\text{нов}}$) – 1,9 % (14 417,21 кДж).

Тепловий баланс зображено на рисунку 2.1

Визначимо термічний ККД печі η_t за формулою:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{прих.}}} \cdot 100\%,$$

де $Q_{\text{м}}$ – корисно використане тепло;

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$Q_{\text{прих}}$ – відноситься до всього приходу тепла в печі.

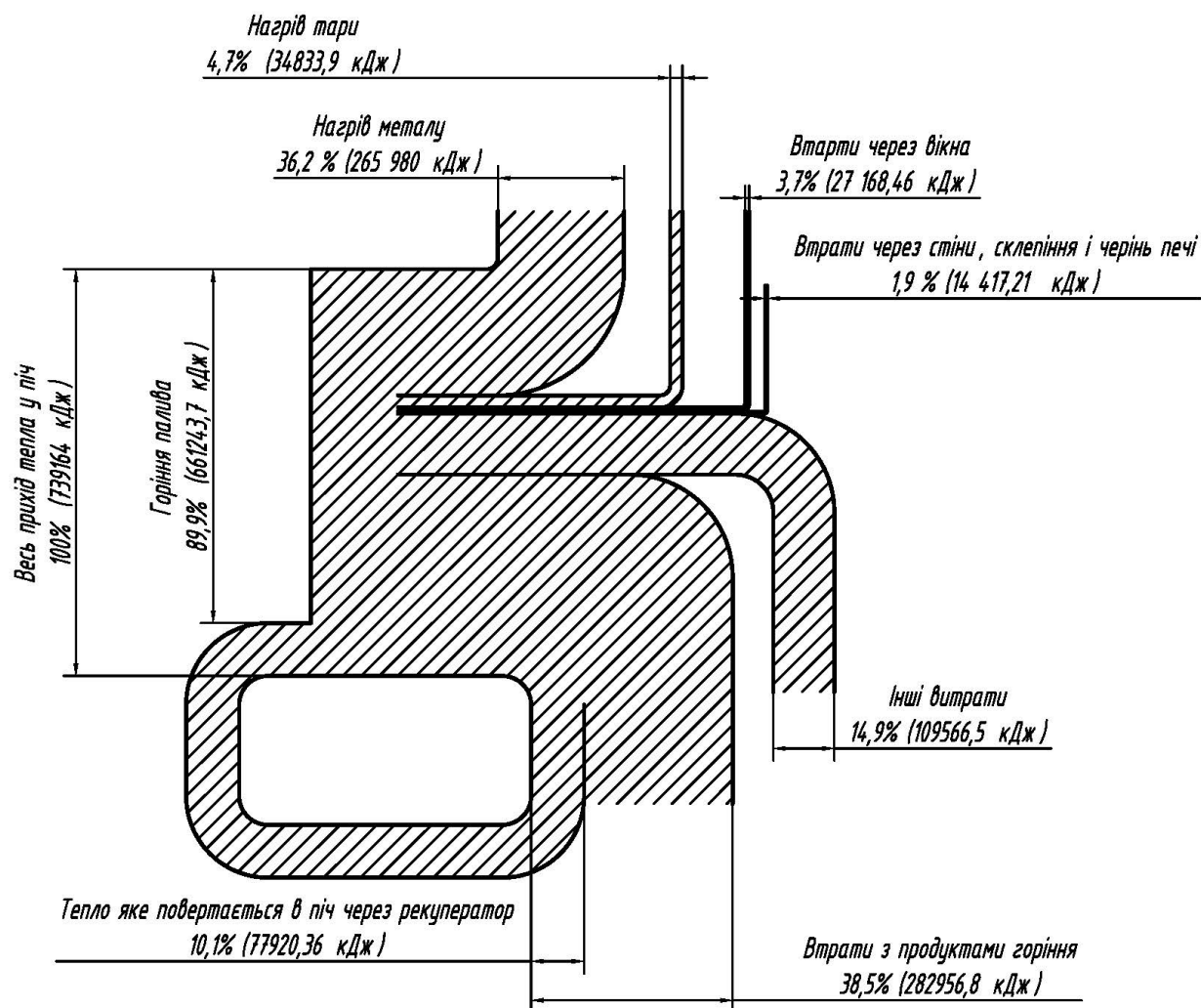


Рисунок 2.1

Отже:

$$\eta_m = \frac{265980}{739164} \cdot 100\% = 36,2\%$$

2.4. Проектний технологічний процес термічної обробки

Проектний технологічний процес термічної обробки деталі опора зі сталі 12X2H4A представлений у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Структура технологічного процесу термічної обробки деталі
опора

Назва операції	Зміст операції	Обладнання, інструменти, витратні матеріали
005 Цементацийна	Нагріти деталі до температури 900...950° С, витримати за даної температури в середовищі ендоегазу протягом 9 год.	Цементацийна піч, тара, ендоегаз (CO – 20 %, H ₂ – 40 %, N ₂ – 40 %)
010 Нормалізаційна	Нагріти деталі до температури 890° С, час нагріву – 19,2 хв. час витримки – 5 хв. Охолодити деталі на повітрі.	Піч камерна полум'яна БП 3526.00.000 СК, тара БП 3526.03.000 СК
015 Гартувальна	Нагріти деталі до температури 760...790° С, час нагріву – 17,3 хв. Охолодити в оливі.	Піч гартувальна. Олива I-20A ISO VG 32
020 Відпускна	Нагріти до температури 150...200° С. Охолодити на повітрі.	Піч відпускна
025 Контрольна	Контролювати розміри і твердість 2% від партії	Твердомір ТШ– 2М, штангенциркуль ДСТУ EN ISO 13385-1:2018, мікроскоп.

Графік термічної обробки представлено на рисунку 2.2.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

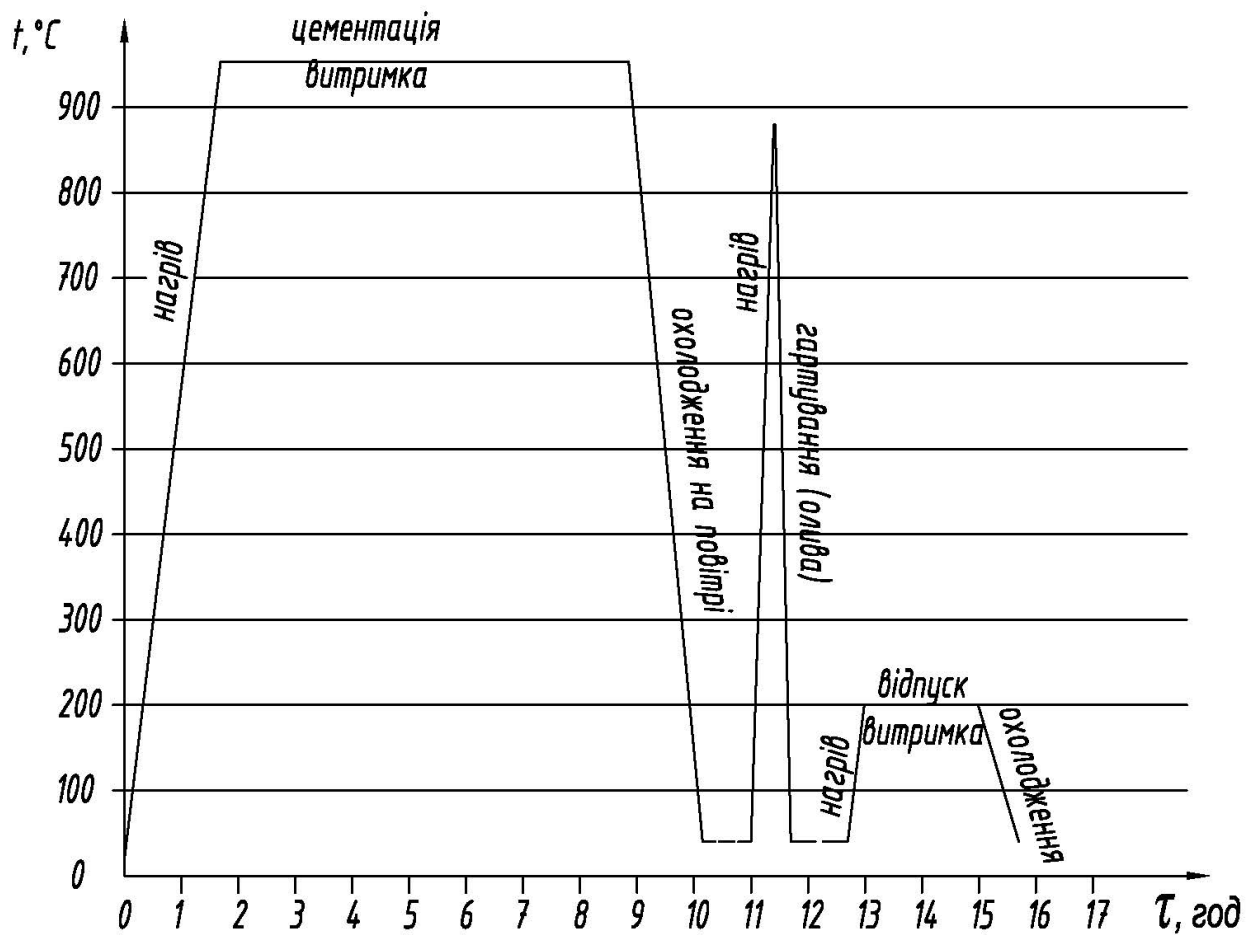


Рисунок 2.2 – Графік термічної обробки деталі опора зі сталі 12Х2Н4А

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі

Для визначення розмірів робочої камери печі необхідно знайти кількість деталей у садці [4]:

$$N_c = \frac{N}{K_c} \text{ шт.},$$

де N – програма випуску, що рівна 850 шт;

K_c – кількість садок в рік.

$$N_c = \frac{850}{3798,04} = 223,79.$$

Приймаємо $N_c = 224$ шт.

Кількість садок в рік визначається за формулою:

$$K_c = \frac{\Phi_{P.O.} \cdot K_z \cdot n}{\tau_{заг}},$$

де $\Phi_{P.O.}$ – фонд роботи обладнання в одну зміну, 2015 год;

n – кількість робочих змін, що рівна 1;

K_z – коефіцієнт завантаження обладнання, що рівний 0,8;

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

$$K_c = \frac{2015 \cdot 0,8 \cdot 1}{0,42443} = 3798,04 \text{ шт.}$$

Визначаємо загальний час садки:

$$\tau_{заг} = \tau_{н.з.с.} + \tau_{\partial},$$

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

τ_{∂} – додатковий час, год.

$$\tau_{заг.} = 0,318325 + 0,106108 = 0,424443 \text{ год.},$$

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатковий час:

$$\tau_o = \frac{1}{3} \cdot \tau_{н.з.с.},$$

$$\tau_o = \frac{1}{3} \cdot 0,318325 = 0,106108 \text{ год.}$$

Час нагріву заготовки у садці:

$$\tau_{н.з.с.} = \tau \cdot \alpha,$$

де τ – час нагріву заготовки, год;

α – коефіцієнт, що враховує спосіб розташування заготовки в печі, приймаємо його рівним 2.2 [4].

$$\tau_{н.з.с.} = 0,227375 \cdot 1,4 = 0,318325 \text{ год.}$$

Ширина черіні печі:

$$B_n = z_1 \cdot l + (z_1 + 1) \cdot \delta,$$

де z_2 – кількість заготовок у рядку 23;

b – ширина заготовки, 36 мм;

δ – зазор між торцями заготовки 12,5 мм.

$$B_n = 23 \cdot 36 + (23 + 1) \cdot 12,5 = 1128 \text{ мм} = 1,128 \text{ м.}$$

Довжина черіні:

$$L_n = z_2 \cdot b + (z_2 + 1) \cdot \delta,$$

де z_1 – кількість рядків, приймаємо 10;

l – довжина заготовки, 140 мм;

δ – зазор між торцями заготовки, $\delta = 12,5$ мм.

$$L_n = 10 \cdot 140 + (10 + 1) \cdot 12,5 = 1537,5 \text{ мм} = 1,5375 \text{ м.}$$

Оскільки деталі завантажуються в піч з тарою, то для вільного проходу тари збільшимо довжину печі черіні на 200 мм:

$$B_n = 1128 + 200 = 1328 \text{ мм} = 1,328 \text{ м.}$$

$$L_n = 1537,5 + 200 = 1737,5 \text{ мм} = 1,7375 \text{ м.}$$

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Знайдемо розміри печі з врахуванням розмірів і положення цегли. Розмір цегли становить 250×125×65 мм.

Ширина печі:

$$\frac{B_n}{(250 + 3)} = \frac{1328}{253} = 5,25 \text{ шт.}$$

Приймаємо 5,5 цеглин за шириною печі.

$$B_n = 5,5 \cdot (250 + 3) = 1391,5 \text{ мм.}$$

Довжина печі:

$$\frac{L_n}{(250 + 3)} = \frac{1737,5}{253} = 6,87 \text{ шт.}$$

Приймаємо 7 цеглин за довжиною печі.

$$L_n = 7 \cdot (250 + 3) + 125 = 1771 \text{ мм.}$$

Висота камери печі:

$$H = 1,2 \cdot B_n = 1,2 \cdot 1391,5 = 1669,8 \text{ мм.}$$

$$\frac{H}{(65 + 3)} = \frac{1669,8}{68} = 24,56 \text{ шт.}$$

Приймаємо 25 цеглини за висотою печі.

$$H = 25 \cdot (65 + 3) = 1700 \text{ мм.}$$

Розміри робочого простору печі вказані на рисунку 3.1.

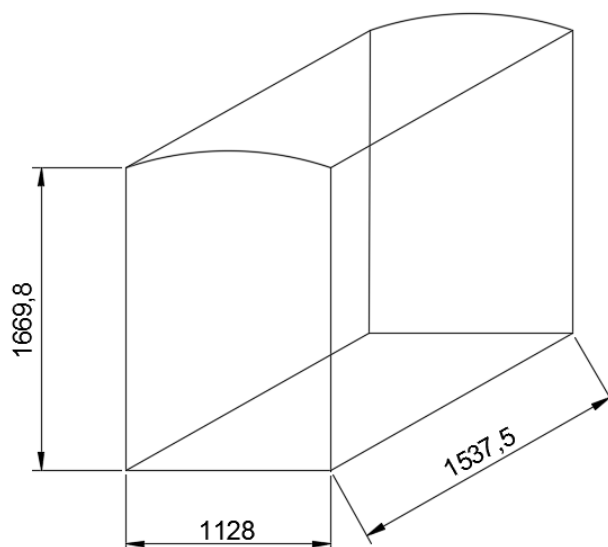


Рисунок 3.1 – Робочий простір печі

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Вибір матеріалів для побудови печі

Вибір матеріалів для побудови печі проводиться за даними із вище наведених розрахунків [4].

Згідно наших даних підбираємо стіни, внутрішній шар яких шамот класу А товщиною 300 мм та шар теплоізоляції діатомітова цегла товщиною також 125мм.

Склепіння печей вибираємо з внутрішнім шаром – шамот класу А товщиною 300 мм, та теплоізоляційним шаром – товщиною 200 мм ізоляційної засипки. Ізоляційні шари зображені на рисунку 3.2.

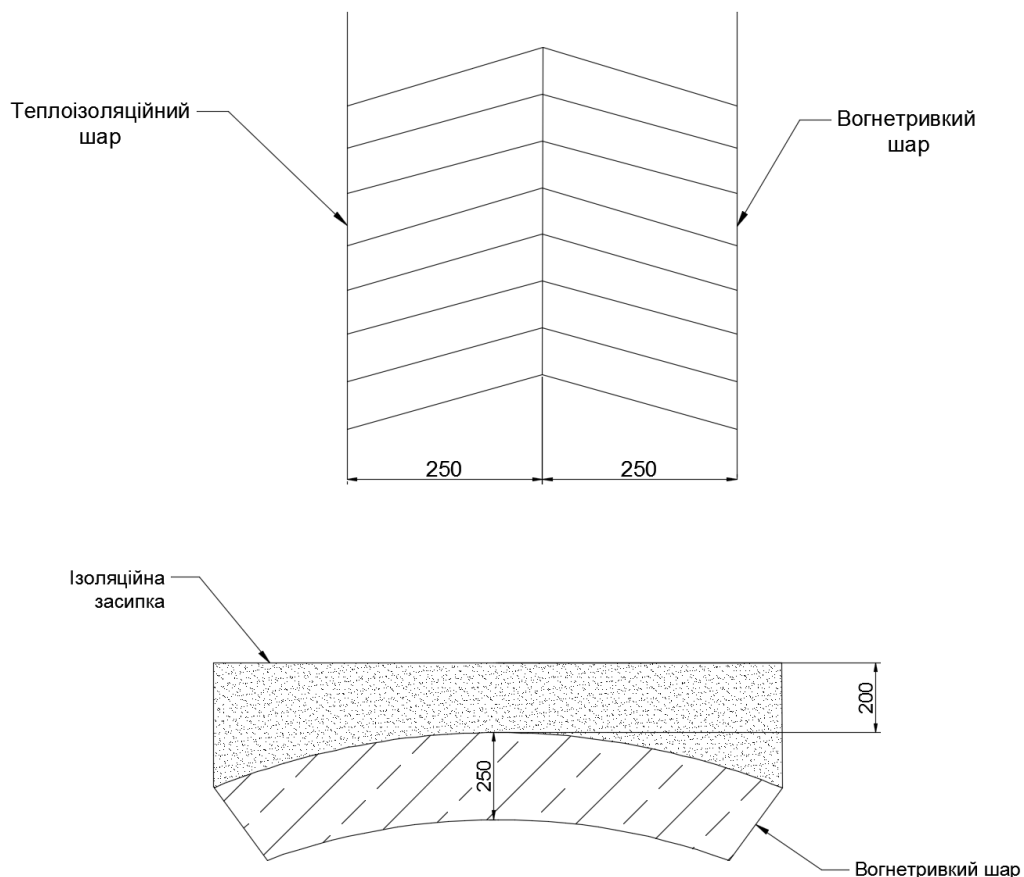


Рисунок 3.2 – Зображення ізоляційних шарів камерної печі

3.3. Вибір горілок

Вибір горілок для спалювання газоподібного палива обумовлюється взаємністю технологічних, експлуатаційних і економічних умов: конструкцією і продуктивністю печі, температурою в робочому просторі, видом газу і його тиском, якістю спалювання газу, вартістю установки і зручністю її обслуговування.

Продуктивність горілки знаходиться за формулою:

$$B_{гор.} = \frac{k_3 \cdot B}{n},$$

де k_3 – коефіцієнт рівний 1,25;

B – витрати палива, м^3 ;

n – кількість горілок, що будуть встановлені в печі.

$$B_{гор.} = \frac{1,25 \cdot 18,1}{2} = 11,3 \text{ м}^3/\text{год},$$

Врахувавши всі вище перераховані умови та розрахунки, обираємо горілку ГНП-3 [5].

3.4. Розрахунок рекуператора

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

Вихідними формулами для розрахунку є рівняння теплопередачі [4]:

$$Q = kF\Delta t_c,$$

рівняння теплового балансу:

$$V_o(i_o' - i_o'')\xi = V_n(i_n' - i_n''),$$

де Q , $V_n(i_n' - i_n'')$ – кількість тепла, що передається через всю поверхню нагріву, Вт;

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

F – поверхня нагріву рекуператора, м^2 ;

k – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$;

t_c – середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям, $^{\circ}\text{C}$;

V_o – витрати продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{с}$;

V_n – витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$;

i_o' і i_o'' – початковий і кінцевий тепловміст диму $\text{кДж}/\text{м}^3$;

ξ – коефіцієнт, який враховує витрати тепла через кладку рекуператора, 0,9.

Витрати повітря:

$$V_n = BL_o,$$

де B – витрати палива, м^3 ;

L_o – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$$V_n = 18,1 \cdot 10,31 = 186,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Витрати продуктів горіння:

$$v_o = BV_o,$$

де B – витрати палива, м^3 ;

V_o – сумарний об'єм продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$V_o = 18,1 \cdot 11,45 = 207,25 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Кінцевий тепловміст диму:

$$i_o'' = i_o' - \frac{V_n}{V_o \xi} (i_n' - i_n''),$$

де i_o' – початковий тепловміст диму, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

V_n – витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$;

V_o – витрати продуктів горіння, $\text{м}^3/\text{с}$;

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

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

i_n' – початковий тепловміст повітря, кДж/м³;

i_n'' – кінцевий тепловміст повітря, кДж/м³.

$$i_o'' = 1365,5 - \frac{186,6}{207,25 \cdot 0,8} (395,7 - 20) = 942,7 \text{ кДж/м}^3.$$

$$i_o' = 1365,5 \text{ кДж/м}^3,$$

$$i_n' = 395,7 \text{ кДж/м}^3,$$

$$i_n'' = 20 \text{ кДж/м}^3.$$

За тепловмістом i_o'' виберемо необхідну температуру:

При 700 °С:

$$i_{n.z.}(750) = i_{CO_2} \cdot CO_2 + i_{H_2O} \cdot H_2O + i_{O_2} \cdot O_2 + i_{N_2} \cdot N_2,$$

де i_{CO_2} – тепловміст вуглекислого газу, кДж/м³;

CO_2 – відсотковий вміст вуглекислого газу, %;

i_{H_2O} – тепловміст води, кДж/м³;

H_2O – відсотковий вміст води, %;

i_{O_2} – тепловміст кисню, кДж/м³;

O_2 – відсотковий вміст кисню, %;

i_{N_2} – тепловміст азоту, кДж/м³;

N_2 – відсотковий вміст азоту, %.

$$i_{n.z.}(750) = \frac{1967,5 \cdot 9,15\% + 1526,8 \cdot 18,42\% + 1247,7 \cdot 71,52\% + 1320,2 \cdot 0,9\%}{100\%} = 1365,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям:

$$\Delta t_c = \frac{(t_o' - t_n') - (t_o'' - t_n'')}{\ln \frac{t_o' - t_n'}{t_o'' - t_n''}},$$

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де t_n' – початкова температура повітря, °С;

t_n'' – кінцева температура повітря, °С;

t_o'' – початкова температура диму, °С;

t_o' – кінцева температура диму, °С.

Отже, вибираємо температуру $t_o'' = 700$ °С, $t_o' = 1000$ °С, $t_n' = 20$ °С,
 $t_n'' = 300$ °С.

$$\Delta t_c = \frac{(1000 - 20) - (700 - 300)}{\ln \frac{1000 - 20}{700 - 300}} = 647,32 \text{ °С.}$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}},$$

де α_o – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки, Вт/м²·град;

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

S – товщина стінки, м;

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

$$k = \frac{1}{\frac{1}{147,7} + \frac{0,0025}{13} + \frac{1}{146,46}} = 72,5 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{град.}$$

$$\alpha_o = (7,4 + 0,0094 \cdot 850) \cdot \frac{4^{0,65}}{0,02^{0,35}} = 147,7 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{град,}$$

$$\alpha_n = (7,4 + 0,0058 \cdot 160) \cdot \frac{10^{0,65}}{0,02^{0,35}} = 146,46 \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{град,}$$

Знайдемо кількість тепла, що передається через всю поверхню нагріву:

$$Q = V_n (i_n' - i_n''),$$

де V_n – витрати повітря, м³/с;

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

i_n' – початковий тепловміст повітря, кДж/м³;

i_n'' – кінцевий тепловміст повітря, кДж/м³.

$$Q = 186,6 \cdot (395,7 - 20) = 70105,62 \text{ кДж.}$$

Поверхня нагріву рекуператора:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_c},$$

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

k – коефіцієнт теплопередачі Вт/м²·град;

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

$$F = \frac{70105,62}{72,5 \cdot 647,32} = 1,49 \text{ м}^2.$$

Загальна довжина трубок в рекуператорі знаходиться за формулою:

$$l_{\text{тр. заг.}} = \frac{F}{\pi d}$$

де d – діаметр трубок 0,02 м;

F – поверхня нагріву рекуператора, м².

$$l_{\text{тр. заг.}} = \frac{1,49}{3,14 \cdot 0,02} = 23,7 \text{ м.}$$

Приймаємо довжину трубки $l=0,79$ м. Кількість трубок становитиме 30 (6×5).

Загальний вигляд рекуператора приведений на рисунку 3.3

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

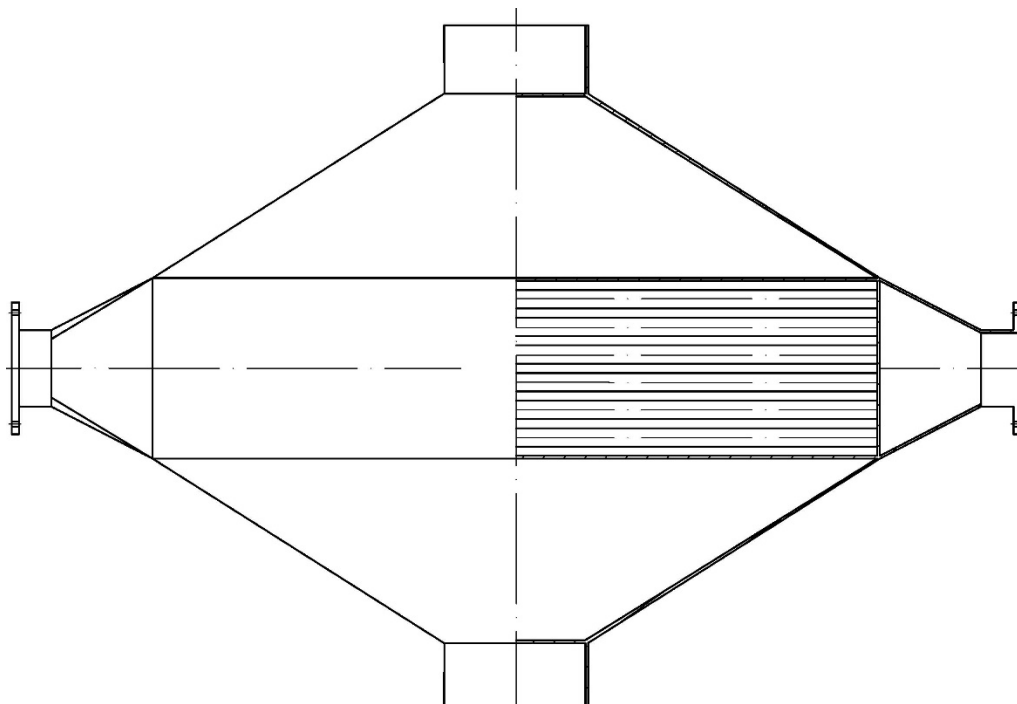


Рисунок 3.3

3.4. Тара для завантаження деталей у піч

Для виготовлення тари використаємо сталь EN 1.4842 (10X18H18Ю4Д).

Тара має прямокутну форму розміром 1350×1760 мм (рисунок 3.4), по контуру якої обварена штабою розміром 10×50 мм.

Знизу наварена решітка з прутів перетином 5×5 і 10×10. У якості направляючих виступають кутники 35×35×5 мм.

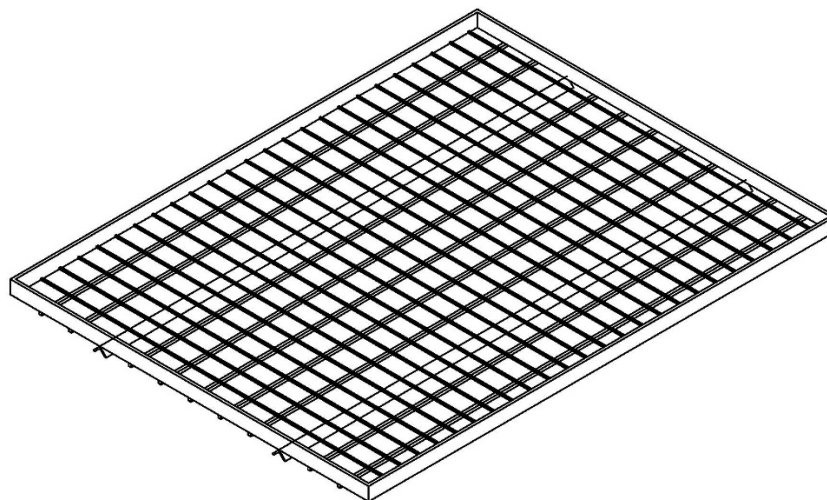


Рисунок 3.4 – Тара

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БП 3526.00.000 ПЗ

Арк.

37

ВИСНОВКИ

У проєкті розроблено технологічний процес термічної обробки деталі опора виготовленої зі сталі 12Х2Н4А.

Для операції нормалізація було спроектовано камерну полум'яну піч. Для цього було проведено необхідні технологічні розрахунки а саме розраховано теплотворення палива, склад і кількість продуктів що утворюються при горінні газоподібного палива. Розраховано час нагріву металу.

Визначено витрати палива, для чого був складений тепловий баланс печі. Тепловий баланс враховував прибуткові (тепло отримане від спалювання газоподібного палива і тепла повернутого через рекуператор) і видаткові статті (тепло, яке пішло на нагрів металу і тари, втрати тепла через склепіння, стіни черинь та відкриті вікна печі).

Розраховано робочий простір печі. Вибрано матеріали для побудови печі.

Спроектовано тару для зручного завантаження деталей у піч.

Для економії палива у піч встановлено рекуператор, який повертає частину тепла димових газів через підігрів повітря, що йде для спалювання газоподібного палива.

Розрахунковий термічний коефіцієнт корисної дії становить 36,2 %, що є досить добрим показником (для камерних печей без рекуператора він становить 5...12 %).

В цілому результати даного проєкту можна використовувати на підприємствах де є необхідність проводити термічну обробку деталей, а спроектовану піч і для інших деталей, якщо вона буде відповідати температурним та масо-габаритним умовам.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія конструкційних матеріалів. Підручник/ М. Н. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін. За ред.. М. Н. Сологуба – К.:Вища школа; 2002 – 374с.
2. <http://www.splav-kharkov.com/main.php> – база даних сталей та сплавів.
3. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко та ін. – 2-ге вид., перер. і доп. – К. ІВЦ «Політехніка», 2002. – 384 с.
4. Устаткування процесів теплової обробки : метод. вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спец. G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заоч. форм навч. / уклад.: С. В. Мисковець, Д. А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 40 с.
5. Устаткування процесів теплової обробки. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів спеціальності 6.090100 – “Прикладне матеріалознавство” для всіх форм навчання/ С.В.Мисковець, Ю.П.Фешук, О.Д.Клименко - Луцьк: ЛНТУ, 2009.- 44 с.
6. Устаткування процесів теплової обробки : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спец. G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заоч. форм навч. / уклад.: С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 100 с.
7. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. – Л.: «Афіша», 2002. – 304 с.
8. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів/В.В. Атаманюк. – К.: Кондор, 2016. – 528 с.
9. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 171 с.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. 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.

11. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія і практика термообробки» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 104 Фізика та астрономія, за освітньо-професійною програмою «Фізика та астрономія» всіх форм навчання / Укладач: Лисенко О.Б. – Кам'янське: ДДТУ, 2019.– 124 с.

12. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015-06-22. – К.: Держстандарт України, 2017. – 29 с.

13. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» галузі знань 13 Механічна інженерія спеціальності 132 Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / уклад. М.Д. Мельничук, Ю.П. Фещук, Д.А. Гусачук, С.В. Мисковець. Луцьк : ЛНТУ, 2023. 52 с.

					БП 3526.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		