

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М.ПОТЕБНІ**

**КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Кваліфікаційна робота**  
**другий магістерський**  
(рівень вищої освіти)

Тема кваліфікаційної роботи «Удосконалення технології відновлення відходів при термічній обробці металу»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1440-з-дн  
спеціальності теплоенергетика  
освітньої програми теплоенергетика

Ковтун Денис Валерійович

Керівник к.т.н., доц. Осаул О.І.

Рецензент д.т.н., професор Банах В.А.

Запоріжжя  
2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
«03» лютий 2022 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Ковтуну Денису Валерійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

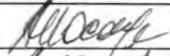
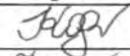
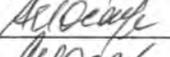
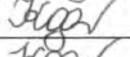
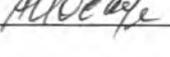
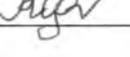
Тема роботи (проекту) Удосконалення технології відновлення  
відходів при термічній обробці металу  
керівник роботи Осаул Олександр Іванович, к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «30» червня 2021 року № 975-с

- 1 Строк подання студентом роботи: 04 лютого 2022 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: двокамерна піч з площею поду 29 м<sup>2</sup>, паливо - природний газ, габаритні розміри печі. Вартість природного газу - 7,661 грн/м<sup>3</sup>.
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): сучасний стан питання утилізації металовідходів при термічній обробці металу; розробка елементів технології вуглетермічного відновлення окалини швидкорізальних сталей; аналіз економічної ефективності впровадження технології утилізації вторинної металовмісної сировини.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): двокамерна нагрівальна піч, схема експериментальної установки, математична модель вуглетермічного відновлення окалини у печі, економічна ефективність впровадження заходів.

5 Консультанти розділів роботи

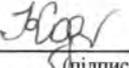
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Осаул О.І.		
2	Осаул О.І.		
3	Осаул О.І.		

6 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

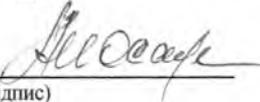
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів зниження втрат від утворення окалини при термічній обробці металу в печах.	25.06.2021	виконано
2	Дослідження теплофізичних властивостей окалиновмісної шихти	01.08.2021	виконано
3	Математичне моделювання процесів металізації окалини.	01.10.2021	виконано
4	Вибір параметрів температурного режиму металізації окалини та раціонального складу шихти.	05.11.2021	виконано
5	Розрахунок економічної ефективності впровадження заходів.	31.01.2021	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам.	04.02.2022	виконано

Студент

  
(підпис)

Д.В.Ковтун  
(ініціали та прізвище)

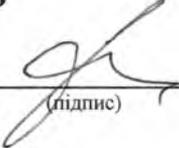
Керівник роботи (проекту)

  
(підпис)

О.І.Осаул  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер

  
(підпис)

С.Є. Чижов  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Д.В. Ковтун. Удосконалення технології відновлення відходів при термічній обробці металу.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник к.т.н., доцент Осаул О.І. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім.Ю.М.Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2022.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена удосконаленню технології відновлення відходів при термічній обробці металу. Досліджено теплофізичні властивості окалиновмісної шихти. Розроблено та досліджено в промислових умовах технічні рішення, що дозволяють вирішити завдання зменшення енерговитрат і зниження втрат металу від окалиноутворення в процесі його теплової обробки в полум'яних нагрівальних і термічних печах.

Ключові слова: енергозберігаючі режими, камерна піч, енергоефективність, термічна обробка металу, шихта, вуглетермічне відновлення окалини.

## ABSTRACT

D.V.Kovtun. Improving waste recovery technology under heat treatment of metal.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Thermal Power Engineering, Supervisor Ph.D., Associate Professor Osaul O.I. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebny, Department of Thermal Power Engineering and Hydro Power Engineering, 2022.

The qualification work of the master is devoted to improving waste recovery technology under heat treatment of metal. The thermophysical properties of the scale-

containing charge have been studied. The technical methods have been worked out and tested in industrial conditions. According to these methods the problems of energy usage decreasing and metal losses decreasing from scale formation in the heat treatment process of open flame and heating furnaces were solved.

Keywords: saving modes, chamber furnace, energy efficiency, heat treatment of metal, furnace charge, coal-thermal scale reduction.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ МЕТАЛОВІДХОДІВ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛУ.....	11
1.1 Джерела утворення відходів на різних етапах технологічної схеми виробництва сталей.....	11
1.2 Способи утилізації відходів у світі і в Україні.....	16
1.2.1 Утилізація металовмісних відходів методом агломерації.....	16
1.2.2 Утилізація металовмісних відходів методом брикетування.....	19
1.2.3 Утилізація металовмісних відходів методом порошкової металургії.....	22
1.3 Аналіз використання окалини, стружки і дрібнодисперсних відходів на резервних потужностях нагрівальних печей ПрАТ "Дніпроспецсталь".....	29
2 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВУГЛЕТЕРМІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКАЛИНИ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ.....	35
2.1. Моделювання процесів металізації окалини.....	35
2.1.1 Кінцево-різницеві схеми рішення завдань нагріву.....	36
2.1.2 Математична модель вуглетермічного відновлення окалини в умовах двокамерної нагрівальної печі.....	66
2.2. Дослідження ефективних теплофізичних властивостей шихти.....	75
2.2.1 Визначення коефіцієнта температуропровідності.....	75
2.2.2 Оцінка погрішності визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності.....	88
2.2.3 Визначення ефективних значень коефіцієнта теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності.....	90
2.3 Вибір параметрів температурного режиму металізації окалини, визначення раціонального складу шихти і геометричних розмірів капсули.....	94
2.4 Розробка складів брикетованої шихти.....	101

3 АНАЛІЗ ЕКОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОЇ МЕТАЛОВМІСНОЇ СИРОВИНИ.....	106
ВИСНОВКИ.....	111
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	113

## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Згідно енергетичної стратегії України до 2035р. пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоємності виробництва, скорочення споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок впровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих заходів.

В Україні на виробництво одиниці продукції витрачається велика кількість природних ресурсів, що неминуче призводить до утворення твердих відходів в об'ємах, які в (2...2,5) рази перевищують європейський рівень. Останніми роками видобуток і збагачення залізних руд стають усе більш витратними. В той же час накопичені запаси залізистих відходів порівняні по об'ємах з природними залізородними родовищами. Велика частина цих відходів може бути використана при виробництві металопродукції, будучи постачальником дефіцитних металів. Використання таких відходів у металургійному переділі дозволяє одночасно вирішити кілька завдань: скоротити обсяги відходів, що утворюються, отримати сировину для металургійного виробництва і поліпшити екологічну обстановку в промисловому регіоні.

На ПрАТ "Дніпроспецсталь" виробництво швидкорізальних сталей методом порошкової металургії супроводжується утворенням металовмісних відходів (металлоотсів різних фракцій, окалина, технологічна обрізь, металева стружка), хімічний склад яких в максимальному ступені відповідає сортаменту марок сталей, які виплавляються.

Якщо повернення металевої обрізі і різцевої стружки в металургійне виробництво не створює технологічних труднощів, то використання дрібнодисперсної абразивної стружки і окалини у складі шихти металургійної плавки без їх попередньої підготовки зв'язане зі значними втратами.

Одним з напрямів утилізації окалини високолегованих сталей, як вторинної сировини, що містить легуючі елементи, є її вуглетермічне

відновлення у складі насипної шихти з подальшим використанням металізованого продукту при виплавці відповідних марок сталей.

*Мета роботи* – дослідження температурного режиму металізації окалини і визначення раціонального складу шихти для отримання металізованого легуючого матеріалу.

*Задачі дослідження.* Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі задачі:

- аналіз методів зниження втрат від утворення окалини при термічній обробці металу в печах;
- аналіз металовідходів термічних печей підприємства;
- дослідження теплофізичних властивостей окалиновмісної шихти (ефективного коефіцієнта теплопровідності, ефективного коефіцієнта теплопровідності, ефективної питомої об'ємної теплоємності), які враховують перетворення в шихті;
- математичне моделювання процесів металізації окалини;
- вибір параметрів температурного режиму металізації окалини;
- визначення раціонального складу шихти і геометричних розмірів капсули;
- розробка складів брикетованої шихти;

*Об'єкт дослідження* – окалина швидкорізальних сталей.

*Методи та засоби дослідження.* Поставлені задачі вирішувались за допомогою математичного моделювання, експериментальних лабораторних та промислових досліджень. Використано програмний продукт MathCAD.

*Наукова новизна отриманих результатів.* Запропоновано і обґрунтовано підвищення енергоефективності камерних печей за допомогою електричного поля.

*Практична цінність роботи.* На підставі результатів експериментальних і числових досліджень визначено раціональний склад шихти для вуглетермічного відновлення окалини, температурні залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності та ефективної об'ємної

теплоємності, які враховують теплові ефекти реакцій при вуглетермічному відновленні окалини.

*Апробація роботи.* Результати роботи представлені на I Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально- економічного розвитку регіонів України» 19-21 жовтня 2021 р. та VII Міжнародній науково-практичній конференції «TOPICAL ISSUES OF MODERN SCIENCE, SOCIETY AND EDUCATION», Харків, 29-31 січня 2022р.

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилення з 40 позицій. Загальний обсяг складає 115 сторінок, у тому числі 34 ілюстрації та 8 таблиць.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ МЕТАЛОВІДХОДІВ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛУ

1.1 Джерела утворення відходів на різних етапах технологічної схеми виробництва сталей

Зниження питомих витрат енергії і сировини на одиницю продукції, що випускається, на сучасному етапі стає однією з найважливіших проблем, що стоять перед вітчизняною промисловістю. В Україні на виробництво одиниці продукції витрачається велика кількість природних ресурсів [1-4], що неминуче призводить до утворення твердих відходів в об'ємах, які в (2...2,5) рази перевищують європейський рівень [5]. Останніми роками видобуток і збагачення залізних руд стають усе більш витратними. В той же час накопичені запаси залізовмісних відходів порівняні по об'ємах з природними залізорудними родовищами. Велика частина цих відходів може бути використана при виробництві металопродукції, будучи постачальником дефіцитних металів [6-13].

Проблема утворення і використання вторинних матеріальних і енергетичних ресурсів гостро стоїть і на ПрАТ "Дніпроспецсталь". Металовідходи, наприклад, методичної печі стану 550 і термічної печі стану 1050 прокатного цеху наведені у таблицях 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1 - Металовідходи методичної печі стану 550

Відходи	50XГФ		08X17H13M2T-Y		ШХ15СГ	
	Факт., кг/т	План., кг/т	Факт., кг/т	План., кг/т	Факт., кг/т	План., кг/т
обрізь	46,70	40,00	80,30	34,00	39,20	39,00
стружка	4,60	4,00	3,70	4,00	4,00	4,00
угар	6,00	6,00	4,90	5,00	5,00	5,00
окалина	10,10	10,00	10,10	7,00	7,00	7,00

Таблиця 1.2 - Металовідходи термічної печі стану1050

Відходи	08X17H13M2T-Y		50XГФ		ШХ15В	
	Факт., кг/т	План., кг/т	Факт., кг/т	План., кг/т	Факт., кг/т	План., кг/т
обрізь	151,80	125,00	287,00	194,00	199,80	200,00
стружка	5,60	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
угар	6,10	6,00	6,50	6,00	6,00	6,00
окалина	14,30	14,00	21,70	20,00	16,00	16,00

Провівши аналіз відходів представлених марок сталей можна зробити висновок, що середній відсоток утворення окалини для стану 550 складає 1,44 %, а для стану 1050 - 2,35 %. Відповідно середній відсоток утворення окалини по цеху-1,9 %.

На ПрАТ "Дніпроспецсталь" виробництво швидкорізальних сталей здійснюється в цеху порошкової металургії (ЦПМ). До складу ЦПМ входять сталеплавильне відділення і відділення гарячого пресування.

Сталеплавильне відділення призначене для виплавки сталі і отримання порошку заданого хімічного і гранулометричного складу.

Для отримання порошку у сталеплавильному відділенні передбачено наступне обладнання: індукційна піч, металоприємики, водоохолоджувана колона розпилення з порошкоприємиками, віброгуркіт для розсіву порошку, передавальні контейнери.

Технічна характеристика основного обладнання сталеплавильного відділення:

Індукційна піч: тип - HFD-4

Максимальна маса садки, кг – 4000.

Загальна маса, кг – 13080.

Витрата охолоджувальної води, л/хв (дм<sup>3</sup>/с) - 304 (5,0).

Напруга, В – 1950.

Струм, А – 12290.

Частота, Гц - 550±7,5 %.

Потужність, Вт - 2400·10<sup>3</sup> .

Питома витрата електроенергії, кВт год/т (МДж/т) - 585 (2106).

Колона розпилення:

Загальна висота, м – 13,495.

Зовнішній діаметр, м – 2,50.

Максимальний надлишковий тиск газу, Па -  $10 \cdot 10^3$ .

Передача вантажів у сталеплавильному відділенні проводиться за допомогою електромостового крану вантажопідйомністю 10 тс (0,1 МН) і двох тельферів вантажопідйомністю 10 і 3 тс (0,1 і 0,03 МН).

У відділенні гарячого пресування проводиться травлення обичайок, підготовка капсул, заповнення їх порошком, віброущільнення, вакуумування і приварка кришок, гідростатичне пресування капсул, їх попередній підігрів і газостатичне пресування.

Для травлення обичайок передбачені три ванни об'ємом 1,2 м<sup>3</sup>.

Для зберігання придатного порошку у відділенні гарячого пресування передбачено чотири бункера місткістю 12 т кожен. Для рівномірного перемішування порошку при заповненні капсул бункери обладнані системою "тічок" і електромагнітними котушками.

Для ущільнення порошку в капсулі використовується вібратор, на який капсула встановлюється перед заповненням.

Приварка днища і верхньої кришки до обичайки проводиться зварювальним напівавтоматом, обладнаним системами подачі захисного газу і пресом для запресовування днищ і кришок в обичайку.

Вакуумування капсул з порошком виробляється на трьох вакуумних постах.

Контроль тиску усередині капсули здійснюється приладом типу ВСБ-1.

Гідростатичне пресування капсул застосовується з метою збільшення щільності порошку і скорочення часу нагріву, а також для виявлення несучільностей в обичайці і зварних швах і проводиться на установці QIC-125 (гідростат) з наступною технічною характеристикою:

Максимальний тиск, Па -  $400 \cdot 10^6$ .

Максимальне осьове зусилля, МН – 125.

Внутрішній діаметр, м – 0,68.

Внутрішня висота, м – 0,20.

Робоче середовище – 5 % розчин емульсола у воді.

Підігрів капсул перед газостатичним пресуванням проводиться в електричних печах опору з захисною атмосферою (аргон).

Печі попереднього нагріву:

Кількість печей, шт – 7.

Максимальна температура, °С – 1200.

Потужність, Вт -  $75 \cdot 10^3$ .

Кількість зон, шт. – 3.

Максимальні розміри капсули:

Діаметр, м – 0,50.

Висота, м – 1,72.

Напруга живлення кожної зони - однофазне, В - 220.

Установка гарячого газостатичного пресування QIN-63 (газостат) призначена для пресування і спікання капсул з порошком при високій температурі і має наступні характеристики:

Максимальний робочий тиск, Па -  $100 \cdot 10^6$ .

Внутрішній діаметр, м – 0,61.

Внутрішня висота, м – 1,91.

Висота гарячої зони, м – 1,795.

Максимальна температура, °С – 1150.

Потужність, Вт -  $212 \cdot 10^3$  (4×53).

Кількість зон, шт. – 4.

Робоче середовище – аргон.

Для завантаження капсул в піч попереднього нагріву і газостат використовується рейковий маніпулятор з дистанційним управлінням вантажопідйомністю 2,5 тс (0,025 МН).

Завантаження капсул в печі і газостат проводиться знизу.

Для передачі капсул з порошком всередині відділення гарячого пресування використовується один рейковий візок вантажопідйомністю 10 тс (0,1 МН), електромостовий кран вантажопідйомністю 10 тс (0,1 МН) і тельфер вантажопідйомністю 10 тс (0,1 МН). Для передачі пресовок у відділення деформації використовується візок вантажопідйомністю 10 тс (0,1 МН).

На ПрАТ "Дніпроспецсталь" виробництво швидкорізальних сталей методом порошкової металургії супроводжується утворенням металовмісних відходів (металовідсів різних фракцій, окалина, технологічна обрізь, металева стружка), хімічний склад яких в максимальному ступені відповідає сортаменту марок сталей, що виплавляються. Ці відходи містять такі дорогі і дефіцитні леговані елементи як молібден, вольфрам, кобальт, ванадій, хром та ін.

За даними центральної заводської лабораторії ПрАТ "Дніпроспецсталь" результати балансових плавок швидкорізальних сталей в ЦПМ і ковальському цеху (КЦ) наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Результати балансових плавок швидкорізальних сталей в ЦПМ і КЦ

Марка сталі	Цех	Тип злитку, кг	Угар при першому переділі, %	Угар при другому переділі, %	Сумарний угар, %	Відходи на ад'юстажну обробку, %
P18	КЦ	0,625	5,44	1,80	7,24	1,40
	ЦПМ	0,625	3,97	2,32	6,29	3,83
P6M5	КЦ	1	3,33	0,80	4,13	1,48
	ЦПМ	1	1,90	1,70	3,60	3,78
P6M5	КЦ	0,625	1,23	4,10	5,33	2,10
	ЦПМ	0,750	2,03	1,77	3,80	5,03

Аналізуючи дані, наведені у таблиці 1.3, можемо зробити висновок, що вцілому по заводу середній сумарний угар сталей P6M5 і P18 у ЦПМ і КЦ складає 5,1 %, а стружки при ад'юстажній обробці – 2,94 %.

Таким чином, переробка, утилізація відходів і використання їх у вигляді відносно дешевої металургійної сировини дасть значне зниження витрат на шихту, підвищить якість і конкурентоздатність, а головне - понизить собівартість готової продукції. Зарубіжний досвід застосування цих технологій на металургійних підприємствах повного циклу показує можливість практично повної утилізації власних твердих відходів. Крім того, очищення цілих регіонів, де скупчилися величезні техногенні родовища відходів, утилізація поточних відходів металургійних виробництв - це шлях до вирішення екологічної і соціальної проблеми.

## 1.2 Способи утилізації відходів у світі і в Україні

### 1.2.1 Утилізація металовмісних відходів методом агломерації

Видалення окалини від прокатних станів здійснюється гідрозмивом. При цьому одночасно віддаляються і розливи мастильних олій, що утворюються в результаті неконтрольованих витоків устаткування. Окалина, зважена у водомасленому середовищі, за системою дренажних каналів спрямовується у відстійники, в яких відділяється тверда фракція і проводиться очищення стічних вод. Використання цієї технології призводить до утворення двох видів окалини : первинної і вторинної. Вони відрізняються фракційним складом, а також наявністю води і масла. Первинна окалина на 95 % складається з часток розміром більше двох міліметрів. Вторинна окалина більше дисперсна і містить у своєму складі, разом з твердою речовиною, до (8...12) % масла і до 10 % води [14].

Найважливішими напрямками в проблемі утилізації прокатної окалини є її підготовка до повернення в технологічний переділ і наявність технології

використання вторинної сировини в якості домішки до основних шихтових матеріалів в аглодоменному і сталеплавильному виробництвах. Процес підготовки, в основному, полягає в кускуванні залізовмісних відходів, одним з основних способів якого є агломерація.

Задовільні фізико-хімічні властивості і наявність прийнятної технології використання первинної окалини в якості компонента аглошихти зумовлюють її практично повне використання в агломераційному процесі [15]. В той же час наявність значної кількості вологи і масел стає перешкодою на шляху утилізації вторинної окалини і переводить цю цінну за вмістом провідних елементів сировину в техногенні відходи. Використання непідготовленої замасленої окалини у складі аглошихти стримується, передусім, складом газоподібних продуктів агломерування, каналів, що видаляються через систему, і мультициклонів агломераційної машини. Гази містять значну кількість пари масла і продуктів його сублимації, які в умовах запиленого потоку сприяють швидкому "заростанню" елементів газовідводного тракту. Це погіршує ефективність очищення газів і призводить до передчасного виходу з ладу ексгаустера (наприклад, при залипанні навіть 15 % отворів термін служби ротора зменшується з 1,5 років до 20 днів).

Другою проблемою, що перешкоджає організації ефективної переробки вторинної окалини, є її в'язкопластичний агрегатний стан і відсутність сипучості [13]. Для надання замасленій окалині сипучості застосовують способи, засновані на її термічній обробці, використанні високошвидкісних центрифуг, змішуванні з різними матеріалами [14,16]. Використання технологій механічної і термічної обробки вимагає створення нового устаткування і пов'язане з капітальними витратами. Роль сухих домішок, в якості яких використовують вапняк, вапно, колошниковий пил, доменний шлак, деревну тирсу і інші адсорбенти, зводиться, передусім, до гідратування вологи і тому вони не надають істотного впливу на вміст масла. В якості матеріалу, що забезпечує комплексну попередню підготовку вторинної окалини, останнім часом знаходить застосування активований торф [13]. Цей матеріал

характеризується розвиненою поверхнею, високою пористістю і наявністю вуглецьокислюючих мікроорганізмів. В силу цього він має високу вологоємність і може служити як сорбентом включень масла, так і їх деструкцією. Використання замащеної окалини при спіканні агломерату у складі окалино-торф'яних сумішей з часткою торфу 20 % дозволяє в 2,7 разу підвищити міру вигорання масел, які вводяться, що обумовлено скороченням інтервалу їх займання, а також більш рівномірним розподілом окалини в об'ємі аглошихти [17]. Застосування цієї технології спільне з електророзрядним пристроєм для допалювання пари масел в газах, що відходять, дозволяє підвищити частку окалино-торф'яної суміші до (11...16) кг на тонну агломерату без зростання шкідливої дії на довкілля і збільшення відкладень в тракці агломераційної газовідводної машини утилізувати всю вторинну окалину поточного виробництва і почати переробку відходів, що накопичилися [16, 17].

Відомий спосіб утилізації дрібної замащеної окалини фірми "Колерепа індастріз" (США), при якому для розділення і осушення твердих речовин і масел використовують хлористий метилен і спеціальні стабілізатори. Недоліками вказаного способу є висока токсичність хлористого метилену, а також великі витрати, необхідні для придбання і регенерації цього розчинника. Відомий спосіб утилізації дрібної замащеної окалини фірми "Ф.Крупп Хюттенверке"(ФРН), що включає згущування шламу в радіальному згущувачі, очищення згущеної фази від масла лужними розчинами з подальшим відділенням твердої фази від масла і води в центрифугі. Обробка лужними розчинами здійснюється з домішками поверхнево-активних речовин. Витрата детергента 100 кг/т окалини. Вартість детергента на 1 т окалини 35 німецьких марок. Недоліками способу є висока вартість його здійснення і велика складність при експлуатації громіздкого устаткування.

В якості прототипу вибраний спосіб очищення залізної стружки, що включає обробку замащеної залізної стружки промивальним розчином і відділення твердої фази від рідкої. Недоліком способу є неможливість

отримання дрібної обезмасленої окалини із залишковим вмістом масла менше 3 %.

Огляд стану переробки прокатної окалини на підприємствах України дає можливість зробити висновок, що на більшості металургійних підприємств сухий колошниковий пил, первинна окалина, зварювальний шлак після їх підготовки практично повністю повертаються у виробництво.

На металургійному комбінаті "Криворіжсталь" використання вторинної замасленої окалини проводиться шляхом введення її у вугільну шихту при коксуванні після попереднього змішення з водовбирними домішками (торфом).

Первинна окалина цілком утилізується на металургійних підприємствах після переробки її на подрібнювально-сортувальній установці і спрямовується в аглодоменне виробництво (металургійні комбінати ММК ім. Ілліча, Азовсталь та ін.).

Переробка замасленої окалини робиться на Луганському трубному заводі шляхом термообробки в печі, введеній в експлуатацію в 2000р. Отриманий відпалений і знешкоджений концентрат містить до 90 % заліза і передається на утилізацію підприємствам гірничо-металургійного комплексу. На таких підприємствах як Макіївський металургійний комбінат, Дніпропетровський металургійний завод ім. Петровського і ряду ін., де відсутні аглофабрики, а усі ресурсоцінні відходи передаються на переробку іншим підприємствам, економічно доцільно мати власні установки по виробництву залізовмісних окатишів (брикетів) для повернення в доменне або сталеплавильне виробництво.

Абсолютно неприпустимим є положення по переробці відходів на Краматорському, Керченському, Дніпропетровському ім. Комінтерну металургійних заводах, Стахановському феросплавному заводі, які при анкетуванні відповіли, що ніяких технологій переробки відходів у них немає.

### 1.2.2 Утилізація металовмісних відходів методом брикетування

До ефективних методів підготовки металургійної сировини і залізовмісних відходів належить брикетування, основною цінністю якого в порівнянні з виробництвом агломерату і окатишів є можливість отримання якісних шихтових матеріалів за нижчою вартістю.

Виробництво брикетів здійснюється з урахуванням вимог технології конкретного металургійного переділу, що зумовлює широкий сортамент брикетів, як по складу шихти, так і по їх технологічному призначенню. У доменному виробництві використовуються залізовмісні, вуглецьвмісні і спеціальні брикети. Перші у свою чергу підрозділяються на брикети, що самовідновлюються, містять у своєму складі вуглецевий відновник, і брикети без вуглецьвмісних добавок. Основним ефектом використання залізовмісних брикетів в доменній плавці є зниження витрати коксу, поліпшення газодинаміки процесу і підвищення вмісту заліза в шихті. Вуглецьвмісні брикети виготовляються з коксового дріб'язку і використовуються як заміник коксу в якості паливно-відновної домішки, а брикети спеціального призначення, виготовлені на основі окалини, використовуються в доменній печі як промивальний матеріал.

Технологія брикетування дозволяє компактувати як окремі матеріали, так і їх суміші, у тому числі з вуглецьвмісними, флюсуючими і іншими домішками. Основними вимогами, які пред'являються до брикетів, є вимоги до їх міцнісних характеристик і складу.

Брикети повинні мати:

- достатню механічну міцність;
- термостійкість в процесі нагріву і відновлення;
- форму і розміри, що забезпечують достатню пошарову газопроникність і умови, що покращують протікання фізико-хімічних процесів плавки;
- мінімальний вміст шкідливих домішок.

Вибір шихти для виробництва брикетів здійснюється з урахуванням вимог конкретного металургійного переділу. Забезпечення цих вимог визначається складом шихти, властивостями її компонентів і їх технологічною придатністю при подальшому переділі брикетів. Технологічна придатність окалини, як залізовмісного компонента, визначається високим вмістом провідних елементів і незначною кількістю шкідливих домішок. У складі шихти може бути застосована як первинна, так і вторинна окалина. Використання останньої в комплексній шихті, складеній з декількох видів залізовмісних відходів, можливо і без знемаслення. Більшість способів позадоменного отримання заліза заснована на металізації залізовмісної сировини газоподібними відновниками. В якості останніх використовують водень і конвертований природний газ, що потребує будівництва дорогого спеціального устаткування. В той же час, незважаючи на наявність сірки і золи, що знижують якість металізованого продукту, використання твердих вуглецьвмісних відновників має ряд переваг. До них, передусім, відносяться відносна дешевизна, поширеність, спрощення технології підготовки сировини і його металізації. Основним критерієм вибору твердого відновника є його доступність, реакційна здатність і помірний вміст шкідливих домішок. В якості твердих відновників використовуються вугілля і кокс з низьким вмістом сірки, сажа, деревне вугілля. Високу реакційну здатність з відомих вуглецевих відновників має залізо сажі, яке в (1,5...2) рази ефективніше за деревне вугілля.

Використання цих відновників при масовому виробництві брикетів стримується їх відносним дефіцитом і збільшенням витрат по основному металургійному переділу. Значною мірою зниження цих витрат досягається при використанні дешевих альтернативних відновників таких як торф і лігнін, який є відходами целюлозно-паперової і гідролізної промисловості. В порівнянні з традиційними відновниками (вугілля, кокс) вони мають підвищений вихід летких, сприяючих розвитку непрямого відновлення, близькі зольність і загальний вміст сірки, міру металізації брикетів на рівні (86...89) %. Реакційна здатність відновника може бути істотно підвищена при використанні

дрібнофракційних технологічних відходів виробництва графітованих електродів, що містять не менше 98,5 % вуглецю. При варіюванні в шихті співвідношення деревне вугілля - графітові відходи на рівні (0,07...1,9) встановлено зниження часу відновлення оксидів хрому і заліза на (25...30) %.

Якість кінцевого металізованого продукту зумовлюється як вибором початкових матеріалів і умов шихтопідготовки, так і параметрами технологічного режиму отримання металізованого матеріалу.

Найуспішніше використовується утилізація окалини шляхом брикетування в металургійному виробництві США, Великобританії, Німеччини, Польщі, Південної Кореї, Японії, Франції. Виявляють цікавість до цієї проблеми Китай, Індія, Туреччина. Останніми роками і в Україні брикетування набуло особливої актуальності.

### 1.2.3 Утилізація металовмісних відходів методом порошкової металургії

Існують різноманітні методи відновлення залізного порошку-основи багатотоннажної порошкової металургії, що пояснюється тривалими пошуками методів виготовлення дешевих порошоків різних марок, що відрізняються по гранулометричному складу, вмісту домішок і технологічним властивостям.

Для металотермічного процесу вибирають відновник, який повинен :

- забезпечувати якнайповніше відновлення при можливо меншому підведенні тепла ззовні;
- забезпечувати легке відділення шлаку, що утворюється, а також надлишку відновника від отриманого металу (шляхом відмивання, відгону у вакуумі, відшлаковування);
- мати високу чистоту, щоб уникнути забруднення отриманого металу домішками;
- мало розчинятися в отриманому металі і не утворювати з ним стійких хімічних сполук; бути відносно дешевим і не дефіцитним.

Підприємства порошкової металургії або користуються воднем, що отримується на власних водневих станціях з електролізерами продуктивністю від декількох десятків до декількох сотень кубометрів водню в годину, або використовують стислий до 15 МПа газ, що доставляється у балонах місткістю 6 м<sup>3</sup>.

Необхідно пам'ятати про вибухонебезпеку водню (в суміші з повітрям температура займання (550...590) °С, а межі вибуховості (4,1...75) % (об'ємн.) і неухильно дотримуватися при роботі з ним правил пожежної безпеки і техніки безпеки.

Водневим відновленням отримують порошки вольфраму, молібдену, кобальту, міді, заліза, нікелю і їх сплавів, а також корозійностійких (нержавіючих) сталей.

Залізний порошок, відновлений воднем з окисної сировини, має високу чистоту і підвищену вартість із-за значної ціни 1 м<sup>3</sup> водню. Такий процес відновлення стає доцільним лише за наявності джерела дешевого водню, хімічного (чи іншого) виробництва, що наприклад є відходом.

Відновлення в киплячому шарі. Початковою сировиною для отримання залізного порошку по так званому H-Iron процесу служать рудні концентрати. Подрібнена до розміру 3 мм руда піддається магнітногравітаційному збагаченню з отриманням рядового концентрату, що містить 67 % Fe, з якого виділяють тонкі класи розміром менше 0,5 мм; з них повторним гравітаційним збагаченням готують багатий концентрат (71 % Fe). Шляхом подальшого подрібнення матеріалу в кульових млинах до розміру 0,15 мм і магнітній сепарації отримують концентрат вищої якості з 99,7 % Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, що відповідає вмісту 72 % Fe. Цей концентрат заздалегідь нагрівають до 480 °С в печі, що обертається, і потім за допомогою азоту переправляють в завантажувальний бункер, куди під тиском 3,5 МПа подають водень, за допомогою якого концентрат транспортується в реактор (вертикальний металевий циліндр заввишки 29 м і діаметром 1,7 м). Відновлення протікає при 540 °С на трьох горизонтальних подових ґратах. Завантаження свіжих порцій руди у верхню

частину реактора, а також пересипання частково відновленого матеріалу з ґрат на ґрати і розвантаження відновленого заліза в нижній частині реактора відбуваються періодично.

Осушений водень, підігрітий до 540 °С, під тиском 2,8 МПа нагнітають в нижню частину реактора. Швидкість його подання регулюють з розрахунку підтримки часток руди в киплячому шарі на усіх трьох подових ґратах; при пересипанні з ґрат на ґрати вони знаходяться в зваженому стані. Вологий водень після реакції піддається очищенню, осушенню і потім повертається в процес разом зі свіжими порціями водню. Відновлений порошок заліза виходить з реактора в розвантажувальний шлюз, звідки за допомогою азоту під тиском поступає для подальшої переробки.

Оскільки відновлення відбувається при низьких температурах, кінцева продукція володіє підвищеною пірофорністю; для оберігання отриманого порошку від подальшого окислення його нагрівають до 800 °С в середовищі захисного газу при атмосферному тиску, внаслідок чого він втрачає свою пірофорність.

Більше поширення, ніж H-Iron процес, має відновлення воднем в прохідних муфельних або трубчастих печах із зовнішнім обігрівом. Оксиди поміщають в піддони або човники, які безперервно просуваються через гарячу зону печі (відновлення в стаціонарному шарі). Водень подають з боку холодильника, і принцип протитечії забезпечує якнайповніше відновлення. Час, необхідний для повного відновлення оксидів, залежить від їх виду, розміру часток, товщини шару, температури, тиску і вологості водню, а також інших чинників. Як правило, температура відновлення (700...1000) °С, а час від 30 хв. до декількох годин. Як правило, температура відновлення (700...1000) °С, а час від 30 хв. до декількох годин.

Найбільш суттєвим недоліком відновлення оксидів заліза воднем в муфельних (трубчастих) печах є їх низька продуктивність, оскільки для рівномірного відновлення потрібен невеликий шар шихти. Процес не може бути прискорений за рахунок істотного збільшення температури відновлення

(>1000 °C), оскільки порошок спікається у брикет, який важко потім подрібнити в порошок. На практиці відновлення оксидів заліза вуглецем проводять при температурах вище 1000 °C. В цих умовах переважаючий механізм реакцій відновлення полягає в утворюванні в реакційному просторі оксиду вуглецю і відновленні оксидів заліза. Процес розвивається на основі адсорбційно-каталітичного механізму. Безпосередня взаємодія твердих оксидів з вуглецем розвивається слабо у зв'язку з нікчемно малою поверхнею зіткнення твердих речовин в шихті. Зазвичай оксиди відновлюють твердим вуглецем при (900...1000) °C або вище, у зв'язку з чим в реакційному просторі майже не спостерігається наявності діоксиду вуглецю.

Відновлення окалини або багатой залізної руди "твердим вуглецем" є найбільш поширеним і ефективним способом отримання залізного порошку. Уперше він був застосований в промисловій практиці шведською фірмою "Хоганес", а здійснений в 1951 р. на Сулинському металургійному заводі.

Сировиною служить чиста від домішок окалина прокату низьковуглецевих сталей, відновником – термоштиб (дрібні відходи при виробництві термоантрацита); для зв'язування сірки термоштиба використовують вапняк.

Оксидну сировину і відновну суміш (термоштиб + вапняк) засипають вертикальними концентричними кільцевими шарами, що не змішуються, в тиглі (капселі) діаметром 350 мм і заввишки (1500...1560) мм, виготовлені з карбїду кремнію. Сировина (~200 кг) має форму трубчастого шару. Усередині і зовні цей шар засипають відновною сумішшю (120 кг). Зразковий склад шихти в капсулі: оксидна сировина (60...69) %, термоштиб (33...25) %, вапняк (7...6) %. Капсулі закривають кришками і по 16 штук завантажують на вагонетки, які просуваються за допомогою конвеєра або штовхальниками уздовж горизонтальної тунельної печі, що обігрівається спалюваним природним газом. Тунель може мати різні розміри, наприклад довжину близько 120 м і поперечний розмір 3,25 м. В цьому випадку протяжність зони максимальної температури близько 55 м, протяжність вхідної зони підігрівання і вихідної

зони охолодження приблизно 65 м. У високотемпературній зоні температура підтримується в межах (1150...1180) °С; усередині капсуля температура нижче на (100...150) °С. В гарячій зоні вагонетки з капсулями знаходяться 44 год. Загальна тривалість перебування тиглів в печі 89 год., у тому числі час охолодження до 100 °С 25 год.

З викладеного видно, що механізм даного способу заснований на відновленні оксидів генерованого термоштибом СО, а не "твердим вуглецем". Таким чином термін "відновлення твердим вуглецем" не відповідає суті процесу, а чисто формально фіксує те, що в якості одного з початкових матеріалів в тигель (капсель) завантажують твердий вуглець (термоштиб).

Відновлення "залізом сажі". Високоактивний вуглецевий відновник - "залізо сажі", отримують з вуглецьводневих газів або шляхом їх термодиссоціації на поверхні і в порах залізної губки при (700...900) °С, або при відновленні ними окалини або магнетитового концентрату. При отриманні заліза сажі за першим способом одночасно вивільняється водень, який після очищення придатний для відновного відпалу залізних порошоків або спікання різних виробів : так, з 1 м<sup>3</sup> метану в складі природного газу утворюється 0,5 кг вуглецю сажі і 2 м<sup>3</sup> водню. При отриманні заліза сажі відновленням окисленої сировини газ, що відходить, містить Н<sub>2</sub>, СО, домішки СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>О і його можна використати як паливо. Оптимальний вміст вуглецю в залізі сажі складає (20...50) %: найбільша активність відновника спостерігається при вмісті в ньому (20...25) % вуглецю, а максимум питомої поверхні (7 м<sup>2</sup>/г) досягається при 50 % вуглецю. Тонкодисперсний вуглець (частки трубчастої форми діаметром 0,1 і завдовжки 0,2 мкм) сажі, випадаючи в порах і на поверхні часток заліза при термічній дисоціації метану, впроваджується в них і відокремити його механічним або магнітним способом практично неможливо. Основна маса вуглецю в залізі (85...90) % сажі знаходиться у вільному стані. В якості відновника залізо сажі використовують після подрібнення.

Оптимальне поєднання технічної і економічної ефективності в промисловому виробництві забезпечується при застосуванні заліза сажі зі змістом (40...50) % вуглецю.

Використання заліза сажі прискорює процес відновлення, підвищує продуктивність печі в півтора рази і одночасно дозволяє понизити температуру процесу на (100...200) °С. Попередні техніко-економічні розрахунки показують, що застосування заліза сажі в якості відновника дозволяє на (20...30) % понизити собівартість залізного порошку при істотному зниженні капітальних витрат і підвищенні продуктивності праці.

Суть комбінованого відновлення полягає в одночасній дії на початкову оксидну сировину твердого (сажа, нафтовий кокс, деревне вугілля, залізо сажі) і газоподібного (конвертований природний газ) відновників. Кількість твердого відновника в шихті еквівалентна приблизно 60 % вмісту кисню в окисній сировині (окалині), інші 40 % кисню видаляються за рахунок дії газовідновника, що поступає в піч. Уперше комбіноване відновлення було здійснене на Броварському заводі порошкової металургії. В якості твердого відновника застосовували пічну гранульовану сажу марки ТГМ-33. Для брикетування шихти з метою підвищення теплопровідності, що прискорює її нагрів в печі і одночасно зменшує займаний нею об'єм (збільшуючи продуктивність печі), використовують кам'яновугільний пек з температурою розм'якшення (65...75) °С. Поворотний залізний порошок вводять в шихту як каталізатор процесу відновлення : усувається "інкубаційний" період зародкоутворення і зростає швидкість процесу відновлення. Порція шихтових матеріалів - 1500 кг, у тому числі окалина 76,8 %, сажа 7,4 %, пік 7,4 %, залізний порошок 8,4 %) перемішується в змішувачі при (80...100) °С (для розм'якшення пека), куди через (10...15) хв. після початку змішування подають воду (покращує формованість шихти при її подальшому брикетуванні). Брикети яйцевидної форми з розмірами 40 мм х 45 мм х 60 мм завантажують в перфоровані сталеві піддони (800 мм х 650мм х 120 мм), причому для запобігання розсипу брикетів через отвори в піддон вставляють або суцільне

сталеве деко з укладеним на нього азбестовим папером (перешкоджає припіканню губки заліза, що утворюється, до дека), або пористе (~50 %) залізне деко завтовшки 0,5 мм. Другий варіант кращий: газ- відновник проникає до шихти не лише згори, але і знизу через пори дека, що прискорює відновлення в 1,5 рази; губка заліза розмелюється разом з пористим деком.

Процес відновлення проводять в горизонтальних двохмуфельних печах штовхального типу з газовим обігрівом при температурі (1100...1150) °С впродовж 8 год. (у гарячій зоні 4,5 год., в холодильнику 3,5 год.); подання холодного газівідновника в піч відбувається протитечею або його нагрівають до (700...750) °С і подають за схемою співпадаючих потоків (газ підігрівається в спеціально обладнаних каналах паливного простору самої печі відновлення і поступає в муфель цієї ж печі по ходу піддонів з відновлюваною шихтою), що прийнятніше. Після вибивання з піддонів губчасте залізо піддають двохстадійному дробленню і помолу до розміру часток менше 0,5 мм. Потім отриманий порошок проходить магнітну сепарацію, його розсіюють на фракції, усереднюють до необхідного гранулометричного складу і упаковують. На Дніпровському алюмінієвому заводі залізний порошок роблять з брикетованої шихти у вертикальних муфельних електropечах безперервної дії. Компоненти шихти (окалина (76...80) %, деревне вугілля (7...8) %, кам'яновугільний пек (7...8) % і поворотний залізний порошок <10 %) сумарною масою (1350...1450) кг завантажують в лопатевий змішувач і перемішують при (100...110) °С впродовж (45...55) хв. Приготовану шихту брикетують, як вказано вище. Брикети завантажують в прості або кільцеві перфоровані склянки (по (110...115) кг в кожну), які потім поміщають у вертикальну двох - чи чотирьохмуфельну піч. Кільцеві склянки ефективніші, оскільки наявність у них центральної перфорованої труби створює сприятливі умови для більше рівномірного відновлення окалини : брикети прогріваються не лише від зовнішньої стінки склянки, але і від стінки центральної труби, що обігрівається потоком гарячого конвертованого природного газу. Муфельна піч працює за принципом протитечії : зверху вниз рухається шихта в склянках, а від низу до

верху подається газ-відновник. Температура в печі (1000...1100) °С, загальний час відновлення (9...10) год. Після охолодження в холодильнику печі до (60...80) °С губчасте залізо змізернюють (дроблять і розмелюють) і розсіюють на середню і дрібну фракції.

Залізний порошок середньої фракції упаковують, а дрібний піддають магнітній сепарації, усереднюванню по хімічному і гранулометричному складам, після чого також упаковують.

### 1.3 Аналіз використання окалини, стружки і дрібнодисперсних відходів на резервних потужностях нагрівальних печей ПрАТ "Дніпроспецсталь"

На ПрАТ "Дніпроспецсталь" використання цих методів відновлення окалини неможливе. На території заводу немає аглодоменного цеху, тому використання відходів в агломераційному виробництві неможливе. Є можливість відновлення методом порошкової металургії. Але для організації газового і комбінованого відновлення потрібно спеціальне дороге устаткування, а твердофазне відновлення простіше в реалізації, але вимагає високих температур. Тому був проведений аналіз коефіцієнтів використання високотемпературних нагрівальних печей на ПрАТ "Дніпроспецсталь", який показав, що є деякий резерв потужностей, що відкриває перспективу можливості використання цього устаткування в процесах металізації заздалегідь підготовленої вторинної металовмісної сировини. Стає очевидною необхідність розробки і впровадження технології утилізації вторинної металовмісної сировини в умовах власного виробництва на резервному устаткуванні. В процесі реорганізації виробництва в склад КПЦ було введено устаткування ковальсько-пресового відділення цеху порошкової металургії.

Відділення деформації призначено для кування пресовок, отриманих методом порошкової металургії, злитків і заготівель швидкорізальних та інших спецсталей.

Кування металу проводять на кувальних агрегатах АКП 1250 і 500 тс (12,5 і 5,0 МН).

В склад агрегату АКП 1250 тс (12,5 МН) входять:

- прес з номінальним зусиллям 1250 тс (12,5 МН);
- кувальний маніпулятор МКП-2,5 вантажопідйомністю 2,5 тс (0,025 МН);
- електровізок з поворотним столом вантажопідйомністю 2,5 тс (0,025 МН).

Робота маніпулятора і візка з поворотним столом заблокована з роботою преса зусиллям 12,50 МН.

Агрегат BV 500/630 тс (5,0 МН) складається з:

- преса з номінальним зусиллям 500 тс (5,0 МН);
- кувального маніпулятора МКП-1,25 вантажопідйомністю 1,25 тс (0,0125 МН).

Кувальні агрегати АКП 1250 (12,50 МН) і BV 500/630 (5,0 МН) оснащені ручним дистанційним керуванням і автоматичною цілісною системою управління. Робота маніпуляторів можлива в трьох режимах: ручному, напівавтоматичному, автоматичному.

Агрегат АКП 1250 тс (12,5 МН) призначений для вільного кування пресовок, заготівель і злитків масою 0,6 т, 1,0 т і 1,9 т на товарні кування і передільну заготівлю. Агрегат BV 500/630 тс (5,0 МН) призначений для вільного кування переробної заготівлі на товарні кування і передільну заготівлю. Завантаження і вивантаження металу з печей, а також подача металу до пресів здійснюється двома шаржирмашинами вантажопідйомністю 2,0 тс (0,02 МН) кожна.

Для нагріву пресовок, злитків і заготівель під кування, а також для накопичення гарячого металу в цеху встановлені нагрівальні і накопичувальні печі, коротка характеристика яких наведена в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 - Технічна характеристика печей

Тип і призначення печі	Кількість печей, шт.	Максимальна температура, °С	Площа поду, м <sup>2</sup>	Максимальна маса садки, т
Нагрівальна двокамерна	3	1250	29,2 (2·14,6)	36 (2·18)
Нагрівальна двокамерна	3	1250	15,0 (2·7,5)	12 (2·6)
Накопичувальна двокамерна	1	900	29,2 (2·14,6)	36 (2·18)
Камерна накопичувальна	1	900	15,8	15

Параметри двокамерної печі пресу 1250 тс з площею поду 29 м<sup>2</sup> наведені в таблиці 1.5.

Двокамерна нагрівальна піч, площа поду 29,2 м<sup>2</sup> призначена для нагріву заготовок із спецсталей під кування. Піч опалюється природним газом, має дві камери, які працюють самостійно, незалежно одна від одної. Кожна камера печі обладнана пальниками низького тиску.

У відділенні ЦПМ знаходиться 4 двокамерні печі: №№ 6/1, 6/2, 7/1, 7/2, 8/1, 8/2, 9/1, 9/2. У верхньому ряду встановлено 4 пальники типа ГНП-5. У нижньому ряду встановлено 3 пальники типа ГНП-4 і 1 пальник типа ГНП-3. Пальники об'єднуються в дві регулюючі зони - верхню і нижню.

Таблиця 1.5 - Параметри двокамерної печі з площею поду 29 м<sup>2</sup>

Параметри	Величина
Тип і призначення печі	Нагрівальна піч періодичної дії зі стаціонарним подом для нагрівання металу перед ковкою
Площа активного поду, м <sup>2</sup>	14,6
Паливо	Природний газ
Максимальна витрата газу через піч, м <sup>3</sup> /год.	250
Максимальна витрата повітря через піч, м <sup>3</sup> /год.	2900
Максимальна кількість димових газів, м <sup>3</sup> /год.	3500
Тиск газу і повітря перед піччю, Па	до 4900
Температура газу перед піччю, °С	20
Метал, що нагрівається	Нержавіючі, інструментальні, конструкційні і жароміцні сталі і сплави
Тиск в печі, Па	26,5-31,4 (54...64 %)
Температура нагрівання металу, °С: при посадці при видачі	(20...700) Як нагрівальна до 1200 Як термічна (500...900)
Розміри заготовки і злитка, м Довжина Діаметр	(0,92...3,24) (0,16...0,45)
Характеристика посадки металу	Холодна і гаряча
Спосіб нагрівання металу	Відкрите нагрівання продуктами згорання
Спосіб завантаження металу	Підлогова машина
Атмосфера в печі	CO <sub>2</sub> =10,5 %, O <sub>2</sub> =2,3 %
Продуктивність печі (по режимній карті)	(0,1...1,5)

Подача повітря на горіння здійснюється установкою, що складається з двох вентиляторів (один резервний); типа ВМ-17, які обслуговують групу печей. Відбір продуктів згорання на печі проводиться через димові канали, розташовані в бічних стінках і перегородках, об'єднані під кожною камерою в загальний боров. Димові гази, проходячи далі, омивають петлевий трубчастий рекуператор РТ-50 для нагріву повітря на горіння, потім поступають в збірний боров і видаляються через димар заввишки 80 м. Технічні характеристики рекуператора наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Технічні характеристики рекуператора

Найменування	Показники
Тип рекуператора	Трубчастий петлевий РТ-50
Призначення рекуператора	Нагрів повітря
Схема руху газів в рекуператорі	Поперечно-прямоточний
Поверхня теплообміну, м <sup>2</sup>	50
Діаметр труб зовнішній, м	$57 \cdot 10^{-3}$
Товщина стінок рекуператора, м	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Матеріал (марка сталі)	12X17
Температура підігрітого повітря, °С	(350...400)
Температура диму перед рекуператором, °С	1000
Тиск повітря перед рекуператором, Па	1765
Тиск повітря після рекуператора, Па	4500
Кількість рекуператорів на печі, шт.	2

Піч працює в автоматичному режимі, що забезпечує підтримку заданих параметрів:

- температур;
- тиску в робочому просторі;
- співвідношення «газ-повітря».

Співвідношення «газ-повітря» камери 1 двокамерної нагрівальної печі №7 пресу 1250 тс показано на рис.1.1.

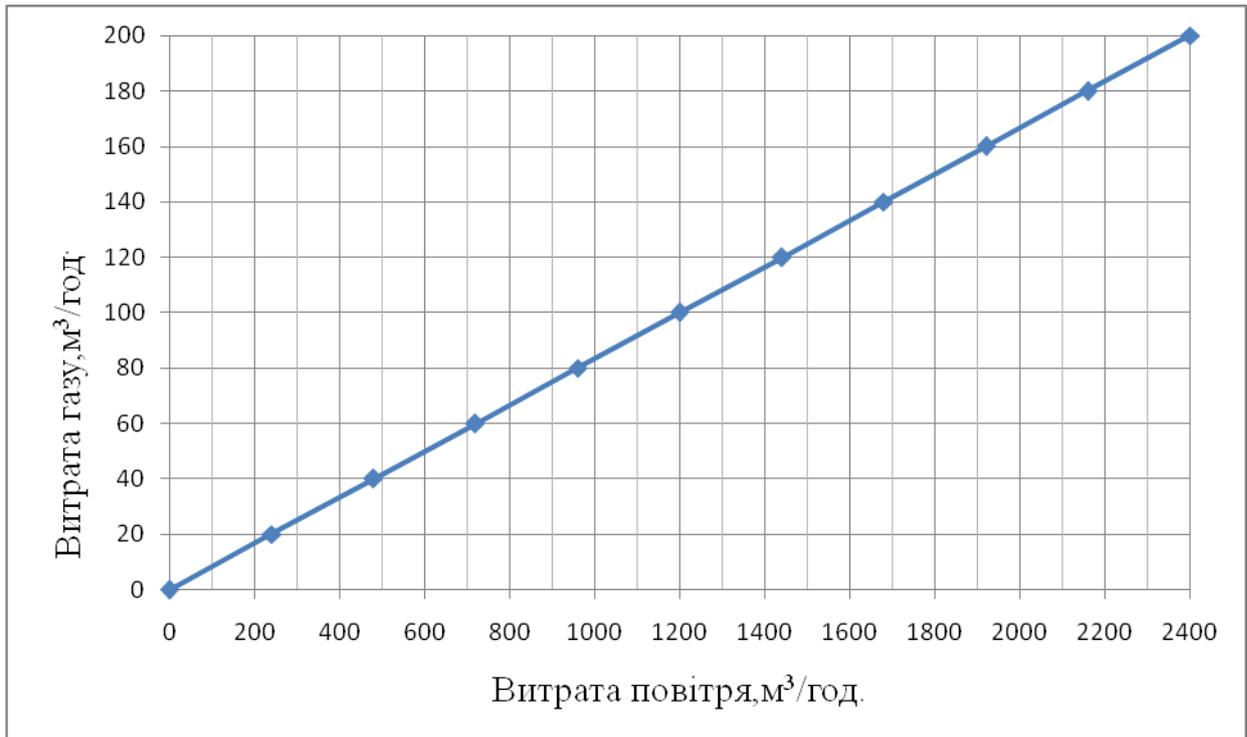


Рисунок 1.1 - Співвідношення «газ-повітря» камери 1 двокамерної нагрівальної печі №7 пресу 1250 тс

Нині пічне устаткування пресів 500 тс і 1250 тс практично не використовується і знаходиться на консервації. В той же час температурний рівень, що досягається в цих печах, достатній для здійснення процесу відновлення окалини. Тому за допомогою цього устаткування можемо проводити дослідження процесів металізації окалини.

## **РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВУГЛЕТЕРМІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКАЛИНИ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

На ПрАТ "Дніпроспецсталь" виробництво швидкорізальних сталей методом порошкової металургії супроводжується утворенням металовмісних відходів (металлоотсів різних фракцій, окалина, технологічна обрізь, металева стружка), хімічний склад яких в максимальному ступені відповідає сортаменту марок сталей, які виплавляються.

Якщо повернення металевої обрізи і різцевої стружки в металургійне виробництво не створює технологічних труднощів, то використання дрібнодисперсної абразивної стружки і окалини у складі шихти металургійної плавки без їх попередньої підготовки зв'язане зі значними втратами.

Одним з напрямів утилізації окалини високолегованих сталей, як вторинної сировини, що містить легуючі елементи, є її вуглетермічне відновлення у складі насипної шихти з подальшим використанням металізованого продукту при виплавці відповідних марок сталей [29]. Дефіцит легуючих матеріалів і їх значна вартість, а також наявність вільного парку нагрівальних печей дозволяють організувати в умовах ПрАТ "Дніпроспецсталь" випуск металізованих матеріалів і їх використання у власному сталеплавильному виробництві. У зв'язку з цим, виникає необхідність вибору складу насипної шихти і параметрів теплового режиму її відновлення.

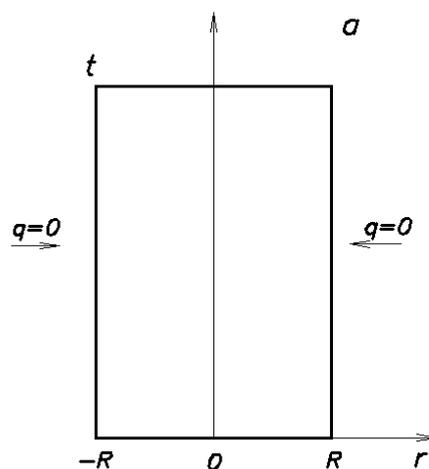
### **2.1. Моделювання процесів металізації окалини**

Вибір складу шихти і визначення параметрів режиму її теплової обробки виконали шляхом проведення лабораторних досліджень і методом математичного моделювання.

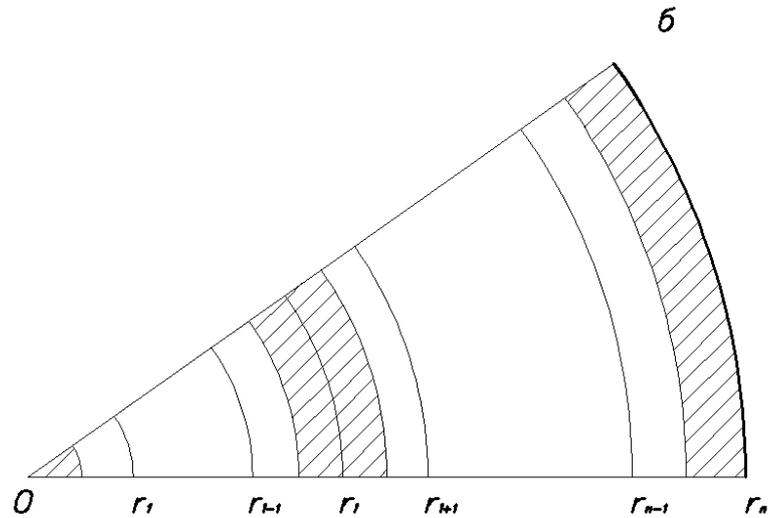
### 2.1.1 Кінцево-різницеві схеми рішення завдань нагріву

Допущення, які приймаються при математичному моделюванні нагріву різних тіл, дозволяють розглядати їх, як тіла простої форми - пластину, циліндр, кулю, і представити математичну модель внутрішнього теплообміну одновимірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності. Чисельне рішення цього рівняння виконали методом кінцевих різниць. З цією метою нижче розглянута кінцево-різницева апроксимація початкового диференціального рівняння теплопровідності для деяких характерних схем нагріву тіл простої форми.

У разі симетричного нагріву безкінечного циліндра радіусом  $R$ , розрахункова схема якого представлена на рис. 2.1, в кожен момент часу зміна температури в просторі відбувається тільки у напрямі координатної осі  $r$ , перпендикулярної до осі симетрії даного тіла.



а – розрахункова схема безкінечного циліндра



б – елементарний циліндричний шар безкінечного циліндра

Рисунок 2.1 - Розрахункова схема симетричного нагріву безкінечного циліндра

При незалежних від температури теплофізичних характеристиках рівняння нестационарної теплопровідності, що описує нагрів циліндра, має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < r < R, \quad (2.1)$$

де  $t$  – температура, °С;

$\tau$  – поточне значення часу, с;

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с;

$c'$  – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$r$  – поточне значення радіус-вектора, м;

$R$  – радіус зовнішньої поверхні циліндра, м

Рівняння (2.1) доповнили початковими умовами

$$t(r, 0) = t_n, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (2.2)$$

умовами симетрії температурного поля для  $r = 0$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.3)$$

і граничними умовами на поверхні тіла :

а) для випадку граничних умов першого роду

$$t \Big|_{r=R} = t_w; \quad (2.4)$$

б) для випадку граничних умов другого роду

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_w, \quad (2.5)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °С;

$t_w$  – температура на поверхні тіла, °С;

$q_w$  – щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла, Вт/(м<sup>2</sup>К).

У рівнянні (2.5) враховано, що при нагріві тіла зовнішній тепловий потік має протилежний напрям до осі  $r$ .

Замінімо безперервну функцію, що є рішенням крайової задачі (2.1) - (2.5), дискретною сітковою функцією. Для цього на просторово - тимчасовій сітці:

$$r_i = i \cdot \Delta r, \quad i = 0, \dots, n, \quad \Delta r = \frac{R}{n}, \quad (2.6)$$

$$\tau_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_k}{m}, \quad (2.7)$$

де  $\Delta r$  - величина кроку по координаті  $r$ , м;

$\Delta t$  - величина кроку за часом, з;  $n$  - кількість розрахункових вузлів на просторовій сітці;

$m$  - кількість розрахункових вузлів на тимчасовій сітці

з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми [25,26] представимо диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами в кінцево-різницевої формі. У даному циліндрі (рис. 2.1а), виділимо елементарний циліндричний шар завдовжки один метр, радіусом  $r_i$  і завтовшки  $\Delta r$ , що відповідає деякому  $i$ -тому внутрішньому вузлу (рис.2.1б). Для виділеного елементарного порожнистого циліндра, визначимо його основні геометричні параметри:

а) радіус елементарного циліндричного шару

$$r_i = i \cdot \Delta r; \quad (2.8)$$

б) радіус елементарного циліндричного шару

$$F_i^{6H} = 2 \cdot \pi \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \cdot 1; \quad (2.9)$$

в) площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента

$$F_i^H = 2 \cdot \pi \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \cdot 1; \quad (2.10)$$

г) об'єм виділеного елемента

$$V_i = \pi \cdot (r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2) \cdot 1 \quad (2.11)$$

Для даного елемента запишемо рівняння теплового балансу при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді

$$V_i \cdot c' \cdot (t_i^{k+1} - t_i^k) = -(Q_{i+\frac{1}{2}} - Q_{i-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta\tau, \quad (2.12)$$

де  $t_i^k$  - температура в  $i$ -тому вузлі в  $k$ -тий момент часу;

$Q_{i+\frac{1}{2}}$  - тепловий потік, що входить в  $i$ -тий елемент з боку сусіднього правого вузла через його зовнішню бічну поверхню, Вт;

$Q_{i-\frac{1}{2}}$  - тепловий потік, що виходить з  $i$ -того елемента через його внутрішню бічну поверхню і який передається сусідньому лівому вузлу, Вт.

Величини теплових потоків через бічні поверхні виділеного елемента відповідно до закону Фур'є представимо у виді :

$$Q_{i+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_{i+1}^{k+1} - t_i^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_i^H, \quad (2.13)$$

$$Q_{i-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_i^{k+1} - t_{i-1}^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_i^{SH}, \quad (2.14)$$

Підставивши вирази (2.8) - (2.11), (2.13), (2.14) в рівняння (2.12) і виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_i^{k+1} - t_i^k = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_{i+1}^{k+1} - t_i^{k+1}) \cdot \frac{2i+1}{2i} - \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_i^{k+1} - t_{i-1}^{k+1}) \cdot \frac{2i-1}{2i},$$

де  $a = \frac{\lambda}{c'}$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Позначимо:

$$f_i^+ = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot \frac{2i+1}{2i},$$

$$f_i^- = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot \frac{2i-1}{2i}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог диференціального рівняння (2.1) на внутрішніх вузлах просторово-часової сітки:

$$\bar{f}_i \cdot t_{i-1} + (1 + \bar{f}_i + f_i^+) \cdot t_i^{k+1} - f_i^+ \cdot t_{i+1}^{k+1} = t_i^k \quad (2.15)$$

Різницеве рівняння для лівого граничного вузла ( $i = 0$ ), що відповідає граничній умові на осі циліндра (2.3), отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для елементарного осьового циліндра одиничної довжини, що має радіус  $\Delta r/2$  (рис. 2.1)

$$V_0 \cdot c' \cdot (t_0^{k+1} - t_0^k) = -Q_{0+\frac{1}{2}},$$

де  $V_0 = \frac{\pi \cdot \Delta r^2}{4} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента одиничної довжини, м<sup>3</sup>;

$F_0'' = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta r}{2} \cdot 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента м<sup>2</sup>;

$Q_{0+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_1^{k+1} - t_0^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_0''$  - тепловий потік, що входить у виділений елемент з

боку сусіднього правого вузла ( $i = 1$ ), Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_0^{k+1} - t_0^k = \frac{4 \cdot \Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_1^{k+1} - t_0^{k+1})$$

Позначимо:

$$f_0^+ = \frac{2 \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot a$$

і остаточно отримаємо різницевої аналог граничної умови (2.3) для вузла  $i = 0$

$$(1 + 2 \cdot f_0^+) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f_0^+ \cdot t_i^{k+1} = t_0^k \quad (2.16)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові першого роду (2.4), для правого граничного вузла  $i = n$  має вигляд:

$$t_n^{k+1} = t_w^{k+1} \quad (2.17)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові другого роду (2.5), для правого граничного вузла  $i = n$  отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для край правого елементарного циліндричного напівшару, що має довжину один метр, радіус  $r_n$  і товщину  $\Delta r/2$

$$V_n \cdot c' \cdot (t_n^{k+1} - t_n^k) = -(Q_w - Q_{n-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta \tau,$$

де  $V_n = \pi \cdot (r_n^2 - r_{n-\frac{1}{2}}^2) \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента одиничної довжини, м<sup>3</sup>;

$F_n^H = 2 \cdot \pi \cdot r_n \cdot 1$  - площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$F_n^{SH} = 2 \cdot \pi \cdot r_{n-\frac{1}{2}} \cdot 1$  - площа внутрішньої бічної поверхні виділеного елемента,

м<sup>2</sup>;

$Q_w = -q_w F_n^H$  - тепловий потік, що відповідає граничним умовам другого роду (2.5), входить у виділений елемент через його зовнішню бічну поверхню, Вт;

$$Q_{n-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_n^{k+1} - t_{n-1}^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_n^{en} - \text{тепловий потік, що виходить з виділеного}$$

елементу через його внутрішню бічну поверхню і який передається сусідньому лівому вузлу ( $i = n - 1$ ), Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу для виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_n^{k+1} - t_n^k = \frac{8 \cdot q_w \cdot \Delta \tau}{c' \cdot \Delta r} \cdot \frac{n}{4 \cdot n - 1} - \frac{4 \cdot a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot n - 1} \cdot (t_n^{k+1} - t_{n-1}^{k+1})$$

Позначимо:

$$\bar{f}_n = \frac{2 \cdot a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot n - 1},$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot q_w \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot \frac{n}{2 \cdot n - 1}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.5) для вузла  $i = n$

$$-2 \cdot \bar{f}_n \cdot t_{n-1}^{k+1} + (1 + 2 \cdot \bar{f}_n) \cdot t_n^{k+1} = t_n^k + 2 \cdot \bar{f}_n \cdot \Delta t. \quad (2.18)$$

Розрахунок дискретного температурного поля на кожному кроці за часом робимо шляхом спільного рішення системи рівнянь (2.15) - (2.18) методом прогону, суть якого полягає в тому, що вказана система рівнянь представляється у вигляді:

$$t_i^{k+1} = \alpha_i \cdot t_{i+1}^{k+1} + \beta_i, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (2.19)$$

де  $\alpha_i, \beta_i$  - коефіцієнти прогону.

Для вузла  $i = 0$  величини  $\alpha_i, \beta_i$  знайдемо з дискретного аналога граничної умови на осі циліндра (2.16), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_0^{k+1} = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+} \cdot t_1^{k+1} + \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f_0^+}.$$

Звідси:

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f_0^+} \quad (2.20)$$

Для внутрішніх вузлів  $i = 1, \dots, n - 1$  величини  $\alpha_i, \beta_i$  знайдемо з дискретного аналога диференціального рівняння теплопровідності (2.15), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_i^{k+1} = \frac{f_i^+}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})} \cdot t_{i+1}^{k+1} + \frac{t_i^k + f_i^- \cdot \beta_{i-1}}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}.$$

Звідси:

$$\alpha_i = \frac{f_i^+}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}; \quad \beta_i = \frac{t_i^k + f_i^- \cdot \beta_{i-1}}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})} \quad (2.21)$$

Температуру у граничному вузлі  $i = n$  визначили залежно від виду граничних умов :

а) для граничних умов першого роду - по рівнянню (2.17);

б) для граничних умов другого роду:

$$t_n^{k+1} = \frac{t_n^k + 2 \cdot f_n^- \cdot (\Delta t + \beta_{n-1})}{1 + 2 \cdot f_n^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.22)$$

Рішення системи різницевих рівнянь (2.15) - (2.18), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

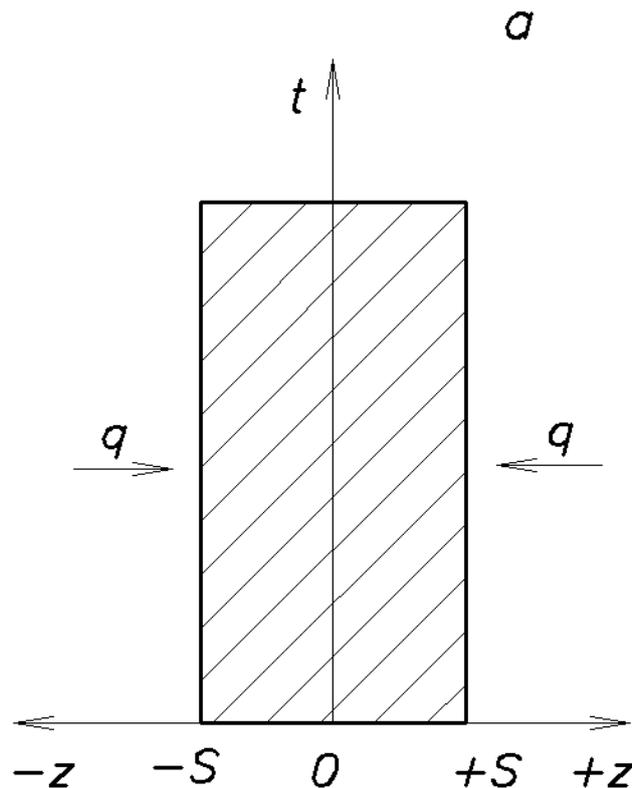
а) при зміні  $i = 0, \dots, n - 1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.20) і (2.21) вчислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_i, \beta_i$ ;

б) для граничного вузла  $i = n$  по рівнянню (2.17) або (2.22) визначили температуру  $t_n$ ;

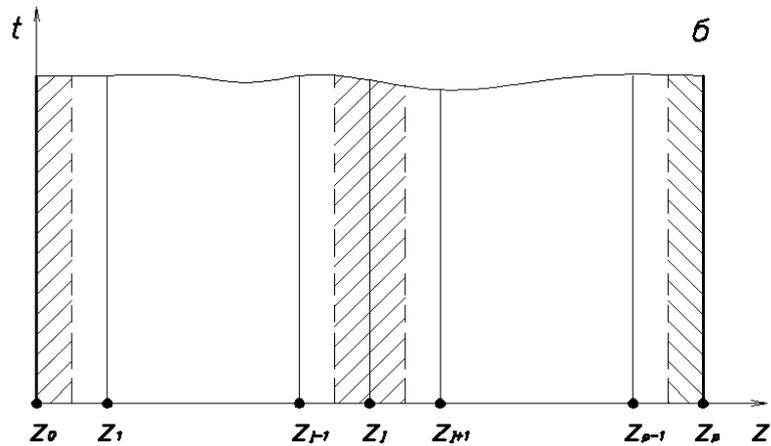
в) при зміні  $i = n - 1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_i$ .

Після цієї процедури робиться перехід до наступного кроку за часом.

У разі симетричного нагріву безкінечної пластини завтовшки  $2S$ , розрахункова схема якої представлена на рис. 2.2, в кожен момент часу зміна температури в просторі відбувається тільки у напрямі координатної осі  $z$ , перпендикулярною до поверхні даного тіла.



А - розрахункова схема безкінечної пластини



Б – елементарний шар безкінечної пластини

Рисунок 2.2 – Розрахункова схема симетричного нагріву безкінечної пластини

При незалежних від температури теплофізичних характеристиках рівняння нестационарної теплопровідності, що описує нагрів нескінченної пластини, має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < z < S, \quad (2.23)$$

де  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – поточне значення часу, с;

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с;

$c'$  – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$z$  – поточне значення координати, м;

$S$  – половина товщини пластини, м.

Рівняння (1.23) доповнили початковими умовами

$$t(z, 0) = t_n, \quad 0 \leq z \leq S, \quad (2.24)$$

умовами симетрії температурного поля для  $z = 0$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (2.25)$$

і граничними умовами на поверхні тіла:

а) для випадку граничних умов першого роду

$$t \Big|_{z=S} = t_w; \quad (2.26)$$

б) для випадку граничних умов другого роду

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S} = q_w, \quad (2.27)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °С;

$t_w$  – температура на поверхні тіла, °С;

$q_w$  – щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла, Вт/(м<sup>2</sup>К)

У рівнянні (2.27) враховано, що при нагріві тіла зовнішній тепловий потік має напрям, який протилежний до осі  $z$ .

Замінімо безперервну функцію, що є рішенням крайової задачі (2.23) - (2.27), дискретною сітковою функцією. Для цього на просторово-тимчасовій сітці:

$$z_j = j \cdot \Delta z, \quad j = 0, \dots, p, \quad \Delta z = \frac{S}{p}, \quad (2.28)$$

$$\tau_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_{\kappa}}{m}, \quad (2.29)$$

де  $\Delta z$  – величина кроку по координаті  $z$ , м;

$\Delta \tau$  – величина кроку за часом, с;

$p$  – кількість розрахункових вузлів на просторовій сітці;

$m$  – кількість розрахункових вузлів на тимчасовій сітці  
з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми представимо диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами в кінцево-різницевої формі.

У даній області пластини, рис. 2.2, виділимо елементарний плоский шар завтовшки  $\Delta z$ , що відповідає деякому  $j$ -тому внутрішньому вузлу. Для виділеного елементарного шару визначимо його основні геометричні параметри, що доводяться на одиницю площі поперечного перерізу пластини:

а) радіус-вектор елементарного плоского шару

$$z_j = j \cdot \Delta z; \quad (2.30)$$

б) площа внутрішньої бічної поверхні виділеного елемента

$$F_j^{en} = 1; \quad (2.31)$$

в) площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента

$$F_j^n = 1; \quad (2.32)$$

г) об'єм виділеного елемента

$$V_j = \Delta z \cdot 1 \quad (2.33)$$

Для даного елемента запишемо рівняння теплового балансу при переході від  $k$ -того до  $k + 1$ -го моменту часу у виді

$$V_j \cdot c' \cdot (t_j^{k+1} - t_j^k) = -(Q_{j+\frac{1}{2}} - Q_{j-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta \tau, \quad (2.34)$$

де  $t_j^k$  – температура в  $j$ - тому вузлі в  $k$ - тий момент часу;

$Q_{j+\frac{1}{2}}$  – тепловий потік, що входить в  $j$ - тий елемент через його зовнішню

бічну поверхню з боку сусіднього правого вузла, Вт;

$Q_{j-\frac{1}{2}}$  – тепловий потік, що виходить з  $j$ - того елемента через його внутрішню

бічну поверхню і який передається сусідньому лівому вузлу, Вт.

Величини щільності теплових потоків через бічні поверхні виділеного елемента відповідно до закону Фур'є представимо у виді:

$$Q_{j+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_{j+1}^{k+1} - t_j^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_j^H, \quad (2.35)$$

$$Q_{j-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_j^{k+1} - t_{j-1}^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_j^{SH}. \quad (2.36)$$

Підставивши вирази (2.30) - (2.33), (2.34), (2.35) в рівняння (2.34) і виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_j^{k+1} - t_j^k = \frac{\Delta \tau \cdot a}{\Delta z^2} \cdot (t_{i+1}^{k+1} - 2 \cdot t_i^{k+1} + t_{i-1}^{k+1}),$$

де  $a = \frac{\lambda}{c'}$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Позначимо:

$$f = \frac{\Delta \tau \cdot a}{\Delta z^2}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог диференціального рівняння (2.23) на внутрішніх вузлах просторово-часової сітки

$$f \cdot t_{j-1} + (1 + 2 \cdot f) \cdot t_j^{k+1} - f \cdot t_{j+1}^{k+1} = t_j^k \quad (2.37)$$

Різницеве рівняння для лівого граничного вузла ( $j = 0$ ), що відповідає граничній умові в площині симетрії (2.25), отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для елемента крайнього лівого напівшару  $\Delta z/2$ , що має одиничну площу бічної поверхні (рис. 2.2)

$$V_0 \cdot c' \cdot (t_0^{k+1} - t_0^k) = -Q_{0+\frac{1}{2}},$$

де  $V_0 = \frac{\Delta z}{2} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента, м<sup>3</sup>;

$F_0'' = 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$Q_{0+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_1^{k+1} - t_0^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_0''$  - тепловий потік, що входить у виділений елемент з

боку сусіднього правого вузла ( $j = 1$ ), Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_0^{k+1} - t_0^k = \frac{2 \cdot \Delta \tau \cdot a}{\Delta z^2} \cdot (t_1^{k+1} - t_0^{k+1}).$$

Позначимо:

$$f = \frac{\Delta \tau}{\Delta z^2} \cdot a$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.25) для вузла  $j = 0$

$$(1 + 2 \cdot f) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f \cdot t_1^{k+1} = t_0^k. \quad (2.38)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові першого роду (2.26), для правого граничного вузла  $j = p$  має вигляд:

$$t_p^{k+1} = t_w^{k+1}. \quad (2.39)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові другого роду (2.27), для правого граничного вузла  $j=p$  отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для елемента край правого напівшару завтовшки  $\Delta z/2$ , що має одиничну площу бічної поверхні (рис. 2.2)

$$V_p \cdot c' \cdot (t_p^{k+1} - t_p^k) = -(Q_w - Q_{p-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta \tau,$$

де  $V_p = \frac{\Delta z}{2} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента, м<sup>3</sup>;

$F_p^H = 1$  - площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$F_p^{en} = 1$  - площа внутрішньої бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$Q_w = -q_w F_p^H$  - тепловий потік, що відповідає граничним умовам другого роду (2.27), входить у виділений елемент через його зовнішню бічну поверхню, Вт;

$Q_{p-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_p^{k+1} - t_{p-1}^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_p^{en}$  - тепловий потік, що виходить з виділеного

елементу і який передається сусідньому лівому вузлу ( $j=p-1$ ) через внутрішню бічну поверхню, Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу для виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді:

$$t_p^{k+1} - t_p^k = \frac{2 \cdot q_w \cdot \Delta \tau}{c' \cdot \Delta z} - \frac{2 \cdot a \cdot \Delta \tau}{\Delta z^2} \cdot (t_p^{k+1} - t_{p-1}^{k+1}).$$

Позначимо:

$$f = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta z^2};$$

$$\Delta t = \frac{q_w \cdot \Delta z}{\lambda}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.27) для вузла  $j = p$

$$-2 \cdot f \cdot t_{p-1}^{k+1} + (1 + 2 \cdot f) \cdot t_p^{k+1} = t_p^k + 2 \cdot f \cdot \Delta t. \quad (2.40)$$

Розрахунок дискретного температурного поля на кожному кроці за часом проводимо шляхом спільного рішення системи рівнянь (2.37) - (2.40) методом прогону.

Для вузла  $i = 0$  величин коефіцієнтів прогону знайдемо з дискретного аналога граничної умови (2.25), представленій у формі рівняння (2.19)

$$t_0^{k+1} = \frac{2 \cdot f}{1 + 2 \cdot f} \cdot t_1^{k+1} + \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f}.$$

Звідси:

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f}{1 + 2 \cdot f}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f}. \quad (2.41)$$

Для внутрішніх вузлів  $j = 1, \dots, p-1$  величини  $\alpha_j, \beta_j$  знайдемо з дискретного аналога диференціального рівняння теплопровідності (2.23), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_j^{k+1} = \frac{f}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{j-1})} \cdot t_{j+1}^{k+1} + \frac{t_j^k + f \cdot \beta_{j-1}}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{j-1})}.$$

Звідси:

$$\alpha_j = \frac{f}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{j-1})}; \quad \beta_j = \frac{t_j^k + f \cdot \beta_{j-1}}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{j-1})}. \quad (2.42)$$

Температуру у граничному вузлі  $j = p$  визначили залежно від виду граничних умов:

- а) для граничних умов першого роду - по рівнянню (2.39);
- б) для граничних умов другого роду:

$$t_p^{k+1} = \frac{t_p^k + 2 \cdot f \cdot (\Delta t + \beta_{p-1})}{1 + 2 \cdot f \cdot (1 - \alpha_{j-1})}. \quad (2.43)$$

Рішення системи різницевих рівнянь (2.37) - (2.40), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

- а) при зміні  $j = 0, \dots, p-1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.41) і (2.42) вчислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_j, \beta_j$ ;
- б) для граничного вузла  $j = p$  по рівнянню (2.39) або (2.43) визначили температуру  $t_p$ ;
- в) при зміні  $j = p - 1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_j$ .

Після цієї процедури робиться перехід до наступного кроку за часом.

У разі нагріву безкінечної двошарової пластини загальною товщиною  $S$ , розрахункова схема якої представлена на рис. 2.3, в кожен момент часу зміна температури в просторі  $t(z, \tau)$  відбувається тільки у напрямі координатної осі  $z$ , перпендикулярною до поверхні даного тіла. При незалежних від температури теплофізичних характеристиках  $\lambda, c'$  рівняння нестационарної теплопровідності, що описує нагрів нескінченної двошарової пластини, має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < z < (S_1 + S_2) \quad (2.44)$$

де  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – поточне значення часу, с;

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с;

$c'$  – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$z$  – поточне значення координати, м;

$S$  – товщина двошарової пластини, м;

$S_1$  – товщина першого шару, м;

$S_2$  – товщина другого шару, м.

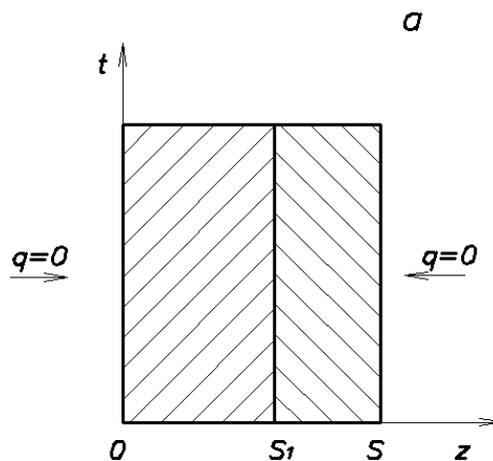


Рисунок 2.3 – Схема розрахунку температурного поля безкінечної двошарової пластини за адіабатних умов на її поверхнях

Рівняння (2.44) доповнили:

а) початковими умовами

$$t(z, 0) = t_n, \quad 0 \leq z \leq (S_1 + S_2); \quad (2.45)$$

б) граничними умовами на поверхні  $z = 0$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (2.46)$$

де  $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності першого шару, Вт/(мК);

в) граничними умовами на поверхні тіла  $z = S$

$$\lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S} = 0, \quad (2.47)$$

де  $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності другого шару, Вт/(мК);

г) граничними умовами четвертого роду в площині зіткнення шарів  $z = S_1$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S_1} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S_1}. \quad (2.48)$$

Замінімо безперервну функцію  $t(r, \tau)$ , що є рішенням крайової задачі (2.44) - (2.48), дискретною сітковою функцією  $t_j^k$ . Для цього на просторово-тимчасовій сітці:

$$z_j = j \cdot \Delta z, \quad j = 0, \dots, p_1, \dots, p, \quad \Delta z = \frac{S}{p}; \quad (2.49)$$

$$\tau_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_\kappa}{m} \quad (2.50)$$

з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми представили диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами в кінцево-різницевої формі. У рівнянні (2.49) величина  $p_1$  відповідає номеру вузла на межі між окремими шарами пластини.

Застосовуючи раніше використаний підхід, виділили в двошаровій пластині, рис. 2.3, елементарні плоскі шари для внутрішніх і пограничних вузлів і записали для них рівняння теплового балансу. З урахуванням геометричних характеристик, виділених для аналізу елементів, зробили перетворення алгебри і отримали відповідні різницеві рівняння і коефіцієнти прогону :

1. Для граничного вузла  $j = 0$

$$(1+2 \cdot f) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f \cdot t_1^{k+1} = t_0^k; \quad (2.51)$$

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f}{1+2 \cdot f}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k}{1+2 \cdot f}. \quad (2.52)$$

2. Для внутрішніх вузлів першого шару  $j = 1, \dots, p_1 - 1$ ,  $j = p_1 + 1, \dots, p - 1$  і внутрішніх вузлів другого шару

$$f \cdot t_{j-1} + (1+2 \cdot f) \cdot t_j^{k+1} - f \cdot t_{j+1}^{k+1} = t_j^k; \quad (2.53)$$

$$\alpha_j = \frac{f}{1+f \cdot (2-\alpha_{j-1})}; \quad \beta_j = \frac{t_j^k + f \cdot \beta_{j-1}}{1+f \cdot (2-\alpha_{j-1})}. \quad (2.54)$$

3. Температуру в граничному вузлі  $j = p$  і різницеве рівняння визначили у виді

$$t_p^{k+1} = \frac{t_p^k + 2 \cdot f \cdot \beta_{p-1}}{1+2 \cdot f \cdot (1-\alpha_{j-1})}; \quad (2.55)$$

$$-2 \cdot f \cdot t_{p-1}^{k+1} + (1+2 \cdot f) \cdot t_p^{k+1} = t_p^k, \quad (2.56)$$

де

$$f = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta z^2}$$

Різницеве рівняння для граничного вузла  $j = p_l$ , що відповідає граничній умові четвертого роду (2.48), отримали, записавши рівняння теплового балансу для елементарного складеного шару (рис. 2.3). Він складається з двох напівшарів з товщиною  $\Delta z/2$ , що відносяться до обох складових частин пластини

$$V_{p_1} \cdot c'_1 \cdot (t_{p_1}^{k+1} - t_{p_1}^k) + V_{p_1} \cdot c'_2 \cdot (t_{p_1}^{k+1} - t_{p_1}^k) = - (Q_{p_1+\frac{1}{2}} - Q_{p_1-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta \tau,$$

де  $V_{p_1} = \frac{\Delta z}{2} \cdot 1$  - об'єм виділеного з напівшару елемента, м<sup>3</sup>;

$F_{p_1}^H = 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$Q_{p_1+\frac{1}{2}} = -\lambda_2 \cdot \frac{t_{p_1+1}^{k+1} - t_{p_1}^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_{p_1}^H$  - тепловий потік, що входить у виділений елемент

з боку сусіднього правого вузла ( $j = p_l + 1$ ), Вт;

$Q_{p_1-\frac{1}{2}} = -\lambda_1 \cdot \frac{t_{p_1}^{k+1} - t_{p_1-1}^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_{p_1}^H$  - тепловий потік, що виходить з виділеного

елементу і який передається сусідньому лівому вузлу ( $j = p_l - 1$ ), Вт .

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k + 1$ -го моменту часу у виді:

$$-f_1 \cdot t_{p_1-1}^k + (1 + f_1 + f_2) \cdot t_{p_1}^{k+1} - f_2 \cdot t_{p_1+1}^{k+1} = t_{p_1}^k, \quad (2.57)$$

де

$$f_1 = \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \Delta \tau}{(c'_1 + c'_2) \cdot \Delta z},$$

$$f_2 = \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot \Delta \tau}{(c'_1 + c'_2) \cdot \Delta z}$$

Для граничного вузла  $j = p_1$  величини коефіцієнтів прогону  $\alpha_{p_1}, \beta_{p_1}$  знайдемо з дискретного аналога диференціального рівняння теплопровідності (2.57), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_{p_1}^{k+1} = \frac{f_2}{1 + f_2 + f_1 \cdot (1 - \alpha_{p_1-1})} \cdot t_{p_1+1}^{k+1} + \frac{t_{p_1}^k + f_1 \cdot \beta_{p_1-1}}{1 + f_2 + f_1 \cdot (1 - \alpha_{p_1-1})}.$$

Звідси:

$$\alpha_{p_1} = \frac{f_2}{1 + f_2 + f_1 \cdot (1 - \alpha_{p_1-1})}; \quad \beta_{p_1} = \frac{t_{p_1}^k + f_1 \cdot \beta_{p_1-1}}{1 + f_2 + f_1 \cdot (1 - \alpha_{p_1-1})}. \quad (2.58)$$

Рішення системи різницевих рівнянь (2.51), (2.53), (2.56), (2.57), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

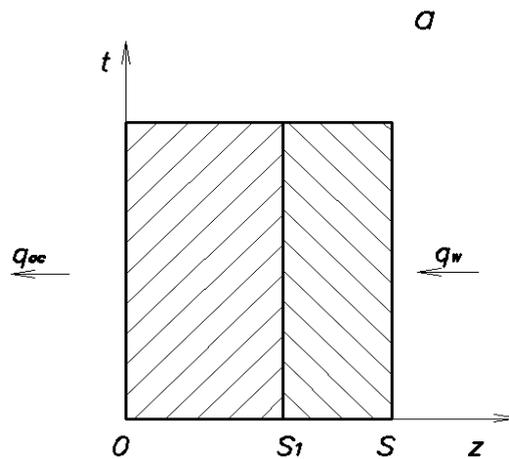
а) при зміні  $j = 0, \dots, p-1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.52), (2.54) і (2.58) вичислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_j, \beta_j$ ;

б) для граничного вузла  $j = p$  по рівнянню (2.55) визначили температуру  $t_p$ ;

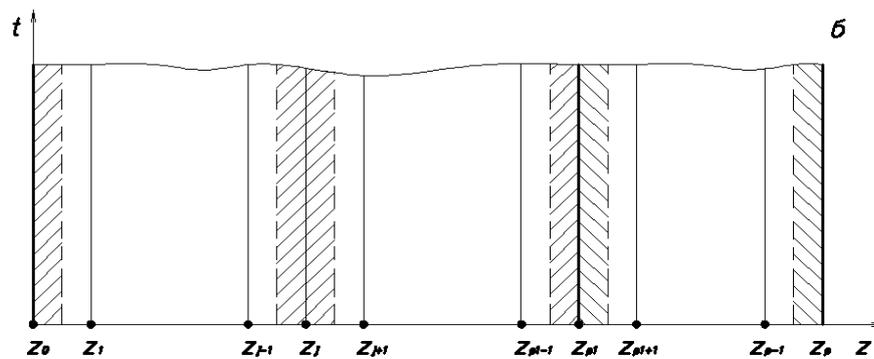
в) при зміні  $j = p-1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_j$ .

Після цієї процедури робиться перехід до наступного кроку за часом.

У разі несиметричного нагріву нескінченної двошарової пластини загальною товщиною  $S$ , розрахункова схема якої представлена на рис. 2.4а, в кожен момент часу зміна температури в просторі відбувається тільки у напрямі координатної осі  $z$ , перпендикулярною до поверхні даного тіла.



а - схема двошарової пластини



б - елементарні плоскі шари двошарової пластини

Рисунок 2.4 - Розрахункова схема несиметричного нагріву безкінечної двошарової пластини

З урахуванням залежності теплофізичних характеристик тіла  $\lambda(t)$ ,  $c'(t)$  від температури рівняння нестационарної теплопровідності, що описує несиметричний нагрів нескінченної двошарової пластини, має вигляд:

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right], \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < z < (S_1 + S_2) \quad , \quad (2.59)$$

де  $t$  – температура, °С;

$\tau$  – поточне значення часу, с;

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с;

$c'$  - питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>К);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

$z$  – поточне значення координати, м;

$S$  – товщина двошарової пластини, м;

$S_1$  – товщина першого шару, м;

$S_2$  – товщина другого шару, м.

У даному випадку диференціальне рівняння (2.59) доповнили:

а) початковими умовами

$$t(z, 0) = t_n, \quad 0 \leq z \leq (S_1 + S_2); \quad (2.60)$$

б) граничними умовами на поверхні  $z = 0$ , що граничить з довкіллям

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{o.c.} \cdot (t_{n.n} - t_{o.c.}), \quad (2.61)$$

в) граничними умовами на поверхні  $z = S$ , гріючого середовища, що граничить з об'ємом

$$\lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S} = q_w; \quad (2.62)$$

г) граничними умовами четвертого роду в площині зіткнення шарів  $z = S_1$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S_1} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S_1}, \quad (2.63)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °С;

$\alpha_{o.c.} = 2,56 \cdot (t_{n.n} - t_{o.c.}) + 4,65 \cdot \frac{\left(\frac{t_{n.n} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{o.c.} + 273}{100}\right)^4}{t_{n.n} - t_{o.c.}}$  - коефіцієнт тепловіддачі

випромінюванням і конвекцією від зовнішньої поверхні пластини [18],  
 $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;

$t_{n.n}$  – температура зовнішньої поверхні пластини  $z = 0$ , °С;

$t_{o.c}$  – температура довкілля, °С;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності першого шару пластини,  $\text{Вт}/(\text{мК})$ ;

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності другого шару пластини  $\text{Вт}/(\text{мК})$ ;

$q_w$  – щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла  $z = S$ ,  
 $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;

$q_{o.c}$  – щільність теплового потоку з поверхні  $z = 0$ , що втрачається тілом в  
довкілля,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$

У рівняннях (2.61), (2.62) враховано, що при нагріві і охолодженні тіла  
зовнішні теплові потоки мають напрям протилежне до осі  $z$ .

Замінімо безперервну функцію  $t(r, \tau)$ , що є рішенням крайової задачі  
(2.59) - (2.63), дискретною сітковою функцією  $t_j^k$ . Для цього на просторово-  
тимчасовій сітці:

$$z_j = j \cdot \Delta z, \quad j = 0, \dots, p1, \dots, p, \quad \Delta z = \frac{S}{p}, \quad (2.64)$$

$$\tau_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_k}{m} \quad (2.65)$$

з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми представили  
диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами  
в кінечно-різницевій формі. У рівнянні (2.64) величина  $p1$  відповідає номеру  
вузла на межі між окремими шарами пластини.

Застосовуючи раніше використаний підхід, виділили в двошаровій  
пластині, рис. 2.4б, елементарні плоскі шари для внутрішніх і пограничних  
вузлів і записали для них рівняння теплового балансу. З урахуванням  
геометричних характеристик, виділених для аналізу елементів, зробили

перетворення алгебри і отримали відповідні різницеві рівняння і коефіцієнти прогону :

1. Для внутрішніх вузлів першого шару  $j = 1, \dots, p1 - 1$ , і внутрішніх вузлів другого шару  $j = p1 + 1, \dots, p - 1$

$$-f_j^- \cdot t_{j-1}^{k+1} + (1 + f_j^+ + f_j^-) \cdot t_j^{k+1} - f_j^+ \cdot t_{j+1}^{k+1} = t_j^k, \quad (2.66)$$

$$\alpha_j = \frac{f_j^+}{1 + f_j^+ + f_j^- \cdot (1 - \alpha_{j-1})}, \quad \beta_j = \frac{t_j^k + f_j^- \cdot \beta_{j-1}}{1 + f_j^+ + f_j^- \cdot (1 - \alpha_{j-1})}, \quad (2.67)$$

де

$$f_j^- = \lambda_j^- \cdot \frac{\Delta \tau}{c' \cdot \Delta z^2}, \quad f_j^+ = \lambda_j^+ \cdot \frac{\Delta \tau}{c' \cdot \Delta z^2};$$

$$\lambda_j^- = \lambda \left( \frac{t_j^{k+1} + t_{j-1}^{k+1}}{2} \right), \quad \lambda_j^+ = \lambda \left( \frac{t_j^{k+1} + t_{j+1}^{k+1}}{2} \right), \quad c' = c'(t_j^{k+1}).$$

2. Для граничного вузла  $j = p1$

$$-f_{p1}^+ \cdot t_{p1-1}^{k+1} + (1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^-) \cdot t_{p1}^{k+1} - f_{p1}^+ \cdot t_{p1+1}^{k+1} = t_{p1}^k \quad (2.68)$$

$$\alpha_{p1} = \frac{f_{p1}^+}{1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^- \cdot (1 - \alpha_{p1-1})}; \quad \beta_{p1} = \frac{t_{p1}^k + f_{p1}^- \cdot \beta_{p1-1}}{1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^- \cdot (1 - \alpha_{p1-1})}, \quad (2.69)$$

де

$$f_{p1}^- = \frac{2 \cdot \lambda_{1p1}^- \cdot \Delta \tau}{(c'_{1p1} + c'_{2p1}) \cdot \Delta z}, \quad f_{p1}^+ = \frac{2 \cdot \lambda_{2p1}^+ \cdot \Delta \tau}{(c'_{1p1} + c'_{2p1}) \cdot \Delta z},$$

$$\lambda_{1p1}^- = \lambda_1 \left( \frac{t_{p1}^{k+1} + t_{p1-1}^{k+1}}{2} \right), \quad \lambda_{2p1}^+ = \lambda_2 \left( \frac{t_{p1}^{k+1} + t_{p1+1}^{k+1}}{2} \right), \quad c'_{1p1} = c'_1(t_{p1}^{k+1}) \quad c'_{2p1} = c'_2(t_{p1}^{k+1}).$$

3. Температуру і різницеве рівняння для граничного вузла  $j = p$  визначили у виді

$$t_p^{k+1} = \frac{t_p^k + 2 \cdot f_p^- \cdot (\Delta t + \beta_{p-1})}{1 + 2 \cdot f_p^- \cdot (1 - \alpha_{p-1})}, \quad (2.70)$$

$$-2 \cdot f_p^- \cdot t_{p-1}^{k+1} + (1 + 2 \cdot f_p^-) \cdot t_p^{k+1} = t_p^k + 2 \cdot f_p^- \cdot \Delta t, \quad (2.71)$$

де

$$f_p^- = \lambda_{2p}^- \cdot \frac{\Delta \tau}{c'_{2p} \cdot \Delta z^2}, \quad \lambda_{2p}^- = \lambda_2 \left( \frac{t_p^{k+1} + t_{p-1}^{k+1}}{2} \right), \quad c'_{2p} = c'_2(t_p^{k+1}),$$

$$\Delta t = \frac{q_w \cdot \Delta z}{\lambda_p^-}$$

Різницеве рівняння для граничного вузла  $j = 0$ , що відповідає граничній умові третього роду (2.61), отримали, записавши рівняння теплового балансу для елементарного пограничного напівшару завтовшки  $\Delta z/2$  (рис. 2.4б)

$$V_0 \cdot c'_1 \cdot (t_0^{k+1} - t_0^k) = - (Q_{0+\frac{1}{2}} - Q_{o.c.}) \cdot \Delta \tau,$$

де  $V_0 = \frac{\Delta z}{2} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента, м<sup>3</sup>;

$F_0^H = 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>;

$Q_{0+\frac{1}{2}} = -\lambda_{1,0}^+ \cdot \frac{t_1^{k+1} - t_0^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_0^H$  - тепловий потік, що входить у виділений елемент з

боку сусіднього правого вузла ( $j = 1$ ), Вт;

$Q_{o.c.} = -\alpha_{o.c.} \cdot (t_0^{k+1} - t_{o.c.}) \cdot F_0^H$  -, тепловий потік, що виходить з виділеного елемента і передаваний в довкілля, Вт

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k + 1$ -го моменту часу у виді:

$$t_0^{k+1} - t_0^k = \frac{2 \cdot \Delta \tau \cdot \lambda_{1,0}^+}{c'_{1,0} \cdot \Delta z^2} \cdot (t_1^{k+1} - t_0^{k+1}) - \frac{2 \cdot \Delta \tau \cdot \alpha_{o.c.}}{c'_{1,0} \cdot \Delta z} \cdot (t_0^{k+1} - t_{o.c.}),$$

де

$$\lambda_{1,0}^+ = \lambda_1 \left( \frac{t_0^{k+1} + t_1^{k+1}}{2} \right), \quad c'_{1,0} = c'_1(t_0^{k+1}).$$

Позначимо:

$$f_0^+ = \frac{\lambda_{1,0}^+ \cdot \Delta \tau}{c'_{1,0} \cdot \Delta z^2};$$

$$b = \frac{\alpha_{o.c} \cdot \Delta z}{\lambda_{1,0}^+}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.61) для вузла  $j = 0$

$$(1 + 2 \cdot f_0^+ + 2 \cdot f_0^+ \cdot b) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f_0^+ \cdot t_1^{k+1} = t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c} . \quad (2.72)$$

Для граничного вузла  $j = 0$  величин коефіцієнтів прогону знайдемо з дискретного аналога граничної умови (2.61), представленій у формі рівняння (2.19)

$$t_0^{k+1} = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)} \cdot t_1^{k+1} + \frac{t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c}}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)} .$$

Звідси:

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c}}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)} . \quad (2.73)$$

Рішення системи різницевих рівнянь(2.66),(2.68),(2.71),(2.72), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

а) при зміні  $j = 0, \dots, p - 1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.67), (2.69) і (2.73) вичислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_j, \beta_j$ ;

б) для граничного вузла  $j = p$  по рівнянню (2.70) визначили температуру  $t_p$ ;

в) при зміні  $j = p - 1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_j$ .

Після цієї процедури робиться перехід до наступного кроку за часом.

### 2.1.2 Математична модель вуглетермічного відновлення окалини в умовах двокамерної нагрівальної печі

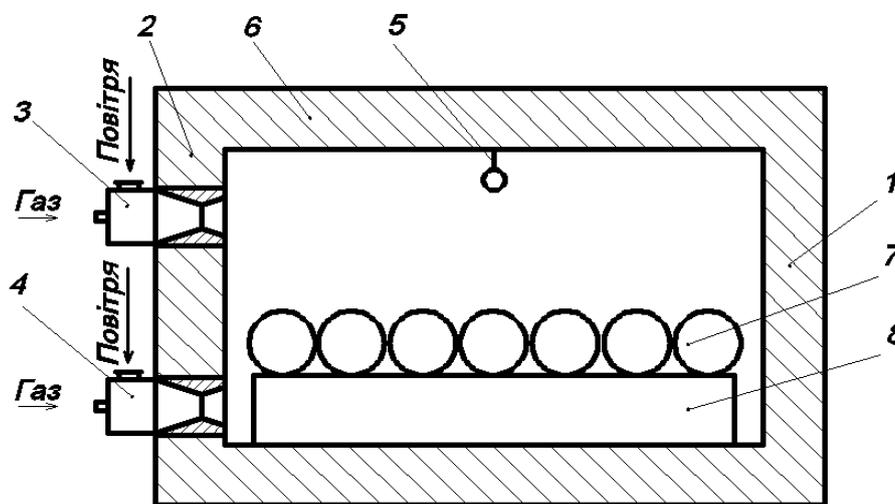
Процес вуглетермічного відновлення окалини включає: підготовку окалиновмісної шихти (надалі шихта) і її теплову обробку по певному температурному режиму.

Двокамерні нагрівальні печі з площею активного поду  $29 \text{ м}^2$  призначені для нагріву зливків і заготівель перед куванням. У сучасних економічних умовах на ПрАТ "Дніпроспецсталь" це устаткування знаходиться на консервації і може бути використане з метою нагріву і металізації окалини.

Схема робочої камери двокамерної нагрівальної печі представлена на рис. 2.5.

Піч складається з двох камер, що мають загальну бічну розділову стінку (1). Кожна з камер печі обладнана незалежними системами опалювання і відведення продуктів згорання. Піч опалюється природним газом з теплотворною здатністю  $35,6 \text{ МДж/м}^3$ . Витрата газу в кожній камері регулюється незалежною системою автоматичного управління, яка в комплекті з термоелектричним термометром (5), встановленому в підвісному зведенні (6), забезпечує необхідний температурний рівень. Продукти згорання удаляються

через вікна, рівномірно розташовані уздовж бічних стін. Повітря, що йде на горіння, підігрівається в петлевому рекуператорі, встановленому в димовому борві. Система опалювання складається з восьми пальників, встановлених в два ряди по висоті камери на бічній стінці (2). У верхньому ряду чотири пальники ГНП - 5 утворюють верхню (3), в нижньому - чотири пальники ГНП - 3, відповідно, нижню (4) зони опалювання. Наявність верхньої і нижньої зон опалювання забезпечує двосторонній нагрів садіння печі (7), розташованої на подових брусах.



1-бічна розділова стінка; 2 - бічна стінка з боку установки пальників; 3 - верхня зона опалювання; 4 - нижня зона опалювання; 5 - термоелектричний термометр;  
6 - зведення; 7 - садіння печі; 8 - подові бруси.

Рисунок 2.5 - Схема робочої камери двокамерної нагрівальної печі

Розрахунок нагріву і металізації шихти в двокамерних печах ПрАТ "Дніпрспецсталь" виконали відповідно до рекомендацій, приведених в літературі математичної моделі нагріву металу в камерній нагрівальній печі [32], яка передбачає:

1. Рішення зовнішньої задачі теплообміну - розрахунок в дискретному часі променистого теплообміну між продуктами згорання палива і поверхнями садіння, які нагріваються, і кладки печі;

2. Рішення внутрішньої задачі теплообміну для кладки і окремого елемента садіння, що нагрівається, - заповненою шихтою циліндричної капсули (надалі капсула).

Завдання зовнішнього теплообміну вирішене зональним методом при наступних допущеннях:

- 1) садіння представлене у вигляді горизонтальної пластини;
- 2) процес нагріву симетричний відносно площини, що проходить через середину товщини садіння.

Розрахункова схема зональної моделі зовнішнього теплообміну в об'ємі робочої камери печі приведена на рис. 2.6.

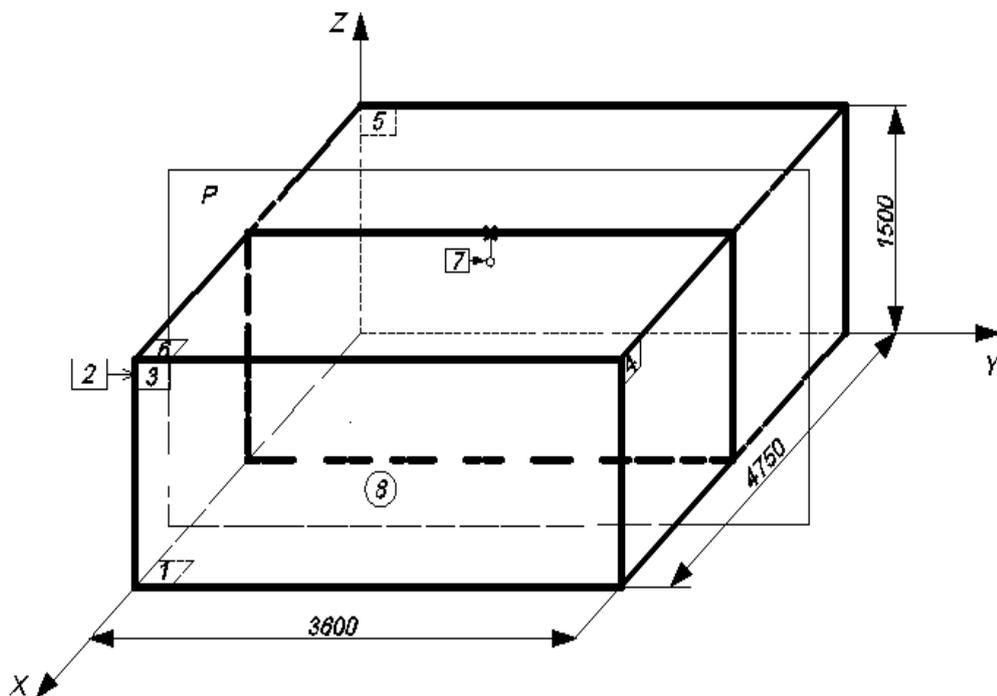
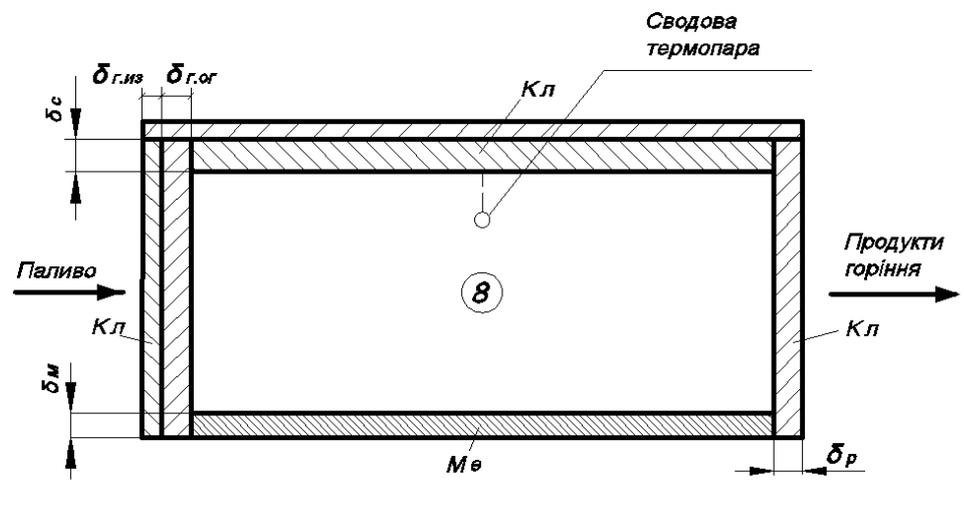


Рисунок 2.6 - Схема зональної моделі зовнішнього теплообміну

З урахуванням прийнятих допущень зональна модель представлена у вигляді паралелепіпеда з розмірами, що відповідають верхній частині робочого простору пічної камери (довжина - 4,75 м, ширина - 3,6 м, висота - 1,5 м). Вона складається з семи зон, у тому числі однієї плоскої поверхневої зони садіння ( $i = 1$ ), шести плоских поверхневих зон кладки ( $i = 2, \dots, 6$ ), поверхневої зони термоелектричного термометра ( $i = 7$ ) і однієї об'ємної зони продуктів згорання ( $i = 8$ ).

Рішення зовнішньої задачі теплообміну на кожному тимчасовому кроці по відомих значеннях температури поверхневих зон і тепловиділенні в об'ємній зоні дозволяє визначити температуру в об'ємній зоні і результуючі теплові потоки для поверхневих зон.

У даній зональній моделі поверхневі зони є межами, що відділяють об'ємну газову зону від об'ємних зон садіння, що нагрівається, і кладки, рис. 2.7



Ме - об'ємні зони металу; Кл - об'ємні зони кладки

Рисунок 2.7 - Переріз робочого простору пічної камери в площині Р

Допущення зонального методу про постійність величин, що характеризують теплообмін в межах кожної розрахункової поверхневої зони [33], дозволяє розглядати кладку, як нескінченні одне і двошарові пластини, а капсулу, як нескінченний циліндр.

Нагрів шихти супроводжується рядом фізико-хімічних перетворень (газифікація відновника, відновлення оксидів металів, нагрів і видалення газоподібних продуктів хімічних реакцій). З урахуванням цього факту і прийнятих допущень, математична модель процесу нагріву і металізації окалини представлена рівнянням нестационарної теплопровідності з відповідними крайовими умовами, в якому для непрямого обліку теплових ефектів вказаних вище перетворень використаний ефективний коефіцієнт температуропровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{эф}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad 0 < \tau \leq \tau_{\text{к}}, \quad 0 < r < R, \quad (2.74)$$

$$t(r, 0) = t_{\text{н.м}}, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (2.75)$$

$$\lambda_{\text{эф}} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (2.76)$$

$$\lambda_{\text{эф}} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_{\text{м}}, \quad (2.77)$$

де  $t$  - температура, °С;

$\tau$  - поточне значення часу, с;

$\tau_{\text{к}}$  - кінцеве значення часу нагріву, с;

$a_{\text{эф}}$  - ефективний коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda_{\text{эф}}$  - ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

$r$  - поточне значення радіус-вектора, м;

$R$  - радіус зовнішньої поверхні капсули, що нагрівається, м;

$t_{\text{н.м}}$  - початковий розподіл температури по перерізу капсули, °С;

$q_{\text{м}}$  - щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні капсули, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Обгороджування робочого простору пічної камери складаються з бічних стін, підвісного зведення і заслонки (об'ємні зони, що відповідають поверхневим зонам  $i = 1, 2, 4, 5, 6$ , рис. 2.6). Кладка цих конструктивних елементів, за винятком розділової стінки (1), рис. 2.5, виконана двошаровою: теплоізоляційний шар з пенодіатомитової цеглини і вогнетривкий шар з шамотної цеглини. Нагрів цих обгороджувань розглянули, як несиметричний

нагрів двошарової пластини. З урахуванням залежності теплофізичних характеристик від температури рівняння нестационарної теплопровідності, що описує несиметричний нагрів двошарової кладки представили у виді:

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} [\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial z}], \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < z < (\delta_1 + \delta_2), \quad (2.78)$$

де  $t$  - температура, °С;

$\tau$  - поточне значення часу, с;

$\tau_k$  - кінцеве значення часу нагріву, с;

$c'$  - питома об'ємна теплоємність, Дж/ (м<sup>3</sup>К);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/ (мК);

$z$  - поточне значення координати, м;

$S$  - товщина двошарової кладки, м;

$\delta_1$  - товщина першого шару, м;

$\delta_2$  - товщина другого шару, м.

Рівняння(2.78) доповнили:

а) початковими умовами

$$t(z, 0) = t_{нк}, \quad 0 \leq z \leq (\delta_1 + \delta_2); \quad (2.79)$$

б) граничними умовами на поверхні  $z = 0$ , що граничить з довкіллям

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{o.c.} \cdot (t_{н.н} - t_{o.c.}), \quad (2.80)$$

в) граничними умовами на поверхні  $z = S$ , що граничить з об'ємом гріючого середовища

$$\lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S} = q_w; \quad (2.81)$$

г) граничними умовами четвертого роду в площині зіткнення шарів  $z = \delta_1$

$$\lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=\delta_1} = \lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=\delta_1}, \quad (2.82)$$

де  $t_{нк}$  – початковий розподіл температури по перерізу кладки, °С;

$$\alpha_{o.c} = 2,56 \cdot (t_{н.н} - t_{o.c}) + 4,65 \cdot \frac{\left( \frac{t_{н.н} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{o.c} + 273}{100} \right)^4}{t_{н.н} - t_{o.c}} - \text{коефіцієнт тепловіддачі}$$

випромінюванням і конвекцією від зовнішньої поверхні пластини, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$t_{н.н}$  - температура зовнішньої поверхні кладки  $z = 0$ , °С;

$t_{o.c}$  – температура довкілля, °С;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності першого шару, Вт/(мК);

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності другого шару, Вт/(мК);

$q_w$  - щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні кладки  $z = S$ , Вт/(м<sup>2</sup>К);

$q_{o.c}$  - щільність теплового потоку з поверхні  $z = 0$ , що втрачається кладкою в довкілля, Вт/(м<sup>2</sup>К).

Бічна стінка (1), рис. 2.5, виконана повністю з шамотної цеглини. По своєму конструктивному призначенню вона призначена для ізоляції однієї камери печі від іншої і знаходиться в умовах симетричного нагріву. В цьому випадку внутрішнє завдання має вигляд рівняння (2.78), доповненого :

а) початковими умовами

$$t(z, 0) = t_n, \quad 0 \leq z \leq S; \quad (2.83)$$

б) умовами симетрії температурного поля для  $z = 0$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (2.84)$$

в) граничними умовами другого роду на поверхні тіла  $z = S$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=S} = q_w, \quad (2.85)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °С;

$q_w$  - щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла  $z = S$ , Вт/(м²К);

$S$  - половина товщини розділової стінки, м.

По представленій математичній моделі теплообміну в робочій камері двокамерної нагрівальної печі зробили розрахунок нагріву садіння капсул, заповнених шихтою для металізації окалини. З цією метою для садіння, що нагрівається, і кладки печі на просторово-часових сітках (2.6) - (2.7), (2.64) - (2.65), (2. 28) - (2. 29) виконали кінечно-різницеву апроксимацію крайових завдань (2.74) - (2.77), (2.78) - (2.82) і (2.83) - (2.85). В результаті цього внутрішнє завдання теплообміну представили у вигляді системи звичайно різницевих рівнянь: а) для садіння (2.15) -(2.18) з коефіцієнтами прогону (2.20) - (2.21); б) для двохарової кладки (2.66),(2.68),(2.71),(2.72) з коефіцієнтами прогону (2.67),(2.69),(2.73); для розділової стінки (2.37),(2. 38),(2.40) з коефіцієнтами прогону (2.41),(2.42).

Розрахунок зробили в наступній послідовності:

1. На кожному тимчасовому кроці в результаті рішення зовнішньої задачі визначили температуру в об'ємній зоні печі і результуючі теплові потоки для поверхневих зон садіння і кладки.

2. Рішення систем різницевих рівнянь (2.15) -(2.18), (2.66), (2.68), (2.71), (2.72) і (2.37),(2. 38),(2.40), записаних для цього тимчасового кроку, виконали в наступній послідовності:

а) прямий прогін - для садіння по рівняннях(2.20) -(2.21), для двошарової кладки по рівняннях(2.67),(2.69),(2.73) і розділової стінки по рівняннях(2.41),(2.42) вичислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_i, \beta_i$ ;

б) для пограничного вузла садіння  $i = n$  по рівнянню (1.22) визначили температуру  $t_n$ , для граничного вузла на зовнішній поверхні двошарової кладки  $j = p$  по рівнянню (2.70) визначили температуру  $t_p$ , для граничного вузла розділової стінки  $j = p$  по рівнянню(1.43) визначили температуру  $t_p$ .

Після виконання описаної процедури робиться перехід на наступний часовий шар і т. д. до завершення процесу теплової обробки.

## 2.2. Дослідження ефективних теплофізичних властивостей шихти

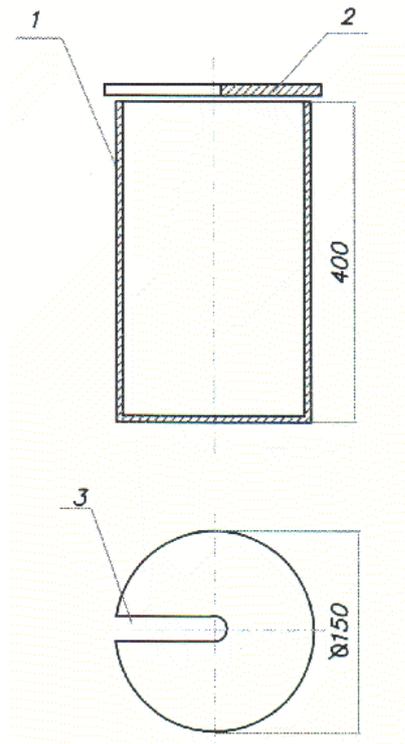
Моделювання процесів металізації окалини, з використанням приведеної в пункті 2.1.2 математичній моделі, вимагає наявності даних за еквівалентними теплофізичними властивостями матеріалу, який нагрівається.

### 2.2.1 Визначення коефіцієнта температуропровідності

Температурну залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності  $a_{\text{эф}}$  (відповідні відомості в літературі відсутні) визначили за результатами нагріву дослідних капсул, заповнених досліджуваною шихтою відомого складу [24].

Дослідження вуглетермічного відновлення окалиновмісної шихти здійснювали в капсулі, представленій на рис. 2.8.

Капсула є циліндричною обичайкою (1) діаметром 150 мм і заввишки 400 мм з герметично привареною донною частиною. Вона забезпечена вільно прилеглою кришкою (2), в якій виконаний щілинний отвір (3). Отвір (3) розташований так, щоб забезпечити виміри температури в точках по радіусу поперечного перерізу контейнера, що нагрівається.



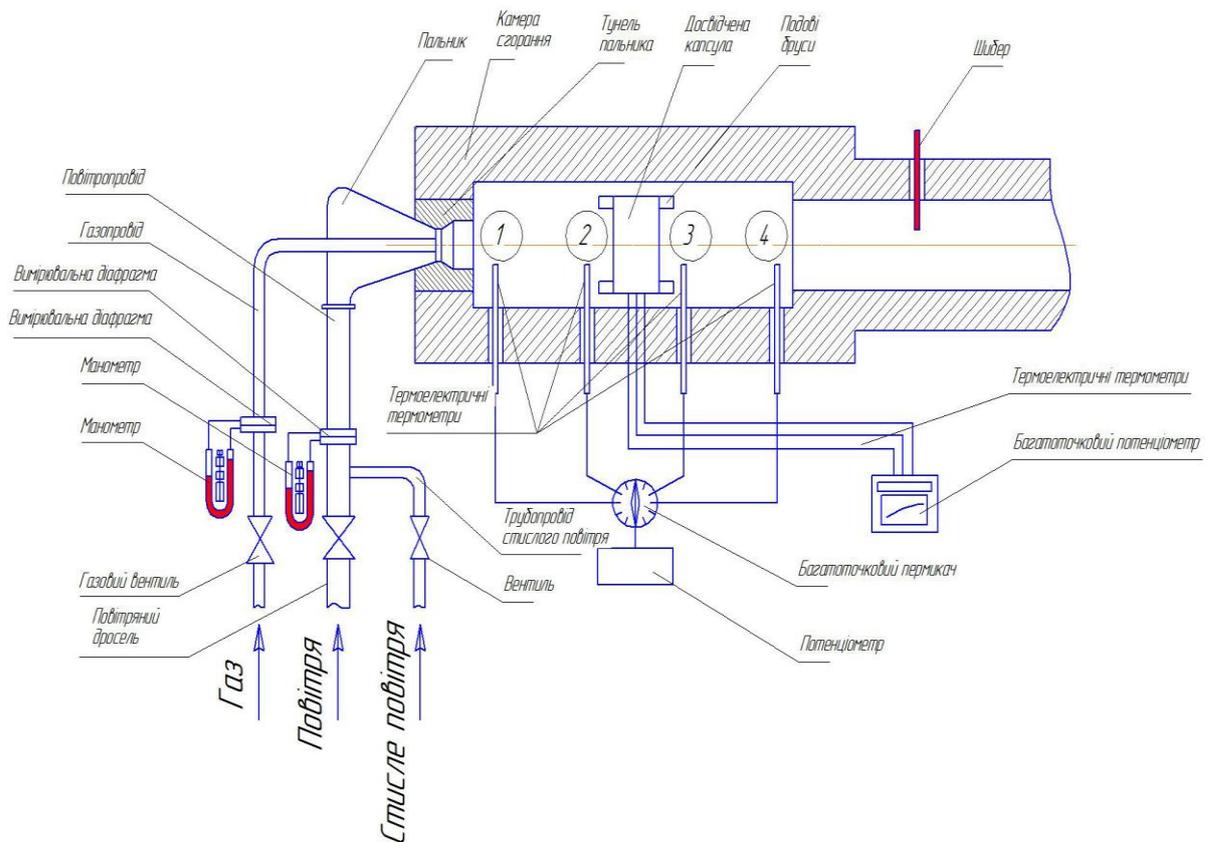
1 - обичайка; 2 - кришка; 3 - щілинний отвір

Рисунок 2.8 - Схема дослідної капсули

Дослідження параметрів металізації окалиновмісної шихти проведені на вогневому стенді - лабораторній нагрівальній печі, представлений на рис. 2.9.

Вогневий стенд є камерою згорання (1), виконаною з вогнетривкої цеглини. Співісно подовжній осі камери згорання в тунелі пальника (3) встановлений пальник (2). Паливо до пальника подається по газопроводу (4). Його витрата регулюється вентилем (5) і вимірюється діафрагмою (6) в комплекті з манометром (7). Повітря вентилятора до пальника подається по повітропроводу (8), його витрата регулюється дроселем (10) і вимірюється діафрагмою (9) в комплекті з манометром (11). Конструкція вогневого стенду передбачає можливість подання на пальник (2) стислого повітря по трубопроводу (12). Його витрата регулюється вентилем (13). В цьому випадку діафрагмою (9) в комплекті з манометром (11) вимірюється витрата суміші повітря вентилятора і стислого. Для виміру температури продуктів згорання в

камері (1) встановлені чотири платинородієві-платинові термоелектричні термометри (14) в захисних фарфорових чохлах. Термометри сполучені з потенціометром (16) через багатоточковий перемикач (15). Тиск в камері (1) регулюється положенням шибера (21). Досвідчену капсулу (17) розмістили на подових брусах (20) в камері згорання (1).



1 - камера згорання; 2 - пальник; 3 - тунель пальника; 4 - газопровід; 5 - газовий вентиль; 6 - вимірювальна діафрагма; 7 - манометр; 8 - повітропровід; 9 - вимірювальна діафрагма; 10 - повітряний дросель; 11 - манометр; 12 - трубопровід стислого повітря; 13 - вентиль; 14 - термоелектричні термометри; 15 - багатоточковий перемикач; 16 - потенціометр; 17 - дослідна капсула; 18 - термоелектричні термометри; 19 - багатоточковий потенціометр; 20 - череневі бруси; 21 - шибер.

Рисунок 2.9 - Схема вогневого стенду

Стенд опалюється природним газом з теплотворною здатністю 35,6 МДж/м<sup>3</sup>.

Температури в контрольних точках перерізу капсули і точках, розташованих в середовищі продуктів згорання у безпосередній близькості від її поверхні, вимірювали гнучкими хромель-алюмелевими термоелектричними термометрами (18) діаметром 1,2 мм в комплекті з багатоточковим потенціометром КСП-4(19). Схема розташування точок виміру температури в перерізі дослідженої капсули і біля її поверхні показана на рис.2.10.

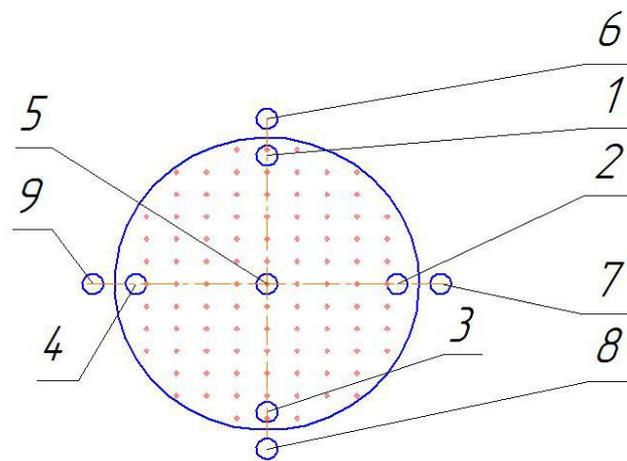


Рисунок 2.10 - Схема розташування точок виміру температури в перерізі Дослідної капсули і біля її поверхні

В якості початкових матеріалів використали різні види шихти, на основі подрібненої до фракції 0,63 мм окалини швидкорізальної сталі Р6М5, графіту фракцією 0,45 мм і металевої стружки силового шліфування сталі Р6М5. При збереженні співвідношення між окалиною і графітом відповідно до 85 % і 15 % (по масі) видів шихти відрізнялися змістом металодобавок, а саме: № 1 – 15 %; № 2 – 30 %; № 3 – 45 % (по масі).

Величина температури в контрольних точках на осі камери згорання вогневого стенду залежить від розташування точок, витрат газу і повітря.

Схема розташування точок виміру температури на осі камери вогневого стенду представлена на рис.2.11.

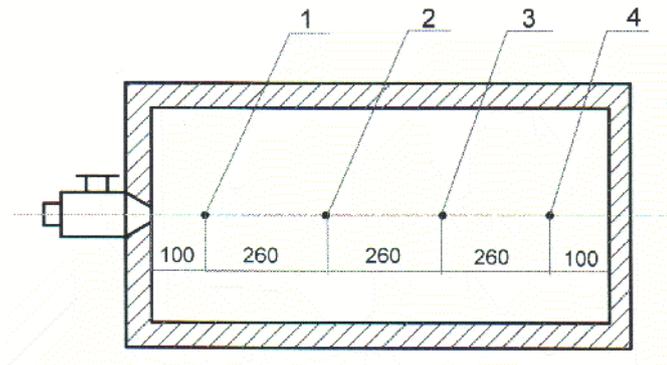


Рисунок 2.11- Схема розташування точок виміру температури на осі робочої камери вогневого стенд

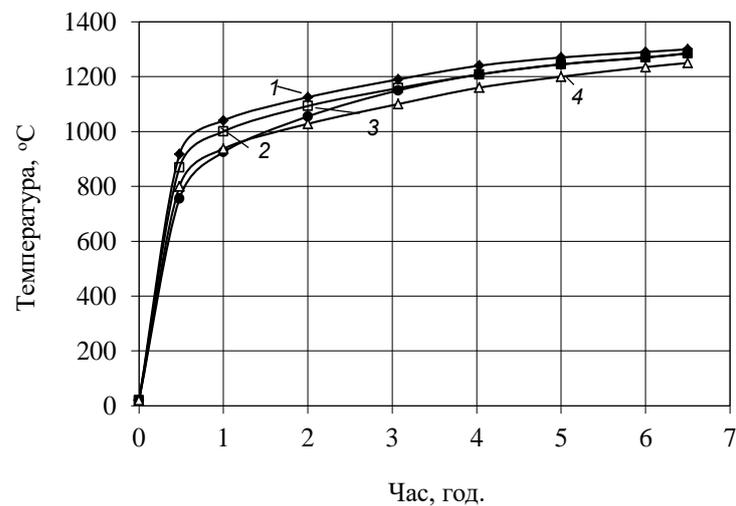
Дослідні капсули нагрівали в режимі постійних витрат природного газу і повітря, які склали відповідно 8,8 и 76 м<sup>3</sup>/ч. Такий режим роботи забезпечив нагрів в умовах монотонно зростаючої температури печі (таблиця 2.1, рис. 2.12). Приведені дані ілюструють динаміку нагріву робочої камери печі і дозволяють оцінити температурні умови теплової обробки дослідчених капсул. Характер зміни температури в усіх контрольованих точках однаковий. Проте на початкових стадіях температура точок № 1 і № 2 значно випереджає останню в точках № 3 і № 4. На цьому етапі нагріву позначається близькість розташування точок № 1 і № 2 до гирла пальника. Робочі спаї термометрів в точках № 1 і № 2 знаходяться в середовищі газів, що горять. Охолоджувальна дія ще не розігрітих обгороджувачів робочої камери печі позначається на них не так істотно, як на термометри в точці № 3 і особливо № 4.

Таблиця 2.1 - Температури на осі робочої камери лабораторної печі при нагріві окалиновмісних шихт

Номер шихти	Номер точки виміру	Температура, °С						
		Час заміру температури, г						
		0	1	2	3	4	5	6
1	1	20	1040	1125	1190	1240	1270	1290
	2	20	1000	1090	1160	1210	1245	1270
	3	20	925	1055	1150	1210	1245	1270

Продовження таблиці 2.1

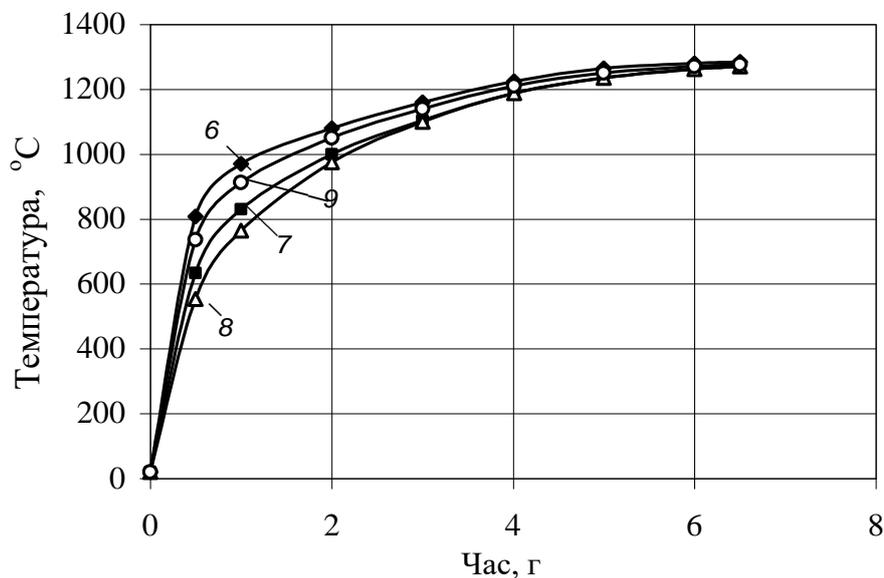
	4	20	935	1030	1100	1160	1200	1235
2	1	20	1075	1145	1195	1235	1255	1280
	2	20	1020	1095	1165	1220	1245	1270
	3	20	955	1060	1155	1215	1240	1270
	4	20	915	1030	1120	1160	1190	1225
3	1	20	1055	1125	1180	1230	1255	1285
	2	20	1020	1095	1150	1210	1235	1265
	3	20	925	1050	1145	1210	1230	1260
	4	20	880	995	1070	1135	1175	1225
4	1	20	1050	1125	1180	1220	1260	1285
	2	20	990	1090	1155	1200	1245	1275
	3	20	910	1045	1145	1190	1240	1270
	4	20	880	1000	1070	1140	1190	1230



1, 2, 3, 4 - номери термоелектричних термометрів.

Рисунок 2.12 - Температурні криві нагріву в точках на осі робочої камери вогневого стенду

Робочий спай термометра в точці № 4 в тепловому відношенні знаходиться в найбільш несприятливих умовах. Він сприймає тепло продуктів згорання, що відходять, захолює в результаті теплообміну з футеруванням робочої камери печі і поверхнею капсули. У міру розігрівання стенду відбувається вирівнювання температур за рахунок перевипромінювання тепла від одних поверхневих зон обгороджувальних робочої камери до інших. Перепади температури між точками №№ 1, 2, 3 зменшуються і у кінці нагріву складають (10...20) °С. Знижується перепад температури між точками №№ 1, 2, 3 і точкою № 4. У кінці нагріву він досягає 40 - 60 °С. Контроль температури в точках №№ 6, 7, 8, 9 (рис. 2.10) дозволив оцінити як динаміку зміни температури у безпосередній близькості від поверхні капсули, так і розподіл температури по висоті робочої камери печі в місці розташування контейнера. На рис. 2.13 представлені температурні криві в точках, розташованих у безпосередній близькості від поверхні капсули, що нагрівається.



6, 7, 8, 9 - номери термоелектричних термометрів

Рисунок 2.13 - Температурні криві в точках, розташованих у безпосередній близькості від поверхні капсули, що нагрівається

Спільний аналіз температурних кривих в точках №№ 6, 7, 8, 9 показує їх збіг за характером зміни. На початковому етапі нагріву швидкість зростання температури в точках № 6 і № 9 значно випереджає швидкість підйому температури в точках № 7 і № 8, розташованих з тильної по відношенню до пальника, сторони капсули.

Робочі спаї термометрів в точках № 6 і № 9 у меншій мірі випробовують охолоджувальну дію обгороджувальних робочої камери печі, чим термометрів в точках № 7 і № 8.

У міру розігрівання футерування і поверхні контейнера відбувається перерозподіл тепла за рахунок перевипромінювання.

Істотна різниця температури між точками №№ 6, 9 і №№ 7, 8, що виникла на початковій стадії нагріву, поступово зменшується і у кінці теплової обробки складає 30- 40 °С.

Аналіз динаміки зміни температури на осі робочої камери стенду (рис. 2.12) і в точках №№ 6, 7, 8, 9 (рис. 2.13) показав, що найбільш сприятливим, в тепловому відношенні, місцем розташування досвідченої капсули є положення між контрольними точками № 2 і № 3 (рис. 2.11).

У цих умовах забезпечується практично симетричний режим нагріву контейнера при незначному перепаді температури по висоті робочої камери печі.

На рис. 2.14 – рис. 2.16 представлені температурні криві нагріву досвідчених капсул, заповнених шихтою трьох досліджених складів.

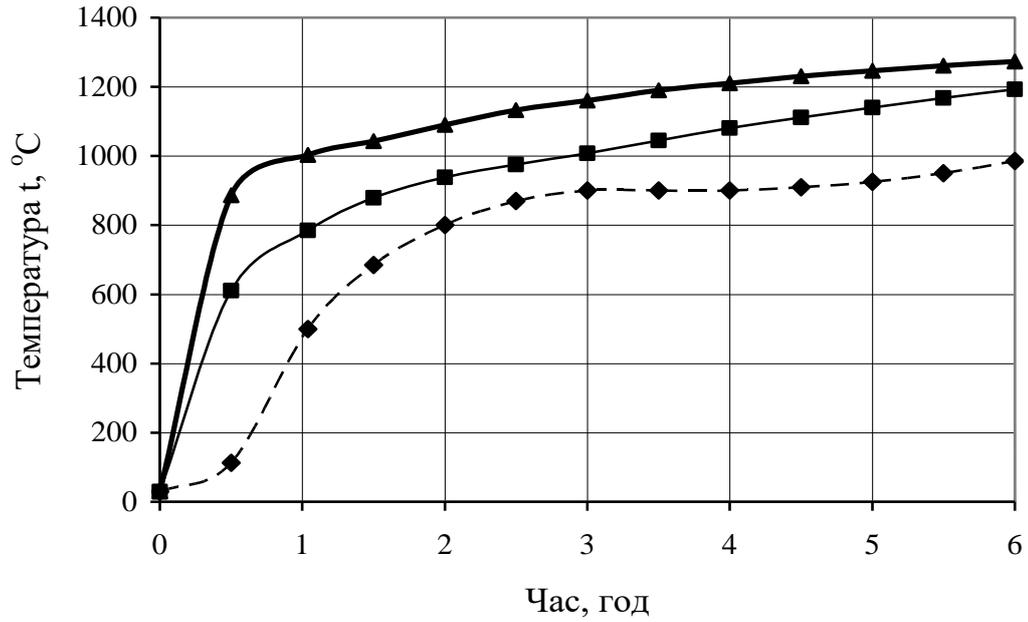


Рисунок 2.14 - Температурна діаграма нагріву дослідної капсули з шихтою №1

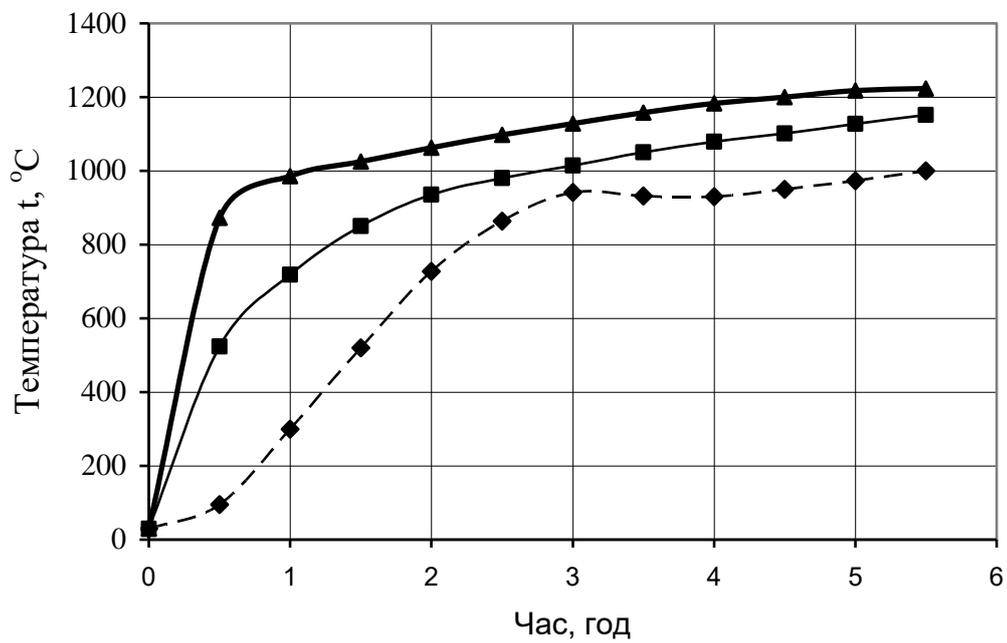


Рисунок 2.15 - Температурна діаграма нагріву дослідної капсули з шихтою № 2

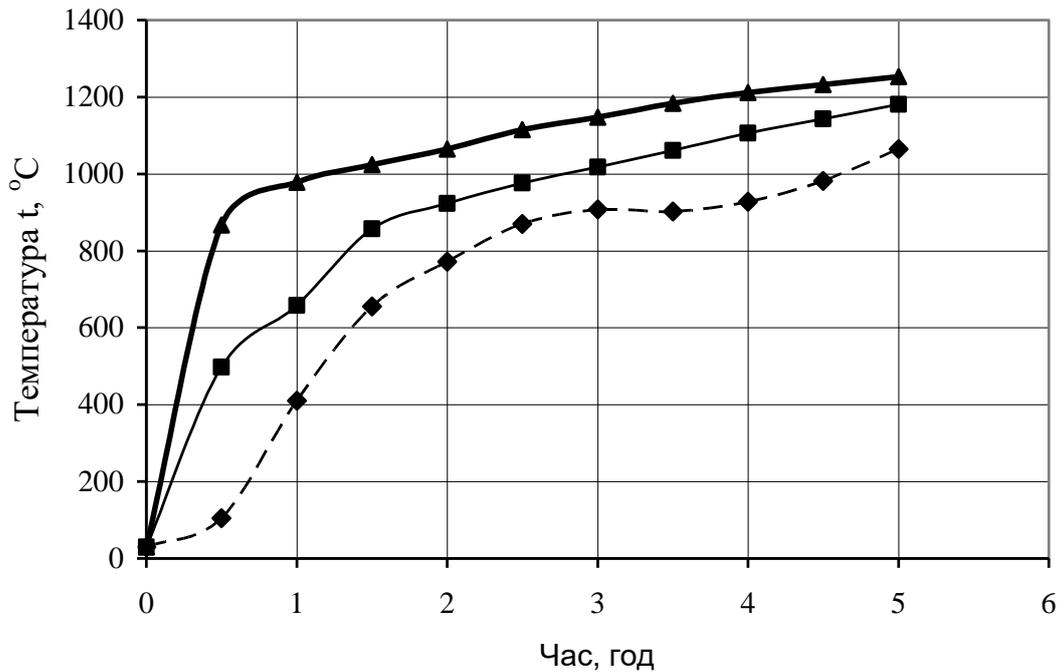


Рисунок 2.16 - Температурна діаграма нагріву дослідної капсули з шихтою № 3

На температурних діаграмах представлені:

а) суцільними жирними лініями - середня в місці розташування дослідженої капсули температура печі (за свідченнями термоелектричних термометрів №2 і № 3, рис. 2.9, рис. 2.11);

б) тонкими суцільними лініями - середня по поверхні капсули температура поверхневого шару шихти;

в) штриховою лінією - температура на осі симетрії капсули.

Спільний аналіз представлених на рис. 2.14 - рис. 2.16 експериментальних даних показав:

1. Процес зміни температури шару шихти включає три періоди:

а) від температури посаду до температури  $t_{нов} = 1000$  °C;

б) від  $t_{нов} = 1000$  °C до  $t_{нов} = (1100...1150)$  °C;

в) від 1150 °C до температури завершення теплової обробки.

Перший період характеризується процесом поступового прогрівання шару шихти. На другому інтервалі крива температури центру капсули зазнає злам, що свідчить про зміну теплоспоживання шару шихти. На цій стадії,

спільно з процесами теплообміну, інтенсивно йдуть хімічні реакції відновлення окалини, тепло, що супроводжується поглинанням. У міру завершення металізації швидкість підйому температури зростає, що призводить до виникнення ще одного перегину на відповідній кривій. На третьому температурному інтервалі відбувається подальший нагрів вже металізованої губки.

Збільшення змісту металодобавок сприяє інтенсифікації внутрішнього теплообміну і збільшенню швидкості хімічних реакцій відновлення окалини, що призводить до скорочення другого температурного інтервалу і зменшення загальної тривалості нагріву.

Для досліджених складів шихти по експериментально визначеному температурному полю, відповідно до відомої методики [25], визначили температурну залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності  $a_{\text{эф}}$ .

Методика передбачає застосування методу регулярного теплового режиму при нагріві необмеженого суцільного циліндра в умовах лінійної зміни температури його поверхні і початкової різниці  $\Delta t_0$  по перерізу. Якщо  $C$  – швидкість нагріву,  $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ,  $\Delta t_0$  – різниця температур поверхні і середини тіла в початковий момент,  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t$  – різниця температур на поверхні і середини тіла в даний момент часу, то рішення рівняння теплопровідності для циліндра безкінечної довжини радіусу  $R$  матиме наступний вигляд [26]

$$\frac{\Delta t}{C \cdot \tau} = \frac{R^2}{4 \cdot a \cdot \tau} \cdot \left( \frac{R^2}{a \cdot \tau} - \frac{4 \cdot \Delta t_0}{C \cdot \tau} \right) \cdot \left( \sum_n \frac{2}{\mu_n^3 \cdot J_1(\mu_n)} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{R^2}} \right), \quad (2.86)$$

де  $\tau$  – час, с;

$a$  – середнє значення коефіцієнта теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$r$  – координата, м;

$\mu_n$  – корні характеристичного рівняння ;

$J_1$  – функції Бесселя першого порядку.

Таким чином, за наявності залежностей зміни температури на поверхні і в центрі зразка, що нагрівається, завдання визначення постійного середнього коефіцієнта температуропровідності зводиться до рішення рівняння алгебри з одним невідомим.

Визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності шихти зробили в наступній послідовності:

а) експериментальні температурні криві для поверхні циліндричного зразка з досліджуваної шихти, рис. 2.14 - рис. 2.16, замінили ламаними лініями;

б) для кожного відрізка часу, що відповідає певній ділянці ламаної лінії визначили швидкість зміни температури поверхні і середню температуру матеріалу зразка;

в) по рівнянню (2.86) на кожному відрізку часу для середньої температури матеріалу, що відповідає йому, визначили значення ефективного коефіцієнта температуропровідності.

Результати експериментально аналітичного визначення температурних залежностей ефективного коефіцієнта температуропровідності досліджених матеріалів представлені на рис. 2.17 - рис. 2.19.

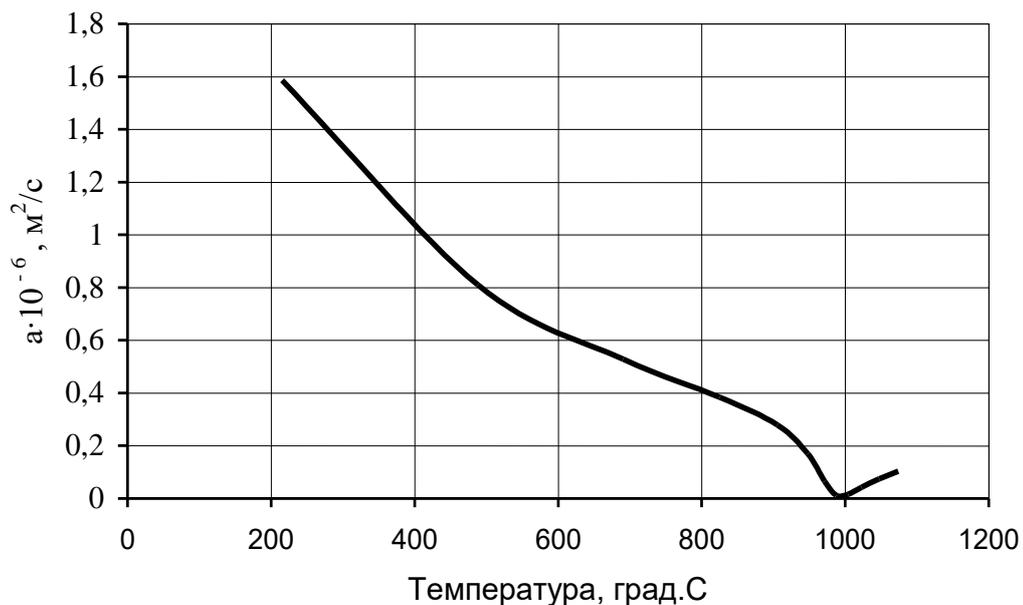


Рисунок 2. 17 - Температурна залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності для шихти № 1

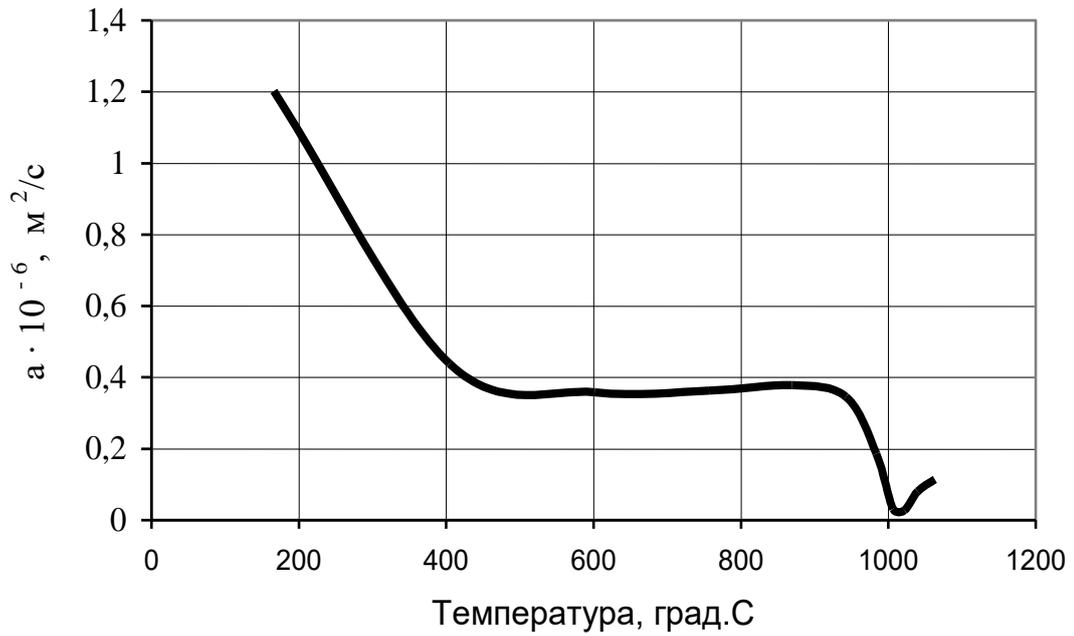


Рисунок 2. 18 - Температурна залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності для шихти № 2

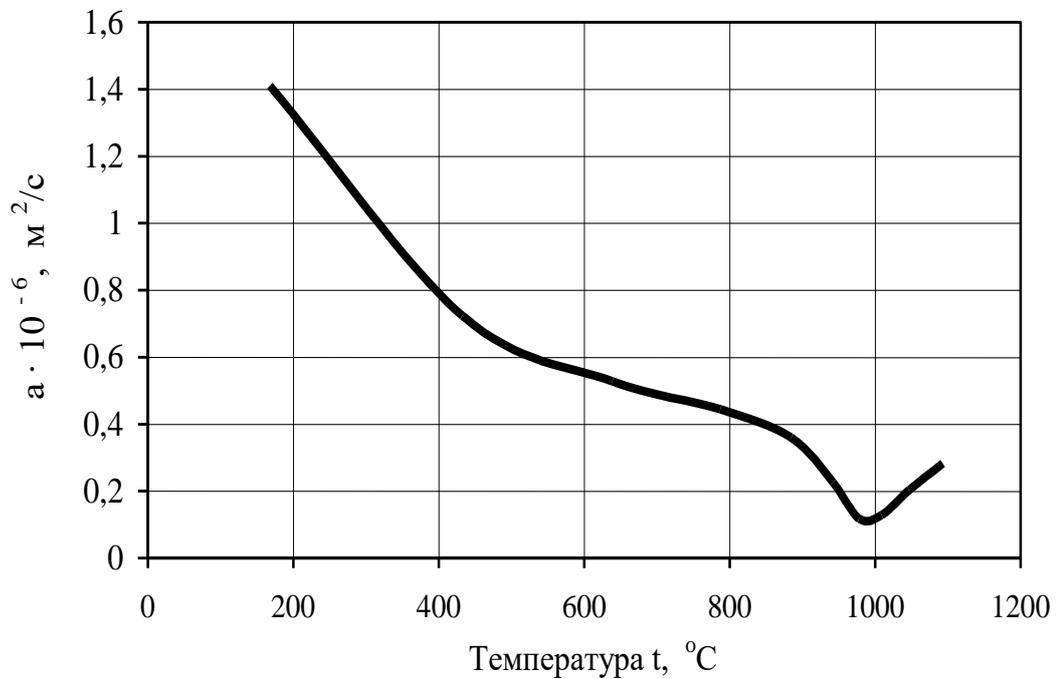


Рисунок 2. 19- Температурна залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності для шихти № 2

### 2.2.2 Оцінка похибки визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності

З метою оцінки погрішності визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності виконали рішення задачі металізації окалини для умов експериментального нагріву шихти № 2, 30 %, що містить стружки. Математичну модель процесу металізації окалини представили одновимірним рівнянням нестационарної теплопровідності в циліндричних координатах

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{эф} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < r < R_э. \quad (2.87)$$

Рівняння (2.87) доповнили початковими умовами (розподіл температури по перерізу циліндричного зразка в початковий момент часу)

$$t(r, 0) = t_{н.м}, \quad 0 \leq r \leq R_э, \quad (2.88)$$

граничними умовами першого роду

$$t|_{r=R_э} = t_{н.э}, \quad (2.89)$$

і умовами симетричності нагріву (тепловий потік на осі дорівнює нулю)

$$\lambda_{эф} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (2.90)$$

де  $R_э$  – радіус поверхні експериментальної капсули, м;

$t_{н.э}$  – температура поверхні експериментального зразка (за даними експерименту), °С.

Поставлене завдання (2.87) - (2.90) вирішили методом кінцевих різниць. З цією метою систему диференціальних рівнянь представили в кінцево-

різницевої формі на просторово тимчасовій сітці  $n \times m = 70 \times 1980$  (крок по радіусу  $\Delta r = 1$  мм, крок за часом  $\Delta \tau = 1$  сек.). Результати рішення поставленої задачі представлені на рис. 2. 20.

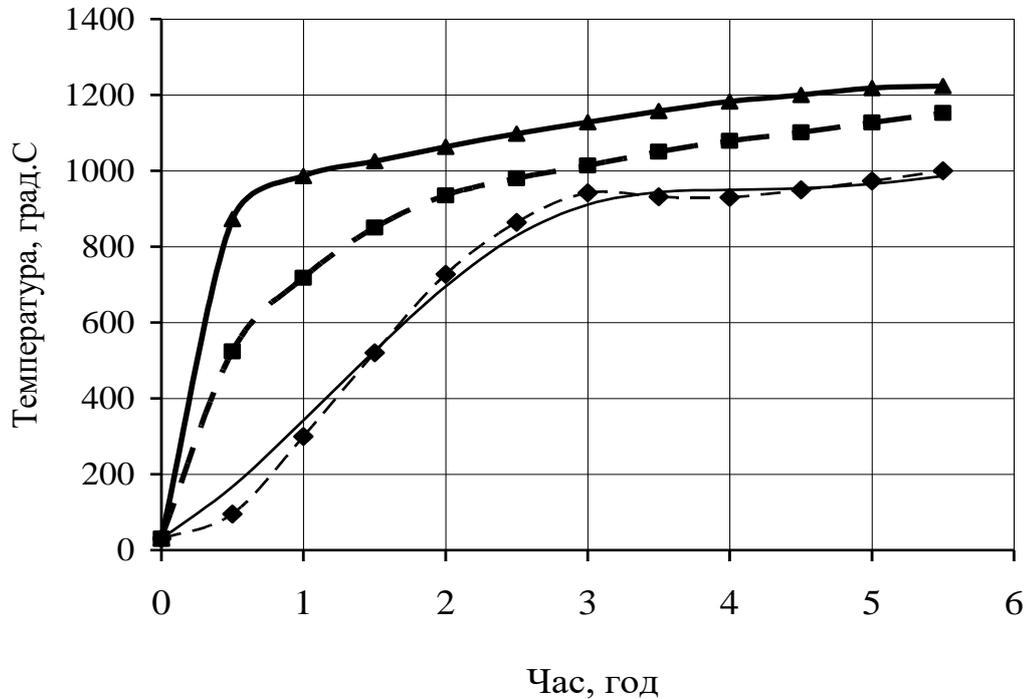


Рисунок 2.20 - До оцінки похибки визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності

На цій температурній діаграмі:

- а) суцільною жирною лінією зображена середня в місці розташування дослідної капсули температура печі;
- б) штриховою жирною лінією - граничні умови на поверхні зразка;
- в) тонкою штриховою лінією - експериментальна температура на осі зразка;
- г) тонка суцільна лінія - розрахункова температура на осі зразка.

Зіставлення розрахункової осьової температури з її експериментальним аналогом дозволяє зробити наступні висновки:

- а) розбіжність результатів розрахунку з експериментальними даними найвідчутніше в першому періоді нагріву;

б) в другому і третьому періоді точність відновлення температурного поля зразка досить висока, при цьому погрішність розрахунку у кінці процесу нагріву не перевищує одного відсотка.

### 2.2.3 Визначення ефективних значень коефіцієнта теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності

Аналіз рівнянь (2.74) - (2.77) показує, що для шихти рішення задачі внутрішнього теплообміну за наявності інформації тільки про ефективний коефіцієнт температуропровідності неможливе. Присутність ефективного коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\text{эф}}$  у складі граничних умов (2.76), (2.77) ставить завдання додаткового визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності і ефективної питомої об'ємної теплоємності. З цією метою по розрахунковому температурному полю  $t^p$  експериментальної капсули (результат рішення задачі (2.87) - (2.90), зроблено рішення зворотної задачі теплопровідності (33). В результаті рішення (33), виконаного з використанням відомого алгоритму [27,28], для досліджених матеріалів отримані значення ефективних коефіцієнтів теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності.

На рис. 2.21, рис. 2.23, рис.2.25 для досліджених складів шихти представлені температурні залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності. На рис. 2.22, рис 2.24, рис.2.26 для досліджених складів шихти представлені температурні залежності ефективного значення питомої об'ємної теплоємності.

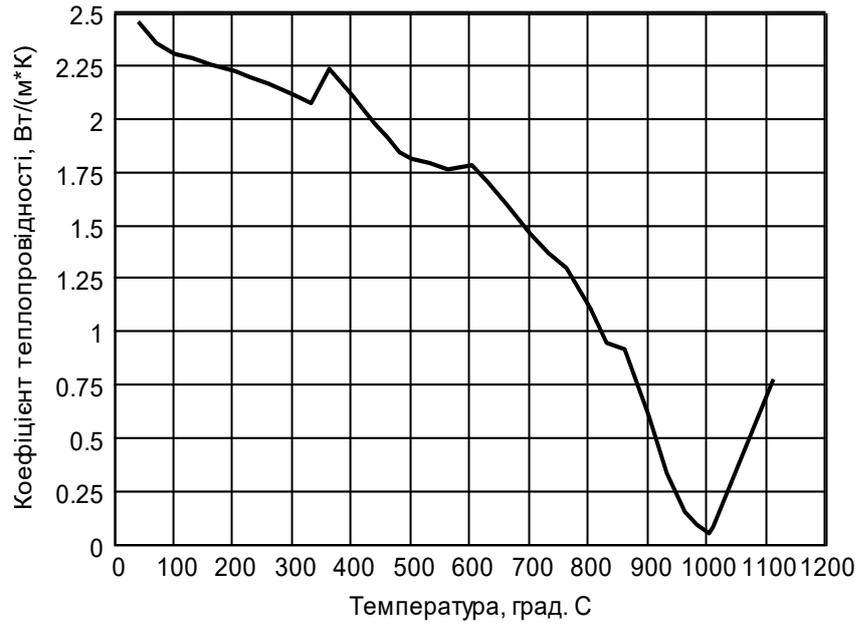


Рисунок 2.21 - Розрахункові значення ефективного коефіцієнта теплопровідності шихти № 1 (15% стружки)

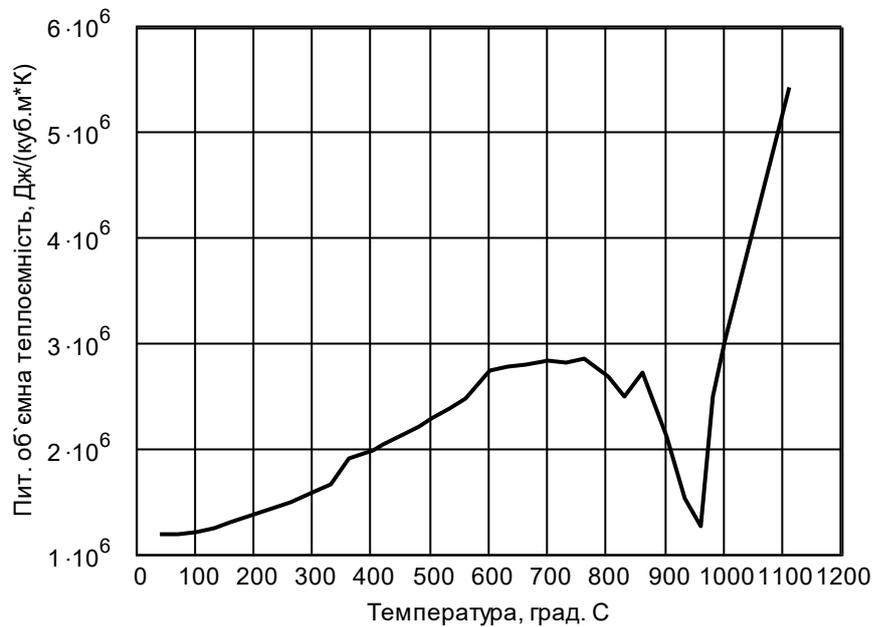


Рисунок 2.22 - Розрахункові значення ефективної питомої об'ємної теплоємності шихти № 1 (15 % стружки)

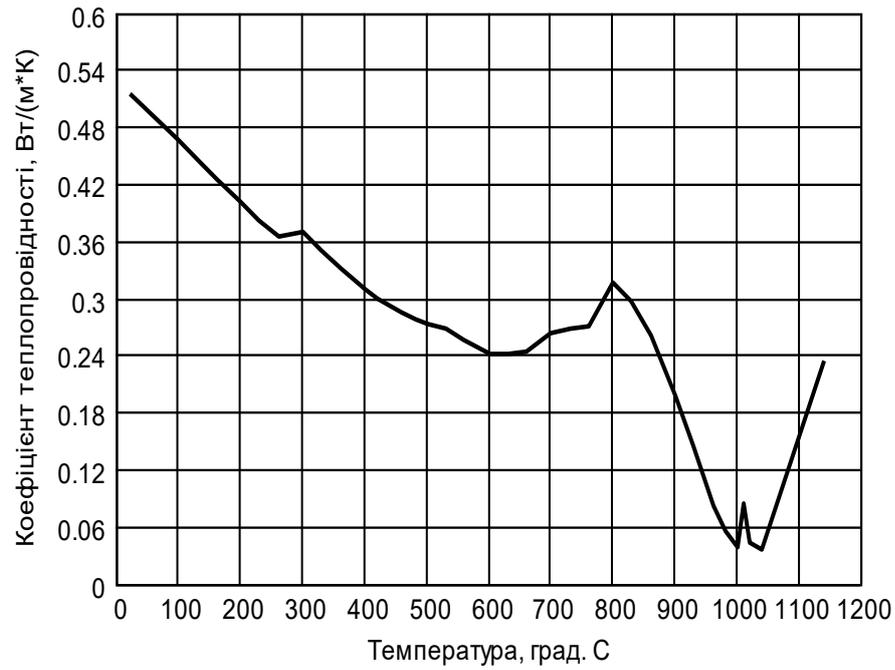


Рисунок 2.23- Розрахункові значення ефективного коефіцієнта теплопровідності шихти № 2 (30 % стружки)

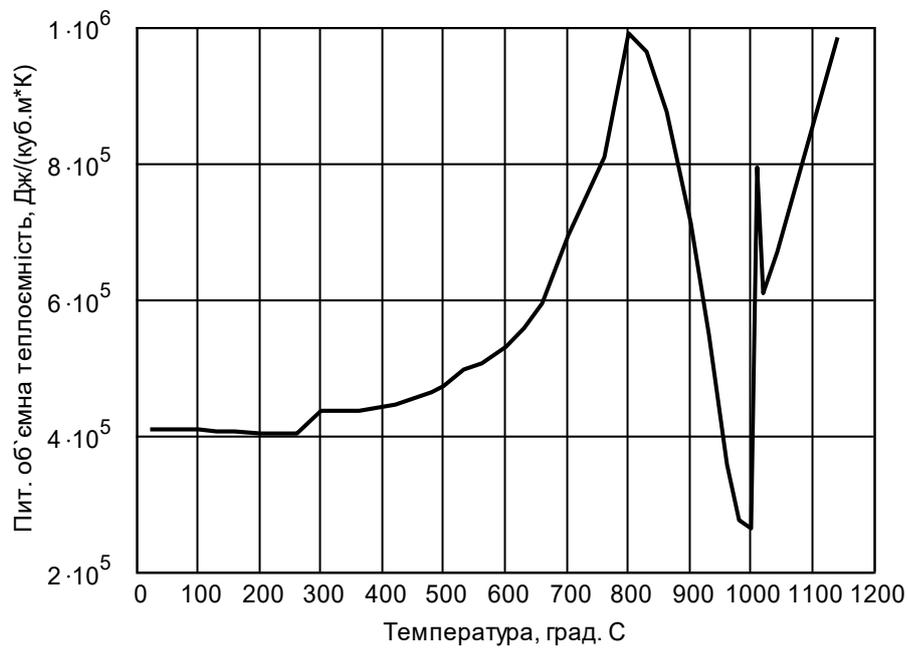


Рисунок 2.24 - Розрахункові значення ефективної питомої об'ємної теплоємності шихти № 2 (30 % стружки)

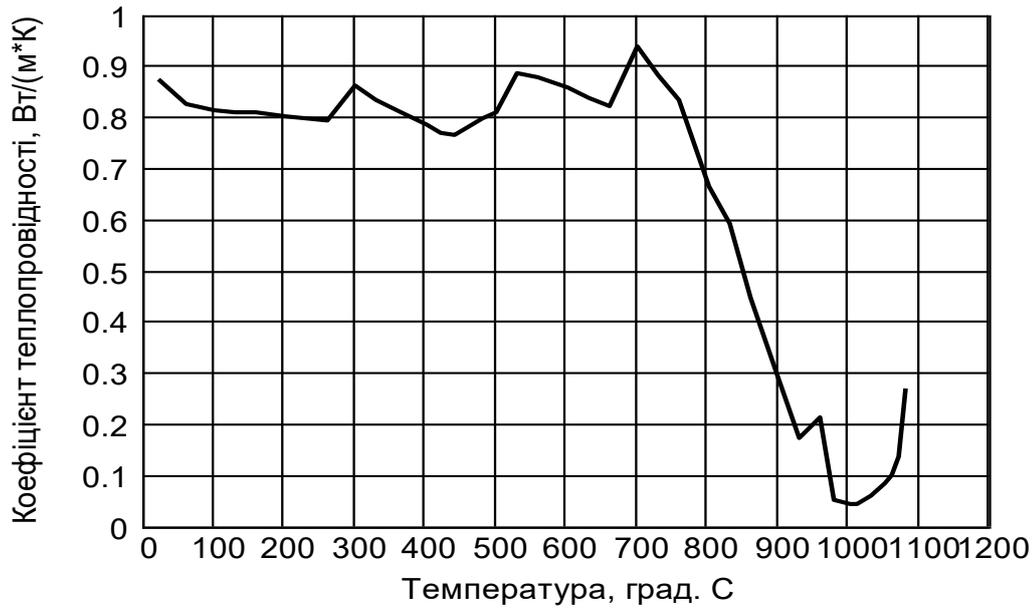


Рисунок 2.25 - Розрахункові значення ефективного коефіцієнта теплопровідності шихти № 3 (45 % стружки)

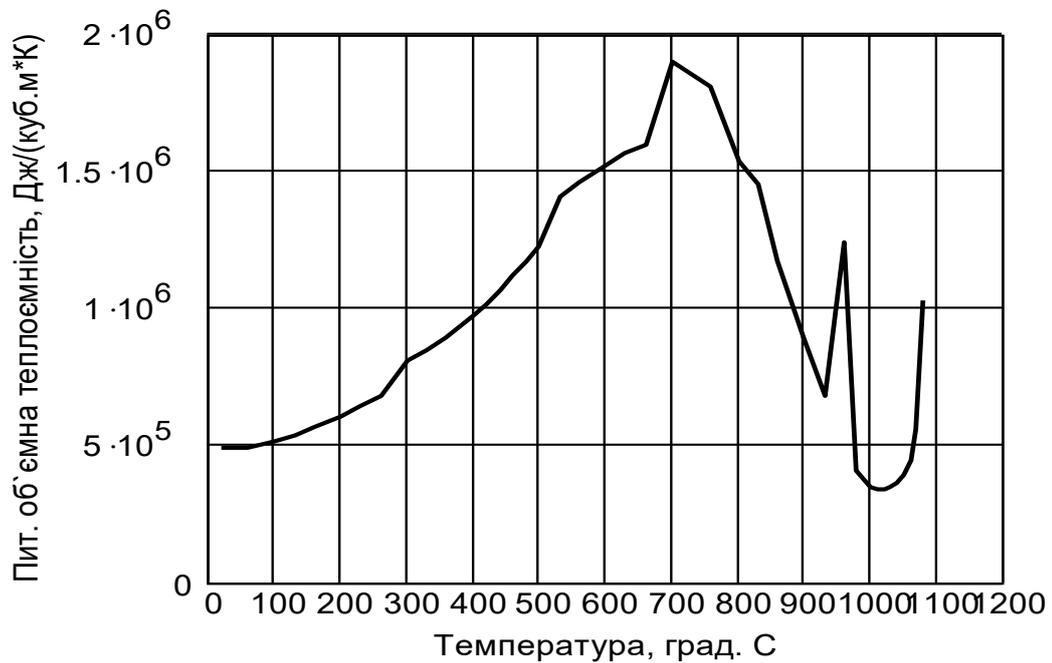


Рисунок 2.26 - Розрахункові значення ефективної питомої об'ємної теплоємності шихти № 3 (45 % стружки)

### 2.3 Вибір параметрів температурного режиму металізації окалини, визначення раціонального складу шихти і геометричних розмірів капсули

Температурний режим теплової обробки шихти в нагрівальній печі включає два періоди: період підйому температури печі і період витримки в ізотермічному режимі.

Вибір параметрів температурного режиму зробили з наступних міркувань:

1. Тривалість першого періоду визначається швидкістю підйому температури печі. При нагріві металу її величина лімітується з метою запобігання руйнуванню зливків. Шихта, розміщена в місткості насипом, є дрібнозернистим матеріалом. При її нагріві різниця температур, що виникає між поверхнею і центром перерізу капсули, не призводить до утворення пружної термічної напруги;

2. В окислювальній атмосфері печі загальна тривалість температурного режиму теплової обробки шихти лімітується угаром поверхні металевої капсули. З урахуванням цього, авторами роботи [17] для капсули з товщиною стінки  $\delta = 3$  мм запропонований багатоступінчастий режим загальною тривалістю 19 годин. Режим утримує чотири витримки на 700 °С, 900 °С, 1200 °С і 1150 °С. Основним ступенем є витримка при температурі печі 1150 °С.

Визначення раціонального складу шихти і геометричні розміри капсули виконали за результатами моделювання нагріву в двокамерній нагрівальній печі садіння капсул, заповнених окалиновмісною шихтою.

Розрахунки виконали для наступних початкових даних:

- 1) геометричні розміри робочого простору печі вибрані відповідно до даних рис. 2.6;
- 2) піч опалюється природним газом, витрата палива в період підйому температури 250 м<sup>3</sup>/ч;
- 3) діаметр капсули варіювали в межах від 0,3 м до 0,55 м;

4) теплофізичні властивості вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів задавали за літературними даними [10, 11];

5) радіаційні властивості тіл, що беруть участь в променистому теплообміні : міра чорноти поверхні металевої капсули  $\varepsilon_M = 0,8$ , міра чорноти поверхні термоелектричного термометра  $\varepsilon_T = 0,9$ , міра чорноти кладки  $\varepsilon_{CT} = 0,6$ ;

6) температура витримки печі  $t_{\text{внт.}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$  (за даними роботи [29]);

7) початкових температурних умов: для садіння - рівномірна по перерізу температура  $t_{\text{н.м}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , для кладки - параболічний розподіл температури при температурі на внутрішній поверхні  $t_{cm}^{\text{вн}} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$  і температурі зовнішньої поверхні  $t_{cm}^{\text{н}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Розрахунки температурного поля в об'ємі капсули даного діаметру виконані при загальній тривалості температурного режиму  $\tau^c = 19 \text{ ч}$  (за даними роботи [20]).

Аналіз отриманих результатів виконали з урахуванням даних роботи [29], автори якої дають наступні висновки:

1) міра відновлення окалини швидкорізальної сталі впродовж двох годин при температурі  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  складає  $70,1 \%$ , при температурі  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $90,1 \%$ ;

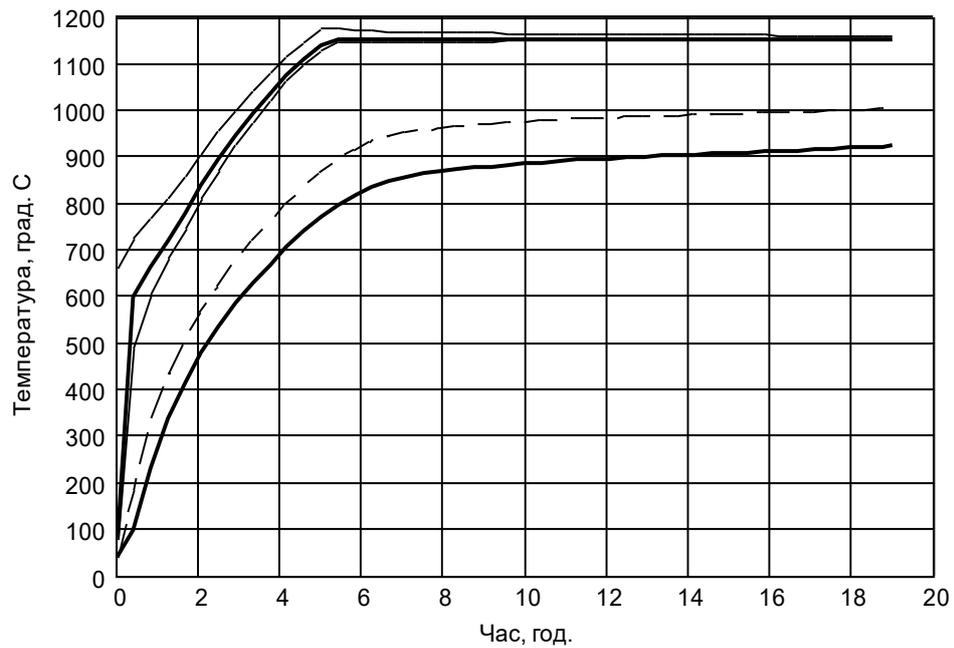
2) процес відновлення йде з помітною швидкістю при температурах більше  $900\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

б) через п'ять годин у момент завершення нагріву ці величини мають значення, відповідно,  $908 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Очевидно, що впродовж останніх п'яти годин нагріву розподіл температури по перерізу капсули практично не змінився, що свідчить про незавершеність процесу металізації окалини.

Досягнутий рівень температури в центрі перерізу капсули є недостатнім для отримання металізованного матеріалу, що задовольняє вимогам сталеплавильного виробництва. З цієї причини виникла необхідність зміни температурного режиму в центрі перерізу капсули. Рішення цієї задачі можливе за рахунок:

1) збільшення температури печі і часу витримки;

2) зміни теплофізичних характеристик шихти.



1 - температура газоповітряного середовища; 2 - свідчення термоелектричного термометра; 3 - температура поверхні капсули; 4 - температура на середині радіуса перерізу капсули; 5 - температура на осі симетрії капсули

Рисунок 2.27 - Температурний режим нагріву і металізації шихти № 1 (15% стружки) в капсулі Ø 0,3 м

Так, як збільшувати температуру печі і тривалість витримки для капсул з товщиною стінки рівної 3 мм не представляється можливим, в процесі чисельних досліджень випробуваний другий варіант:

а) при незмінному співвідношенні окалини і графіту зміст стружки у складі шихти збільшили до 30 % (шихта № 2);

б) при незмінному співвідношенні окалини і графіту зміст стружки у складі шихти збільшили до 45 % (шихта № 3).

Результати розрахунку температурного поля при нагріві шихти № 2 і № 3 в капсулах Ø 0,3 м приведені на рис. 2.28 і рис. 2.29. На представлених температурних діаграмах нумерація кривих відповідає позначенням рис. 2.27.

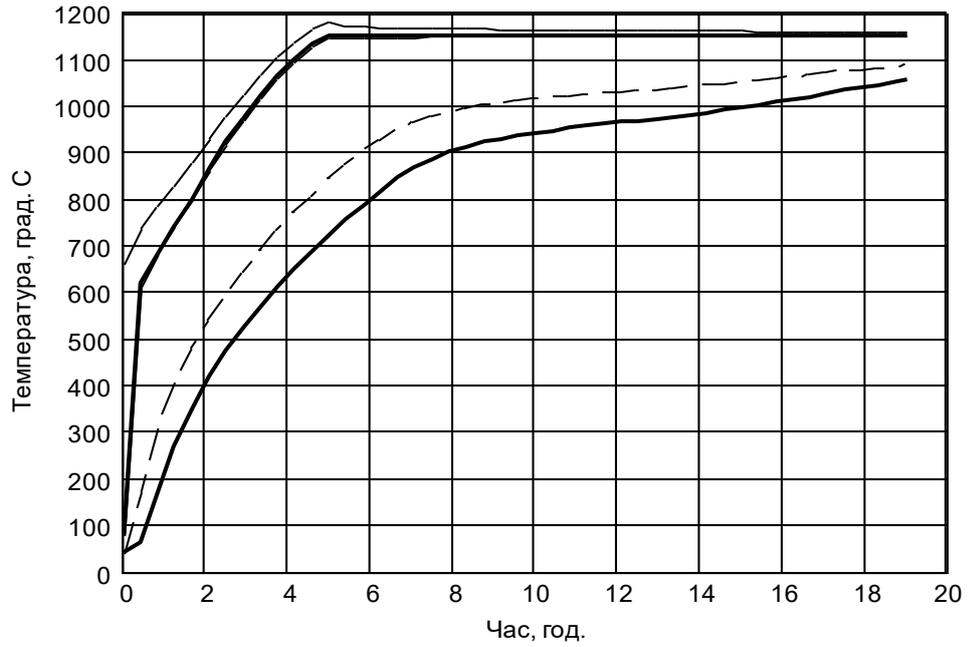


Рисунок 2.28 - Температурний режим нагріву і металізації шихти № 2 (30 % стружки) в капсулі Ø 0,3 м

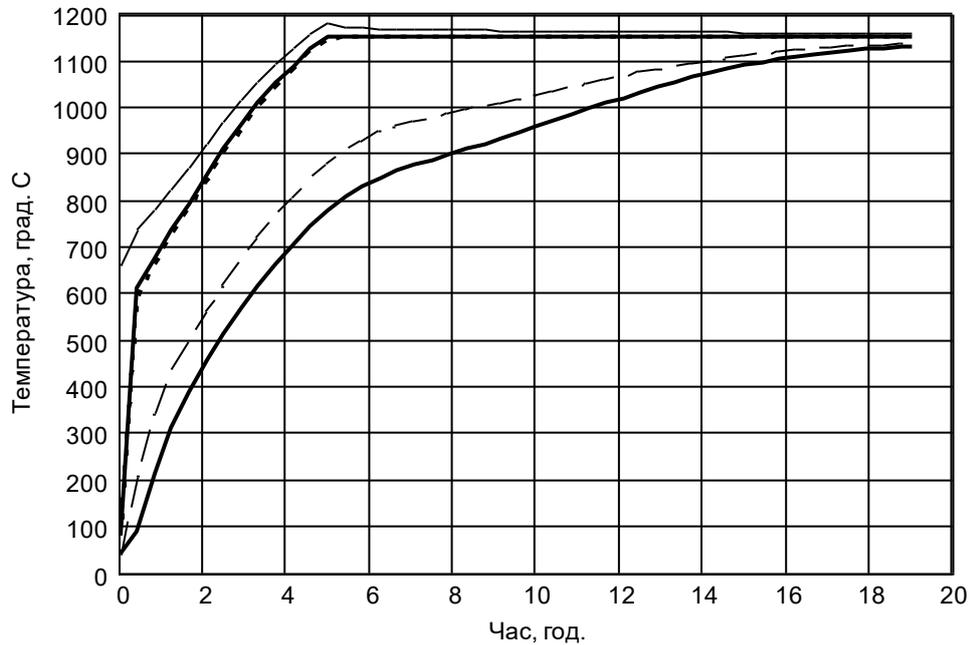


Рисунок 2.29 - Температурний режим нагріву і металізації шихти № 3(45 % стружки) в капсулі Ø 0,3 м

Спільний аналіз даних рис. 2.28, рис. 2.29 показав істотні зміни в картині розподілу температури по перерізу капсул, що нагрівалися. Так, для даних варіантів складу шихти, час виходу температури на осі симетрії капсули скоротився до восьми годин, а її значення у момент завершення процесу нагріву склало: для шихти № 2 - 1055 °С; для шихти № 3 - 1129 °С. Динаміка зміни осьової температури в області понад 900 °С свідчить про високі значення швидкостей нагріву і відновлення окалини. Очевидно, на завершальній стадії нагріву (2-3 години) процеси металізації вже завершені і вміст капсул є металізованою губкою.

Приведені вище результати дозволяють оцінити вплив шихти на міру завершеності процесів металізації і зробити вибір її раціонального складу. Чисельні дослідження показали: зміст металодобавок в шихті має бути не менше 30 % по масі.

З метою вибору геометричних розмірів реакційної місткості виконана серія розрахунків нагріву шихти раціонального складу в капсулах різного діаметру. Нагрів досвідчених капсул здійснювали по наведеному вище температурному режиму впродовж 19 годин.

На рис. 2.30 представлені розрахункові температурні режими нагріву шихти № 2 в капсулах  $\varnothing$  від 0,3 м до 0,55 м, на рис. 2.32 - розрахункові температурні режими нагріву шихти № 3 в аналогічних умовах. На представлених температурних діаграмах нумерація кривих відповідає: 1 - температура газового середовища; 2 - свідчення пічного термоелектричного термометра; 3 - температура поверхні капсули; 4, 5, 6, 7, 8, 9 - осьова температура в капсулах діаметром 0,3м; 0,35 м; 0,4 м; 0,45м; 0,5 м; 0,55 м.

Для зручності порівняння великого масиву розрахункових даних на рис. 2.31 і рис. 2. 33 представлені узагальнені результати, відповідно, для шихт № 2 і № 3. З рис 2.30 витікає, що збільшення діаметру капсули з 0,3 до 0,5 м збільшує тривалість виходу осьової температури на рівень 900 °С з 8 до 12 годин.

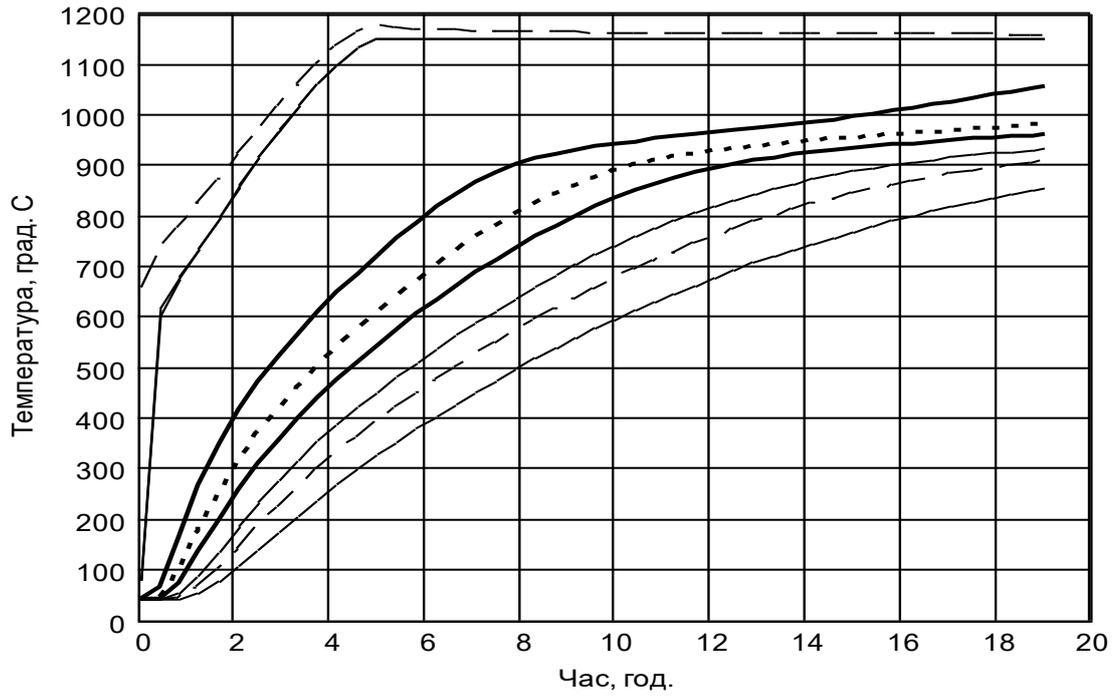
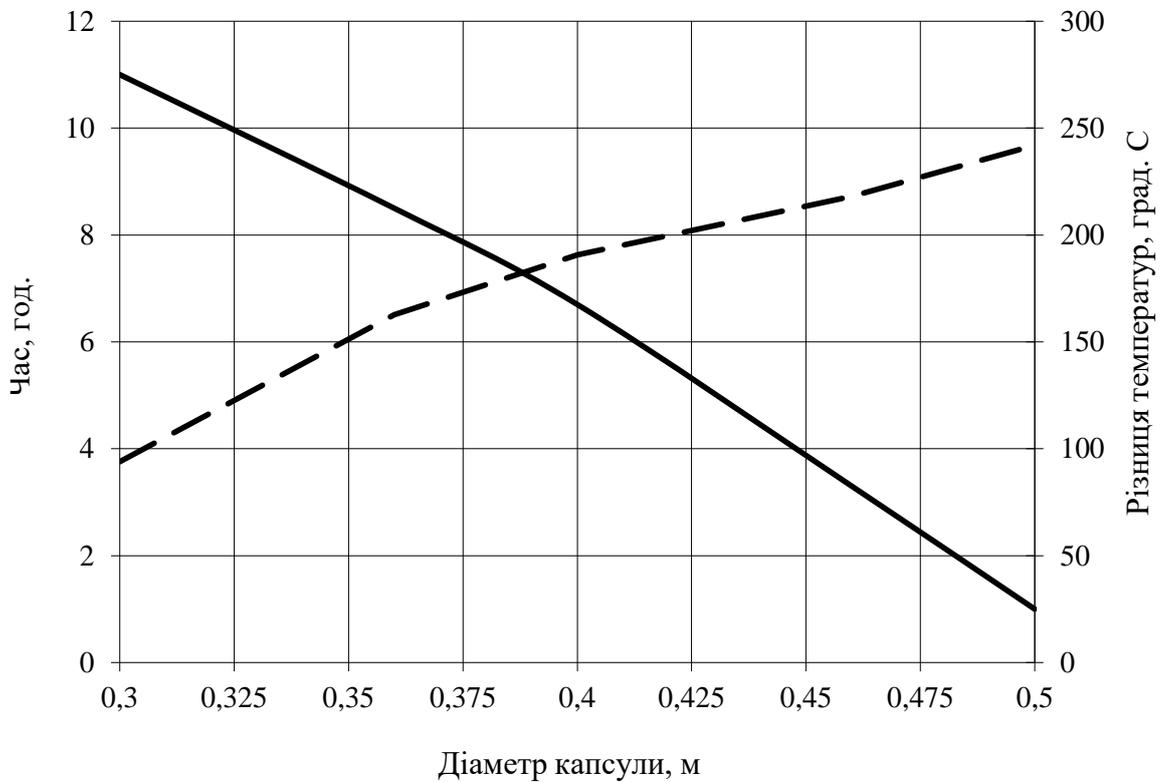


Рисунок 2.30 - Температурний режим нагріву і металізації шихти № 2 (30 % стружки) в капсулах Ø від 0,3 м до 0,55 м



1 - час виходу осьової температури на рівень 900 °С; 2 - кінцевий перепад температури по поперечному перерізу капсули.

Рисунок 2.31- До вибору діаметру капсули у разі нагріву шихти № 2

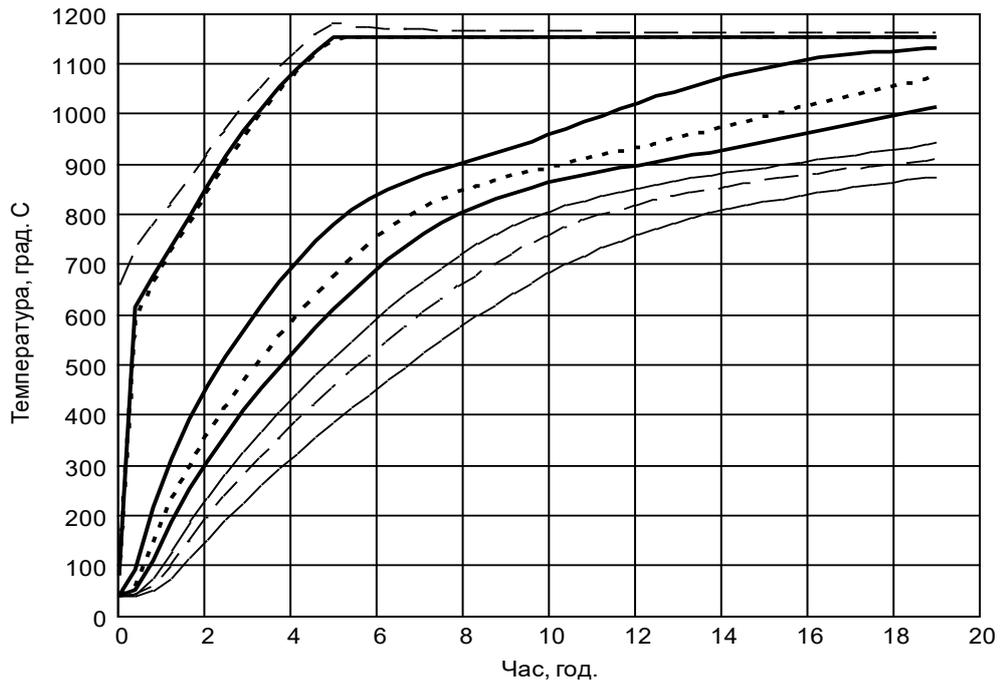
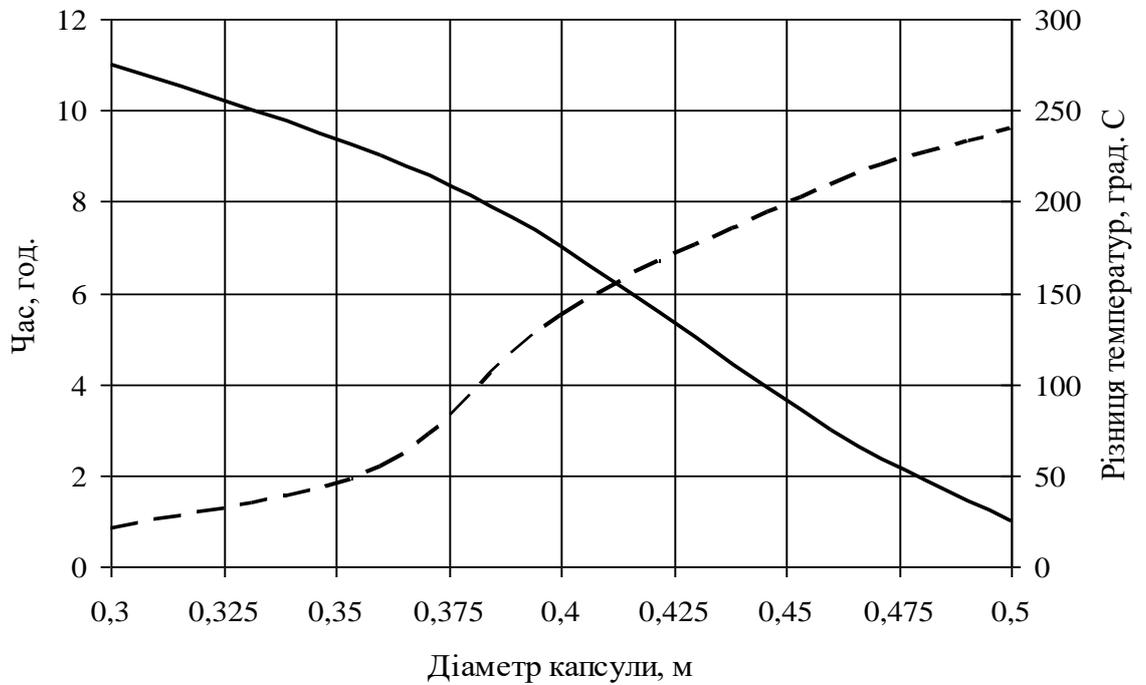


Рисунок 2.32. Температурний режим нагріву і металізації шихти № 3(45 % стружки) в капсулах Ø від 0,3 м до 0,55 м



1 - час виходу осьової температури на рівень 900 °С; 2 - кінцевий перепад температури по поперечному перерізу капсули.

### Рисунок 2.33 - До вибору діаметру капсули у разі нагріву шихти № 3

Збільшення діаметру капсули до  $\varnothing 0,55$  м, рис. 2.30, призводить до недогрівання осьових шарів шихти і зниження кінцевої осьової температури нижче рівня  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Аналогічно, за даними рис. 2.32, витікає, що при нагріві шихти № 3 збільшення діаметру капсули з  $0,3$  м до  $0,5$  м збільшує тривалість виходу осьової температури на рівень  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  з  $8$  годин до  $18$  годин, а збільшення діаметру капсули до  $\varnothing 0,55$  м знижує кінцеву осьову температуру нижче рівня  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Спільний аналіз узагальнених результатів нагріву шихти № 2 і № 3, рис. 2.31, рис. 2.33, дозволив вибрати геометричні розміри реакційної місткості для нагріву і металізації шихти раціонального складу. Як видно з представлених даних, збільшення діаметру капсули понад  $0,4$  м приводить до неприпустимого збільшення перепаду температури по її поперечному перерізу і істотному зниженню тривалості перебуванню осьових шарів шихти в ділянці температур, що забезпечують оптимальні умови для течії процесів відновлення окалини.

Таким чином, на підставі проведених чисельних досліджень в якості реакційної місткості для нагріву і металізації шихти на основі окалини швидкорізальної сталі, що містить  $(30\dots45)\%$  (по масі) стружку силового шліфування, вибрані металеві капсули  $\varnothing (0,3\dots0,4)$  м.

## 2.4 Розробка складів брикетованої шихти

Вуглетермічне відновлення шихти на основі оксидної сировини єнайбільш поширеним методом отримання металізованих матеріалів.

Відома шихта [22], яка містить оксидну сировину (окалина на основі заліза), -  $(60\dots69)\%$  (по масі) і вуглецьвмісну відновну суміш на основі термоштиба -  $(40\dots31)\%$  (по масі). Шихта піддається металізації в циліндрових капсулах, в яких її компоненти розміщені у вигляді вертикальних концентричних шарів, що не змішуються. При цьому оксидна сировина має

форму трубчастого шару, усередині і зовні якого розташована відновна суміш. Час відновлення оксидної частки шихти у високотемпературній зоні печі складає 44 години. Процес відновлення реалізується у результаті взаємодії оксидів металу з оксидом вуглецю CO що генерується термоштибом. Лімітуючою стадією, що визначає швидкість відновлення, а, отже, і продуктивність пічного агрегату, в якому здійснюється металізація шихти, є процеси дифузії молекул CO до часток окалини і у зворотному напрямі утворених молекул CO<sub>2</sub> через канали і пори в шихті. Гальмування процесів відновлення обумовлене утворенням металевого покриву навколоокремих невідновлених часток окалини і зростом, в цілому, щільного шару спеченої металізованої губки. По мірі наростання цих шарів їх дифузійний опір зростає, що і обумовлює істотне уповільнення швидкості процесу і значний час металізації шихти.

У зв'язку з цим, інтенсифікація процесів теплопередачі усередині реакційного об'єму капсули сприяє скороченню загального часу теплової обробки і підвищенню якості кінцевого продукту.

Інтенсифікація внутрішнього теплообміну можлива за рахунок:

- 1) збільшення коефіцієнта теплопровідності шихти;
- 2) зменшення лінійних розмірів реакційного простору.

У першому випадку до складу шихти вводили металеві добавки, що мають більший, ніж у окалини, коефіцієнт теплопровідності. Металодобавки збільшують теплопровідність шихти і чинять каталітичну дію на процес відновлення. У другому випадку зменшення діаметру реакційної місткості дозволило збільшити середньомасову температуру шихти і отримати кінцевий продукт, що задовольняє вимогам сталеплавильного виробництва.

Подальша інтенсифікація процесів теплопередачі можлива за рахунок розділення усїєї маси відновлюваної шихти на невеликі локальні об'єми. При цьому умови теплообміну на поверхні кожного об'єму залишаються приблизно однаковими. Локалізація процесів нагріву і відновлення окалини досягається шляхом брикетування шихти.

Використання брикетованої шихти забезпечує:

1) локалізацію відновних процесів в межах об'єму кожного окремого брикету;

2) здійснення відновних процесів одночасно по всьому об'єму брикету внаслідок того, що частинки оксидів металів і відновника знаходяться в безпосередньому контакті.

Технічні і технологічні питання відновлення брикетованої шихти на основі окалини низьковуглецевої сталі, концентратів молібдену і вольфраму розглянуті в роботах [20]. Виробництво залізних порошоків по методу комбінованого відновлення припускає відновлення брикетованої шихти у вертикальних муфельних печах безперервної дії в потоці відновного газу при температурі (1000...1100) °С. Загальний час відновлення складає (9...10) годин. Технологія і склади брикетованої шихти для отримання металізованих молібденових концентратів розглянуті в роботах. Відновлення молібденвмісних брикетів здійснюється методом комбінованого відновлення у вертикальних муфельних печах. Продукт металізації використовують в сталеплавильному виробництві в якості легуючого матеріалу при виплавці високолегованих марок сталей.

Окалина швидкорізальних сталей містить основні легуючі елементи в кількостях близьких до змісту останніх у відповідних марках сталей. Введення оксидних концентратів легуючих елементів до складу брикетованої шихти на основі окалини швидкорізальної сталі дозволяє отримати кінцевий металізований продукт з хімічним складом, що відповідає марці сталі, що виплавляється, і використати його в завалці печі в якості шихтового матеріалу.

Розроблений склад шихти для отримання металізованого легуючого матеріалу на основі металооксидних відходів виробництва швидкорізальних сталей [28].

Вона містить: вуглецевий відновник – (5,9...11) % (по масі), зв'язувальне – (7,7...9,3) % (по масі) і оксиди легуючих елементів, що представлені окалиною швидкорізальної сталі в кількості (39,5...75) % (по масі) і оксидними

концентрами легуючих елементів ( $\text{KMoO}_2$  із вмістом 58,2 %  $\text{MoO}_3$  і КШИ-1 із вмістом 67,7 %  $\text{WO}_3$ ) – решта. Брикетована шихта відомого складу розміщується в циліндрових капсулах, забезпечених спеціальними затворами, що запобігають повторному окисленню, і піддається відновленню в умовах полум'яної нагрівальної печі. Використання шихти в брикетованому стані забезпечує зменшення часу відновлення шихти і, як наслідок, збільшення продуктивності пічного агрегату. Час відновлення оксидної складової шихти складає (8...12) годин.

Одним із показників якості металізованого матеріалу є ступінь його відновлення. Швидкість металізації і пов'язані з нею показники, а також середній по перерізу капсули ступінь відновлення визначаються як температурним рівнем процесу, так і теплофізичними властивостями шихти і, зокрема, її коефіцієнтом теплопровідності. Брикетована шихта відомого складу, поміщена в реакційну місткість, утворює решітку, у вузлах якої знаходяться брикети, а в просторі між ними газоподібні продукти відновних реакцій. Така структура шару знижує рівень теплопередачі із-за низького значення коефіцієнта теплопровідності, як газової фази, так і брикетів. У зв'язку з цим, інтенсифікація процесів теплопередачі за рахунок збільшення теплопровідності шару шихти сприятиме збільшенню швидкості металізації і підвищенню якості кінцевого продукту.

В основу корисної моделі поставлено завдання розробки складу шихти, в якому за рахунок введення нових складових і їх кількісних співвідношень, забезпечується збільшення швидкості металізації шихти і ступеня відновлення оксидів металів.

Для вирішення поставленого завдання шихта для отримання металізованого легуючого матеріалу, що містить оксиди легуючих елементів, вуглецевий відновник і зв'язувальне відповідно до корисної моделі, вона додатково містить подрібнені леговані металеві відходи при наступному співвідношенні інгредієнтів, % (по масі):

- подрібнені леговані металеві відходи (7,6...39,5);

- вуглецевий відновник (5,0...10,3);
- зв'язувальне (5,7...9,5);
- оксиди легуючих елементів - решта.

Шихта може містити всі компоненти в компактованому вигляді або містить оксиди легуючих елементів, вуглецевий відновник, зв'язувальне і (33,0...89,5) % кількості подрібнених легованих металевих відходів в компактованому вигляді.

### РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОЇ МЕТАЛОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

Річний об'єм виробництва швидкорізальних сталей методом порошкової металургії на ПрАТ “Дніпроспецсталь”  $Q_M = 2500$  т.

З урахуванням того, що угар металу складає 4 %, то річний обсяг утвореної окалини, т

$$Q_{ок}^{річ} = \frac{Q_M \times 4}{100} = \frac{2500 \times 4}{100} = 100.$$

З урахуванням середнього складу окалиновмісної шихти (30 % стружки силового шліфування і 70 % окалини) і річного обсягу утвореної окалини кількість стружки силового шліфування, т

$$Q_{стр}^{річ} = \frac{Q_{ок}^{річ} \times 30}{70} = \frac{100 \times 30}{70} = 43.$$

Річний об'єм металізованого продукта, т

$$Q'_{мп}^{річ} = Q_{ок}^{річ} + Q_{стр}^{річ} = 100 + 43 = 143.$$

Річний об'єм металізованого продукта з урахуванням угару в сталеплавильній печі (6 %), т

$$Q_{мп}^{річ} = Q'_{мп}^{річ} = 143 \times 0,94 = 134,42.$$

Приймаємо, що кількість легуючих елементів в швидкорізальних сталях складає 12 %, тоді при перерахунку на річний об'єм отриманого металізованого продукту кількість чистих легуючих елементів, т

$$Q_{л} = \frac{Q^{pic}_{мн} \times 12}{100} = \frac{134,42 \times 12}{100} = 16,13.$$

Приймаємо, що середній вміст легуючих елементів в феросплавних матеріалах, які використовуються при виплавці швидкорізальних сталей складає 60 %. Тоді при перерахунку на річний об'єм отриманого металізованого продукту кількість легуючих елементів при перерахунку на вагу феросплавів, т

$$Q_{ф} = \frac{Q_{л} \times 100}{60} = \frac{16,13 \times 100}{60} = 26,88.$$

Економія при використанні металізованого продукту в сталеплавильному виробництві, грн/рік

$$E_{ф} = Q_{ф} \times z_{ф},$$

де  $z_{ф}$  - середня ціна феросплавів,  $z_{ф} = 62$  грн/кг.

$$E_{ф} = 26,88 \times 10^3 \times 62 = 1666560.$$

На відновлення окалиновмісної шихти потрібно 143 капсули (з розрахунку 1т в 1 капсулі). Для процесу металізації окалини використовують металічні відбраковані технологічні капсули.

Витрата природного газу на виробництво річного об'єму металізованого продукту, тис.м<sup>3</sup>

$$B_{n_2}^{pich} = B_{n_2}^{цикл} \times \frac{Q_{мп}^{pich}}{Q_{мп}^{цикл}},$$

де  $B_{n_2}^{цикл}$  - витрата палива на один цикл теплової обробки окалини,  $V_{n_2}^{цикл} = 2900$ т;

$Q_{мп}^{цикл}$  - кількість металізованого продукту за один цикл теплової обробки окалиновмісної шихти,  $Q_{мп}^{цикл} = 6$ т.

$$B_{n_2}^{pich} = 2900 \times \frac{143}{6} = 69,1167.$$

Згідно постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від "Про встановлення граничного рівня ціни на природний газ для промислових споживачів та інших суб'єктів господарювання" максимальний рівень ціни на природний газ, що реалізується промисловим споживачам для підприємств, Запорізького регіону складає близько 7661 грн за 1000 м<sup>3</sup>.

Річні витрати на природний газ, грн/рік

$$B_{n_2}^{pich} = B_{n_2}^{pich} \times z_{n_2},$$

де  $z_{n_2}$  - ціна на природний газ,  $z_{n_2} = 7,661$  грн/м<sup>3</sup>

$$B_{n_2}^{pich} = 69116,7 \times 7,661 = 529503$$

Заробітна плата робітникам за тарифом, грн.

$$ЗП_{мар} = оклад \times 11 \text{ місяців} \times штат = 10000 \times 2 \times 11 = 220000 .$$

Заробітна плата на період відпустки, грн

$$ЗП_{від} = ЗП_{мар} \frac{O}{Bн} ,$$

де  $O$  - кількість днів відпустки,  $O = 30$  днів ;

$Bн$  - кількість виходів,  $Bн = 221$  днів .

$$ЗП_{від} = 220000 \times \frac{30}{221} = 59725 .$$

Фонд оплати праці , грн.

$$\Phi ОП = ЗП_{мар} + ЗП_{від} = 220000 + 59725 = 279725 .$$

Експлуатаційні витрати, грн.

$$B_{екс} = B^{рiч}_{нз} + \Phi ОП + ЗП_{мар} = 529503 + 279725 + 110071 = 919299 .$$

Річний економічний ефект, грн/рік

$$E_p = E_{\phi} - E_{\epsilon} = 1666560 - 919299 = 747261 .$$

Термін окупності , років

$$T_{ок} = \frac{E_{\phi}}{E_{\epsilon}} = \frac{1666560}{919299} = 0,55$$

Розрахунок економічної ефективності впровадження технології утилізації вторинної металовмісної сировини наведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Розрахунок економічної ефективності впровадження технології утилізації вторинної металовмісної сировини

№ з/п	Найменування показника	Одиниці виміру	Значення
1	Річний об'єм металізованого продукту	т	$Q^{\text{річ}}_{\text{мп}}=143$
2	Кількість чистих легуючих елементів	т	$Q_{\text{л}}=16,13$
3	Кількість легуючих елементів при перерахунку на вагу феросплавів	т	$Q_{\text{ф}}=26,88$
4	Економія при використанні металізованого продукту в сталеплавильному виробництві	грн/рік	$E_{\text{ф}}=1666560$
5	Витрата природного газу на виробництво річного об'єму металізованого продукту	тис.м <sup>3</sup>	$V^{\text{річ}}_{\text{пг}}=69,167$
6	Річні витрати на природний газ	грн/рік	$V^{\text{рік}}_{\text{пг}}=529503$
7	Експлуатаційні витрати	грн.	$V_{\text{екс}}=919299$
8	Річний економічний ефект	грн/рік	$E_{\text{р}}=747261$
9	Строк окупності	років	0,55

## ВИСНОВКИ

За даними центральної заводської лабораторії ПрАТ "Дніпроспецсталь" проведено аналіз цехів підприємства на предмет окалиноутворення, який показав, що середній угар швидкорізальних сталей в цеху порошкової металургії і ковальському цехах складає 5,1 %, у прокатному цеху - 1,9 %.

Проведений аналіз коефіцієнтів використання високотемпературних нагрівальних печей на ПрАТ "Дніпроспецсталь", який показав, що є деякий резерв потужностей, який відкриває перспективу можливості використання цього устаткування в процесах металізації заздалегідь підготовленої вторинної металовмісної сировини. Визначений спосіб утилізації окалини - вуглетермічне відновлення у високотемпературних двокамерних нагрівальних печах пресу 1250 тс.

Розрахунок нагріву і металізації шихти в виконано відповідно до рекомендацій по відомій математичній моделі нагріву металу в камерній нагрівальній печі. Вибір складу шихти і визначення параметрів режиму її теплової обробки виконали шляхом проведення лабораторних досліджень і методом математичного моделювання.

В якості початкових матеріалів при складанні шихти використали подрібнену до фракції 0,63 мм окалину швидкорізальної сталі Р6М5, графіт 0,45 мм і металеву стружку силового шліфування сталі Р6М5. При збереженні співвідношення між окалиною і графітом відповідно до 85 % і 15 % (по масі). Досліджувані склади шихти відрізнялися вмістом металодобавок, а саме: № 1 - 15 %; № 2 - 30 %; № 3 - 45 % (по масі). Нагрів дослідних капсул виконали в робочій камері вогневого стенду ПрАТ "Дніпроспецсталь" в режимі монотонно зростаючої температури печі.

Визначені теплофізичні властивості окалиновмісної шихти (ефективний коефіцієнт температуропровідності  $\alpha_{\text{эф}}$ , ефективний коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\text{эф}}$ , ефективна питома об'ємна теплоємність  $c_{\text{эф}}$ ), які враховують перетворення в шихті.

Для досліджених складів шихти по експериментально визначеному температурному полю виконали рішення зворотної задачі теплопровідності і визначили температурну залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності  $\alpha_{\text{эф}}$ . В основу рішення зворотної задачі теплопровідності було покладено відоме класичне рішення рівняння теплопровідності. З метою оцінки похибки визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності виконали рішення задачі металізації окалини для умов експериментального нагріву шихти, що містить 30 % стружки. Зіставлення розрахункової осьової температури з її експериментальним аналогом дозволило зробити наступні висновки:

- а) розбіжність результатів розрахунку з експериментальними даними найвідчутніше в першому періоді нагріву;
- б) в другому і третьому періоді точність відновлення температурного поля зразка досить висока, при цьому похибка розрахунку у кінці процесу нагріву не перевищує одного відсотка.

На підставі проведених чисельних досліджень в якості реакційної місткості для нагріву і металізації шихти на основі окалини швидкорізальної сталі, що містить (30...45) % (по масі) стружку силового шліфування, вибрані металеві капсули  $\varnothing$  (0,3...0,4) м.

Розроблений склад брикетованої шихти, % (по масі):

- подрібнені леговані металеві відходи (7,6...39,5);
- вуглецевий відновник (5,0...10,3);
- зв'язувальне (5,7...9,5);
- оксиди легуючих елементів - решта.

Річний економічний ефект від впровадження технології утилізації вторинної металовмісної сировини на резервному устаткуванні ПрАТ "Дніпрспецсталь" склав 747261грн/рік. Розрахований строк окупності склав 0,55 року.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Міністерство енергетики України : веб сайт. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (дата звернення 05.06.2021).
2. Державна служба статистики України : веб сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 05.06.2021).
3. Державна служба статистики України : веб сайт. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2018/dop/06/dop\\_vp2017.pdf](http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/dop/06/dop_vp2017.pdf) (дата звернення 07.06.2021).
4. Нафтогаз група. Обсяги використання газу : веб сайт. URL: [https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&\]](https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&) (дата звернення 15.06.2021).
5. Вольнкина Е.П., Протопопов Е.В. Отходы металлургического предприятия: от анализа потерь к управлению. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005. №6. С. 72-76.
6. Chakravarty, K., Kumar, S., 2020. Increase in energy efficiency of a steel billet reheating furnace by heat balance study and process improvement. *Energy Reports* 6, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2020.01.014>.
7. Zhao, J., Ma, L., Zayed, M.E., Elsheikh, A.H., Li, W., Yan, Q., Wang, J., 2021. Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry. *Process Safety and Environmental Protection* 147, 1209–1228. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.045>.
8. Bugdayci, M., Deniz, G., Ziyreker, C., Turan, A., Oncel, L., 2020. Thermodynamic modeling and production of FeCo alloy from mill scale through metallothermic reduction. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23, 1259–1265. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.003>.

9. Iuțiu-Varvara, D.-A., Aciu, C., Maria Mârza, C., Sas - Boca, I.-M., Tintelecan, M., 2018. Assessment of recycling potential of the oily mill scale in the steelmaking industry. *Procedia Manufacturing* 22, 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.035>.

10. Носков В.А. Брикетирование, как технология рециклирования мелкофракционных промышленных отходов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1998. № 3. С. 119-121.

11. Капустин Е.А. Черная металлургия на пути к безотходной технологии. *Сталь*. 1998. № 12. С. 65-67.

12. Бычков С.В., Ванюкова Н.Д., Носоченко О.В. Опыт использования брикетов на основе прокатной окалины в доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 1. С. 14-16.

13. Крипак С.Н., Шатоха В.И., Камкина Л.В. Эколого-технологические особенности подготовки замасленной прокатной окалины для использования в агломерационной шихте. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 4. С. 109-112.

14. Носков В.А. Подготовка и переработка железосодержащих отходов в металлургическом производстве Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 2. С. 109-113.

15. Носков В.А. Современное состояние брикетирования техногенных отходов на металлургических предприятиях Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 6. С. 90-94.

16. Сокурченко А.В., Шеремет В.А., Кекух А.В. и др. Опыт комбината «Криворожсталь» по утилизации железосодержащих шламов и вторичной окалины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 3. С. 111-114.

17. Крипак С.Н. Совершенствование технологических процессов подготовки металлургического сырья с целью утилизации замасленной прокатной окалины : Автореферат диссертации кандидата техн. наук. Днепропетровск, 2006. 23 с.

18. Носков В.А., Маймур Б.Н., Можаренко Н.М. Подготовка брикетированием мелкофракционных отходов горно-металлургического и машиностроительного комплексов Украины к утилизации в металлургических агрегатах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 1. С. 119-122.

19. Носков В.А., Маймур Б.Н., Можаренко Н.М. Подготовка брикетированием мелкофракционных отходов горно-металлургического и машиностроительного комплексов Украины к утилизации в металлургических агрегатах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 2. С. 99-104.

20. Острик П.Н., Гасик М.М., Пирог В.Д. Металлургия губчатых и порошковых лигатур. Интенсификация работы нагревательных печей. Киев : Техніка, 1992. 127 с.

21. Ожогин В. В., Жерлицина О. В., Бочек А. П. и др. Использование нетрадиционных восстановителей в производстве металлизированных брикетов. *Сталь*. 2007. № 1. С. 96-99.

22. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : Учебник для вузов. / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. Москва : Металлургия, 1987. 792 с.

23. Теплотехнический справочник: у 2 т. / ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева 2-е изд., испр., доп. Москва, 1976. Т. 2. С. 311-313.

24. Тепломассообмен. Методические указания к лабораторному практикуму для студентов ЗГИА специальностей ТЭ, ГЭ, ЭМ дневной и заочной форм обучения. / Г.Ф. Алексеев, И. Г. Яковлева, С.Е. Чижов, Н.А. Храмова. Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2004. С. 14-19.

25. Арутюнов В. И., Бухмиров В.В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва : Металлургия, 1990. 239 с.

26. M. Rimar, A. Kulikov, M. Fedak, O. Yeromin, K. Sukhyu, O. Gupalo, E. Belyanovskaya, R. Berta, M. Smajda, M.R. Ratnayake. Mathematical Model of a

Heating Furnace Implemented with Volumetric Fuel Combustion. Processes. 2020. No 8. P. 469. DOI : 10.3390/pr8040469.

27. Расчеты нагревательных и термических печей: Справочник / под ред. В. М. Тымчака, В. Л. Гусовского Москва : Metallurgy, 1983. 481 с.

28. Григорьев С. М., Карпунина М. С. Разработка технологии получения металлизированной паспортной заготовки для выплавки легированных сталей. *Сталь*. 1998. №1. С. 73-76.

29. Ревун М.П., Григорьев С.М., Каюков Ю.Н., и др. Тепловая обработка мелкодисперсных отходов быстрорежущих сталей. *Известия Вузов. Черная металлургия*. 1991. №10. С. 86-88.

30. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.

31. Баріщенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.

32. Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2009. Вип. 20. С. 130–140.

33. Крупенников С. А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации. *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2006. №3. С. 59-62.

34. Технологическая инструкция. Краткое описание оборудования цеха порошковой металлургии и общие технологические положения по ковке металла на ковочных агрегатах АКП-12,5 МН и 5,0 МН. ТИ 143-ПМ-3-02. г.Запорожье, 2002.

35. Исследование, разработка и промышленное опробование элементов технологии металлизации окалины высоколегированных сталей в условиях пламенных нагревательных печей. / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2008. Вип. 18. С. 13-18.

36. Тайц Н. Ю., Гольдфарб Э. М. Методика определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности сталей. *Заводская лаборатория*. 1950. т. XVI. №3. С. 314-319.

37. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. 2-е изд. Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 567 с.

38. Коздоба Л. А., Круковский П. Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев : Наукова думка, 1982. 360 с.

39. Погорелов В. Н., Ревун М. П., Чепрасов А. И., Каюков Ю. Н. Определение теплофизических характеристик сыпучего материала. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 1996. № 9. С. 62-66.

40. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд. Москва : Металлургия, 1975. 367 с.