Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота бакалавра

рівень вищої освіти__перший (бакалаврський) рівень_____

на тему_Технологічні особливості виробництва графітованих електродів

Виконав: студент _*4*_курсу, гр. *6.1362-м-с*
___Щербина Ю.А._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Металургія*__
(шифр і назва)

Керівник _Карпенко Г.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент _Воденнікова О.С._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *металургія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"____" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Щербині Юлії Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Технологічні особливості виробництва графітованих електродів
керівник роботи (проєкту)*Карпенко Ганна Володимирівна, канд. техн. наук*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "28" лютого 2024 року № 359-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта).
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*: 1 Технології розвитку вуглеграфітових матеріалів. 1.1 Схема виробництва вуглеграфітових матеріалів. 1.2 Печі графітації. 1.2.1 Загальні відомості. 1.2.3 Токопідводні електроди. 1.3 Прилади та методи для управління процесом графітації. 1.3.1 Методи керування режимом графітації. 2 Матеріальний та тепловий баланси печей графітації. 2.1 Матеріальний баланс. 2.2 Тепловий баланс. 2.3 Розрахунки графітувальних печей. 2.3.1 Розрахунок перерізу та числа електродів.*
2.3.2 Визначення довжини електродів. 2.3.3 Розрахунок розмірів печі.
2.3.4 Розрахунок потужності трансформатора. 3 Охорона праці та техногенна безпека. 3.1 Техніка безпеки у цеху графітації обпалених заготовок. 3.1.1 Основні шкідливості та небезпеки цеху графітації

обпалених заготовок. 3.1.2 Заходи щодо усунення шкідливостей та небезпек. 3.1.3 Електроустаткування.

4. *Презентаційний матеріал 10 слайдів (на 10 сторінках)*

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1 Технології розвитку вуглеграфітових матеріалів.	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
2 Матеріальний та тепловий баланси печей графітації.	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
3 Охорона праці та техногенна безпека	*Карпенко Г.В., доцент кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., зав. кафедрою*	

7. Дата видачі завдання: *01.03.2025 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Технології розвитку вуглеграфітових матеріалів.*		
4	*Матеріальний та тепловий баланси печей графітації.*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		

Студент *Ю.О. Щербина*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) *Г.В. Карпенко*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної робота бакалавра: 74 с., 4 табл., 16 рис., 41 джерело.

ГРАФІТ, ПЕЧІ, ГРАФІТАЦІЯ, НАГРІВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ЕЛЕКТРОДИ, ЯКІСТЬ, КЕРН, ПОДИНА, ВУГЛЕГРАФІТОВІ МАТЕРІАЛИ, ЗАГОТІВКА

Об’єкт дослідження – особливості виробництва графітованих електродів.

Предмет дослідження – вуглеграфітові матеріали .

Мета роботи – дослідити процеси графітації та особливості виробництва графітованих електродів.

Методики дослідження – розроблені та стандартні методики виготовлення графіта методом графітування, визначення потужності печей та побудова кривих при графітуванні різних виробів.

В результаті аналізу сучасного стану виробництва графітованої продукції, проведеного на основі вивчених літературних джерел і практичного досвіду дослідницької роботи видно, що у промисловості графітування вуглеграфітової продукції проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого (печі Кастнера), або непрямого (печі Ачесона) нагріву, що забезпечують рівень температур у виробах 2400-3000 °С;

Проведена оцінка чинників, що впливають на температурні і енергетичні режими процесу графітування.

В розділі з охорони праці та техногенної безпеки проведено аналіз умов праці та заходів безпеки у цеху графітації обпалених заготовок. Розглянуті заходи щодо усунення шкідливих та небезпечних факторів. Проведено розрахунок розсіювання газових викидів у атмосфері.

ЗМІСТ

ВСТУП……... 7
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ МАТЕРІАЛІВ…… 9
1.1 Схема виробництва вуглеграфітових матеріалів……..... 9
1.2 Печі графітації ……..... 10
1.2.1 Загальні відомості.....……. 18
1.2.2 Піч нормальна пряма……..... 28
1.2.3 Токопідводні електроди..... 31
1.3 Прилади та методи для управління процесом графітації..... 32
1.3.1 Методи керування режимом графітації..... 32
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛЬНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ПЕЧЕЙ 32
ГРАФІТАЦІЇ..... 34
2.1 Матеріальний баланс……..... 34
2.2 Тепловий баланс……..... 36
2.3 Розрахунки графітувальних печей.....……
2.3.1 Розрахунок перерізу та числа електродів……..... 38
2.3.2 Визначення довжини електродів……..... 38
2.3.3 Розрахунок розмірів печі.....……..... 25
2.3.4 Розрахунок потужності трансформатора……..... 43
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА…… 46
3.1 Техніка безпеки у цеху графітації обпалених заготовок.....
3.1.1 Основні шкідливості та небезпеки цеху графітації обпалених заготовок.....
3.1.2 Заходи щодо усунення шкідливостей та небезпек..... 54
3.1.3 Електроустаткування..... 60
3.2 Виробнича санітарія у цеху графітації обпалених заготовок..... 61
3.2.1 Природне та штучне освітлення..... 62
3.2.2 Вентиляція..... 69

3.2.3 Побутові та допоміжні приміщення..... 71
3.2.4 Індивідуальні засоби захисту..... 75
3.3 Протипожежна безпека у цеху графітації..... 45
3.3.1 Характеристика цеху з вибухопожежної безпеки..... 26
3.3.2 Профілактичні протипожежні заходи..... 23
3.3.3 Засоби гасіння пожеж..... 23
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 33
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ…….. 33

ВСТУП

Вуглеграфітові матеріали у своїй основі містять вуглець, що має низку властивостей, які дали змогу застосувати його для широкого спектра виробів, у якому майже кожен вид має специфічні властивості.

Вуглець має низку найважливіших властивостей, які й зумовили основні технологічні прийоми виробництва виробів на його основі.

Внаслідок низького тиску парів вуглецю всі процеси під час виготовлення різних видів виробів протікають у твердому стані.

Одним із найбільших споживачів електродів є алюмінієва промисловість. Електроди тут працюють у вельми жорстких експлуатаційних умовах (висока температура, агресивне середовище у вигляді розплавлених солей тощо), тому вони повинні задовольняти таким основним вимогам:

1) витримувати високу температуру;

2) мати хорошу електропровідність, малу пористість і достатню механічну міцність;

3) мати гарну стійкість проти окислення киснем повітря і роз'їдання різними хімічними речовинами;

4) містити мінімальну кількість домішок;

5) мати правильну геометричну форму;

6) бути досить дешевими.

Найповніше цим вимогам відповідають електроди з вуглецевих матеріалів.

З вуглецевих матеріалів виготовляють не тільки електроди, а й блоки, плити та інші вироби для футерування апаратів, у яких протікають електрохімічні та хімічні процеси.

У більшості випадків електрод не тільки служить засобом підведення струму до середовища, а й сам бере участь у процесах, що відбуваються в ньому. Наприклад, при електротермічних процесах матеріал електрода

служить відновником; при електролітичному отриманні алюмінію енергія, що виділяється під час окислення електрода (анода), позитивно впливає на енергетичний баланс електролізера (деполяризація).

Вуглецеві електроди та вироби залежно від методу їх виготовлення поділяють на пресовані обпалені та безперервні самообпалювальні. Крім того, вуглецеві вироби можна поділити залежно від сировини, з якої вони виготовлені, на вугільні, коксові, графітовані.

Протягом понад століття вишукували раціональні шляхи виготовлення виробів із вуглецевих матеріалів. Лише у вісімдесятих роках дев'ятнадцятого століття (1876...1877 рр.) були розроблені та здійснені в промисловості основні технологічні прийоми: 1 - подрібнення вихідних вуглецевих матеріалів; 2 - змішування зі сполучною речовиною; 3 - пресування; 4 - випал виробів, у захисному середовищі (засипці) [1].

Електродна промисловість освоїла і виробляє безліч вуглецевих матеріалів. Нині вуглеграфітові матеріали широко використовують під час виготовлення різних апаратів і машин для хімічної промисловості, вони служать як конструкційні матеріали, коли використовують їхні цінні антикорозійні та теплопровідні властивості.

Антифрикційні властивості графіту широко використовуються під час виробництва підшипників і кілець ущільнювачів, що працюють у дуже важких умовах (середовище, температура тощо), де не можуть служити звичайні матеріали та мастило. В атомній енергетиці графітові матеріали застосовують у будівництві реакторів, де вони виконують роль сповільнювача і відбивача нейтронів.

Усі види вуглеграфітових матеріалів досить міцні, добре витримують коливання температури і добре обробляються ріжучим і шліфувальним інструментом, що дає змогу щільно припасовувати деталі апаратури і навіть виготовляти точні деталі.

Завдяки поєднанню хімічної стійкості з гарною тепло-провідністю, графіт незамінний для теплообмінної апаратури та агресивних рідин.

В останні 40 - 50 років широке застосування в металургії, хімії, енергетиці (особливо в атомній), машинобудуванні і т. д. використовують різні вуглеграфітні матеріали.

1 ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Безліч технологічних процесів промислового виробництва супроводжуються високими рівнями теплових, електричних і механічних навантажень. Це надає необхідність застосування конструкційних матеріалів, наступними фізичними властивостями, що характеризуються: високою термостійкістю і електропровідністю, хімічною інертністю, високою міцністю, антікорозійністю і антіфрікційністю і так далі. Матеріалом, що володіє такими властивостями, є штучний графіт.

Вуглеграфітові матеріали знайшли широке застосування в чорній і кольоровій металургії, в ядерній енергетиці і ракетній техніці, в електротехніці і хімічному машинобудуванні. В даний час спостерігається подальше розширення сфер застосування виробів з вуглеграфітових матеріалів.

Використання цих матеріалів в різноманітних областях техніки і промисловості обумовлене їх унікальними властивостями. Вугільні і графітові матеріали володіють високій вогнетривкості, інертністю до багатьох металів, шлакам вище за температуру їх плавлення і іншій корозійній середі. Вони мають високу механічну міцність, яка зберігається, а у графіті навіть росте з підвищенням температури. До найбільш важливих виробів з штучного графіту відносяться електроди електротермічної і електрохімічної промисловості, блоки футерування ядерних реакторів, агрегатів чорної і кольорової металургії і так далі.

Графіт відрізняється:

- високою анізотропією властивостей. Коефіцієнт анізотропії для монокристалів може бути вище 5;

- достатньо високою інертністю;

- хорошими антифрикційними властивостями. Коефіцієнт тертя по металах (для робочих швидкостей до 10 м/с) складають 0,03…0,05;

- високою електро- і теплопровідністю;

- діамагнитністю, з високою магнітною сприйнятливістю в напрямі, перпендикулярному базисній плоскості, і незначною в паралельному напрямі;

- зростанням міцностних характеристик із збільшенням температури. Так межа міцності на розтягування з підвищенням температури зростає в 1,5…2,5 рази, досягаючи свого максимуму при 2400…2800 °С; межа міцності на стискуванні збільшується в 1,3…1,6 рази в інтервалі 2200…2300 °С; модулі пружності і зрушення зростають в 1,3…1,6 рази в інтервалі 1600…2200 °С. З підвищенням температури до 3000 °С і вище міцностні властивості досить різко знижуються і при температурі 3200 °С наближаються до властивостей при 20 °С;

- крихкістю в інтервалі температур 20…2000 °С;

- невисокою щільністю – 1700…2200 кг/м^3.

У промисловості використовується в основному штучний графіт. Штучний графіт отримують з вуглецевмісної речовини. Процес отримання штучного графіту називається процесом графітування і полягає в тривимірному впорядковуванні атомів вуглецю в структуру графіту, під впливом високих температур.

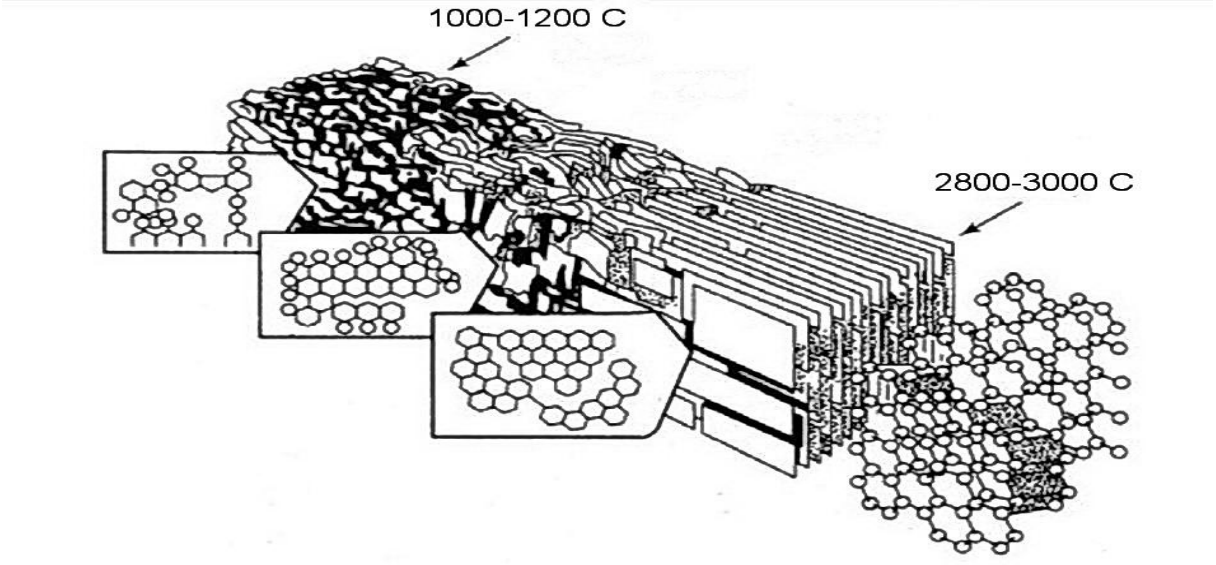


Рисунок 1.1 – Процес вирівнювання кристаліта під час процесу графітації

Залежно від способу отримання розрізняють наступні типи штучного графіту:

- ачесоновський графіт, найбільш широко поширений в промисловості, отримують шляхом нагрівання суміші коксу або кам'яного вугілля з пеком;

- рекристаллізованний графіт - термомеханічною обробкою суміші, що містить кокс, пік, природний графіт і карбідоутворювальні елементи;

- пірографіт - піролізом газоподібних вуглеводів;

- доменний графіт - виділяється при повільному охолоджуванні великих мас чавуну;

- карбідний графіт - утворюється при термічному розкладанні карбідів

Відношення міцності до питомої ваги при кімнатних температурах у піролітичному графіті складає 10^4, що перевищує аналогічну величину для вольфраму і неіржавіючої сталі. Низький коефіцієнт лінійного розширення дозволяє отримувати конструкційні вироби з вуглеграфітових матеріалів, що відрізняються постійністю розмірів при підвищених температурах. Вони володіють досить хорошими тепло - і електропровідністю. Теплопровідність піролітичного графіту, наприклад, уздовж шарів вище, ніж у міді, а в напрямі, перпендикулярному шарам, - нижче, ніж у кераміки. Висока теплопровідність графіту у поєднанні з низькими модулем пружності і коефіцієнтом лінійного розширення забезпечують йому високу термічну стійкість і знижують до мінімуму можливість розтріскування виробів з графіту при теплових ударах.

Чистий графіт має низький коефіцієнт поглинання нейтронів, рівний приблизно $3 \cdot 10^{-4}$ см$^{-1}$, і найвищий (після важкої води) коефіцієнт уповільнення (~200), що і дозволяє використовувати графіт в реакторах.

Фізико-хімічні і механічні властивості вуглеграфітових матеріалів формуються на всіх етапах виробництва останніх, починаючи від вибору і приготування сировини і кінчаючи високотемпературною обробкою заготовок в графітувальних печах. Введення нових додаткових

технологічних операцій (наприклад, просочення вуглеграфітових виробів імпрегнатами органічного і неорганічного походження, випалення під тиском, термомеханічна обробка і тому подібне), використання досконалішого сучасного устаткування, поліпшення рецептури, ведення процесів випалення і графітування по науково обґрунтованих температурно-тимчасових режимах, - все це значно змінює властивості вуглеграфітових виробів, дозволяє отримувати останні з необхідним поєднанням фізико-хімічних і механічних властивостей.

Початковим матеріалом, сировиною, для отримання електродного графіту служать продукти нафтової і кам'яновугільної промисловості: піролізний і крекінговий нафтовий кокс, пековий кокс, кам'яновугільні пеки і смоло пеки.

Нафтові і пекові кокси різні як за способом отримання, так і по своїх фізико-хімічних і механічних властивостях. При виробництві монолітних графітованих виробів кокс використовується як наповнювач, а як матеріал, що пов'язує і просочує, служать кам'яновугільні пеки з різними температурами розм'якшення і смоло пеки. Пеки отримують з кам'яновугільної смоли після видалення з неї в перегінних кубах антраценових масел. Від ступеня видалення масел залежить склад і температура розм'якшення пека.

В останні 40 - 50 років широке застосування в металургії, хімії, енергетиці (особливо в атомній), машинобудуванні і т. д. використовують різні вуглеграфітні матеріали.

Використання вуглеграфітних матеріалів (ВГМ) почалося 200 років тому, і воно було пов'язане з розпочатої на Заході промислової революції. Розвиток електротехніки зажадало створення матеріалів з вуглецю. Перше застосування вугільних електродів із спресованого і обпаленої суміші порошкового деревного вугілля зі смолою для створення електричної дуги можна вважати початком виробництва ВГМ. Електрична дуга була вперше виявлена академіком В. В. Петровим у 1802 р. Петров також поклав початок

застосуванню електричній дуги і в металургійних процесах. Вперше практичне використання електричної дуги в цілях освітлення було запропоновано відомим електротехніком П. Н. Яблочкововим в електричній свічці, винайденої в 1876 р. У 1846 р. був запатентованим процес виробництва вугільних електродів з порошкового коксу та цукру. Обпалені електроди піддавалися подальшому просоченню концентрованим розчином цукру і повторному випалу. Сто років по тому цей режим був повторений для отримання високощільних ВГМ.

Отримання штучного графіту нагріванням до високих температур різних вуглецевих речовин відноситься до 1893 - 1896 рр. Вперше графітування вугільних електродів запропонував Дж. Кастнер (США, 1893р.), однак він не розробив техніку графітації, а обмежився пропозицією нагрівати вугільні стрижні, затискаючи їх між струмопровідними електродами, по яким проходить електричний струм. Перші промислові печі по графітації були сконструйовані у Франції в 1893 - 1895 рр. Це були дугові печі безперервної дії для графітації вугільних стрижнів невеликого діаметру.

У замкнутому просторі між двома електродами запалювалася електрична дуга, через яку простягалися вугільні стрижні. Непрактичність печей даного типу очевидна, тому вони не отримали промислового розвитку. А. Ачесон (США, 1896 р.) знайшов більш ефективний спосіб графітації, застосовуючи нагрівання струмом, який проходив через оброблюваний матеріал. Їм же запропонована конструкція печі, що дозволяє одночасно графітувати великі маси матеріалів різноманітних форм і розмірів. Спосіб, розроблений А. Ачесоним, використовується практично у всіх країнах мира. З цього часу техніка його методу майже не зазнала змін, збільшились тільки розміри печей, зросли потужності живлячих трансформаторів.

У першій половині XX в. основним споживачем ВГМ була електротехніка. Було освоєно виробництво вугільних блоків і електродних

мас для сталеливарної і алюмінієвої промисловості, вугільних і графітованих електродів різного призначення, електрощіток для двигунів і генераторів. Випускалися також ВГМ іншого призначення: вогнетривкі вироби, конструкційні матеріали, анті фрикційні вироби, ядерний графіт.

З кінця 60 - х р. у ряді виробництв почали використовувати вироби з вуглецевого волокна. Вуглецеві волокна, просочені термостійкими епоксидними поліамідними смолами (вуглепластики), находять широке застосування для виготовлення космічної, авіаційної техніки та в автомобільній промисловості. Маючи високу механічну міцність, близькою до міцності сталевих ниток, і малу щільність, вуглепластик дозволяє зменшити вагу виробу, поліпшивши тим самим його техніко - економічні показники.

З кінця XX в. інтенсивно розвивають технології вуглецевих матеріалів , пов'язані з переходом від макрооб'єктів до частинок нанометрового розміру (1…10нм), які якісно змінюють фізико-хімічні властивості, як окремих з'єднань, так і одержуваних на їх основі систем. У результаті впливу поверхневих атомів електронна будова і визначаються їм електричні, теплові, оптичні, магнітні й інші властивості наночастинки значно відрізняються від відповідних характеристик аналога. До таких матеріалів відносяться нанографіти, одношарові вуглецеві нанотрубки і т. п.

1.1 Схема виробництва вуглеграфітових матеріалів

Принципова технологічна схема електродного виробництва складається з низки основних операцій:

- прийом і підготовка сировинних матеріалів;
- приготування електродної маси;
- формування заготовок;
- випал або графітація;
- механічна обробка заготовок.

За цією схемою виробляють графітовану продукцію. Під час виробництва вугільних виробів виключається графітація, а товарні маси після змішування і брикетування відправляють споживачеві.

Незважаючи на різноманітність виробів електродного виробництва, їх виготовляють за загальним способом. Процес полягає в спіканні обпалених виробів, відформованих із суміші сипучого вугільного матеріалу з добавкою сполучних речовин [1].

На рисунку 2.1 наведено принципову схему виробництва електродних виробів усіх видів. Однак залежно від вихідної сировини, а також від наявності того чи іншого технологічного обладнання схема виробництва може змінюватися.

Виробництво електродної продукції характеризується великою кількістю операцій і значною тривалістю процесу, що досягає, наприклад, під час виробництва графітованих виробів більше 2-х місяців.

Дуже важливо чітко організувати роздільне приймання і закрите зберігання сировинних матеріалів, різних за властивостями. Це дасть змогу забезпечити точне дозування сировини на наступних стадіях виробництва, що є основою для отримання виробів стабільної якості.

Тверді вуглецеві матеріали, що надійшли на завод, зберігають у спеціальних, обов'язково закритих складах, де оберігають від зволоження і засмічення.

Зазвичай ці матеріали прибувають на завод у шматках розміром 25 - 70 мм. На заводі матеріали попередньо дроблять на зубчастих валкових або щокових дробарках. Ступінь попереднього дроблення визначається технологічними операціями і наявністю обладнання. Для великих шматків існує операція ручного піддрібнювання на колосникових решітках перед попереднім дробленням.

Зберігання кам'яновугільного пеку визначається способом застосування його у виробництві. Зазвичай пек застосовують у рідкому вигляді, тому його зберігають у спеціальних бункерах з підігрівом, що

називаються пекоплавителями. Якщо пек використовується у твердому вигляді, його зберігають у критих приміщеннях. Під час роботи на твердому пеку в складських приміщеннях встановлюють дробарки для подрібнення пеку. Розчинники (антраценова олія) зберігаються в цистернах і надходять безпосередньо у відділення змішування.

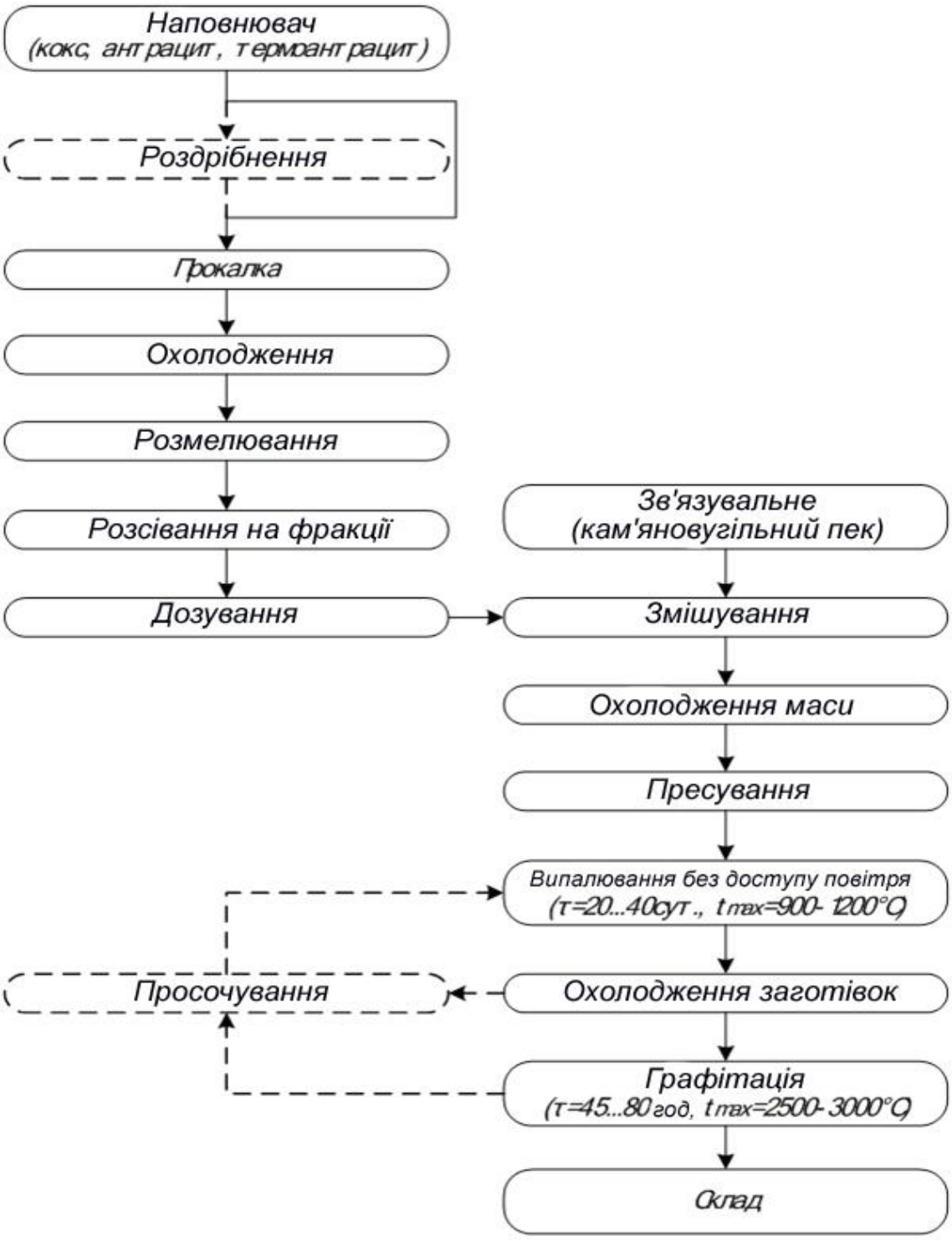


Рисунок 1.2 – Схема виробництва графітової продукції

Графітування вуглецевих матеріалів - є завершальною стадією тривалого і багато передільного процесу виготовлення всіх видів графітованих виробів.

Графітуванню в основному піддають заготівки, які пройшли пресування і випалення. Від них вони успадковують велику і нерівномірну пористість. Проте електропровідність і теплопровідність, а також низьких фрикційних властивостей вироби набувають в процесі графітування. Вимоги до готових графітованих виробів, зрозуміло, не обмежується тільки цими властивостями. Вони повинні володіти рядом інших якісних показників дуже важливих при експлуатації: міцностних характеристик, теплофізичних і деяких хімічних властивостей, які так само формуються при графітуванні. Якщо звернутися до конкретних якісних показників тих або інших властивостей, то слід зазначити, що вони для різних видів графітованих виробів неоднакові. Умови експлуатації їх, головним чином, впливають на показники якісних характеристик виробів. Наприклад, електроди для сталеплавильних печей повинні володіти високою електропровідністю в осьовому напрямі, а також високою теплопровідністю. Тільки в цьому випадку гарантується їх ефективна робота. Або, наприклад, до електрографітових щіток для електричних машин не пред'являють таких високих вимог по електропровідності як до електродів. Навіть навпаки питомий електричний опір має бути підвищеним, щоб створити хороші умови комутації при роботі щітки на машині. Питомий електроопір при графітуванні зменшується не до граничного значення, як це спостерігається при графітуванні електродів. Для щітки необхідно в процесі графітуванні знизити фрикційні властивості. Тому питомий електроопір при графітуванні має бути зменшене, проте не настільки, щоб це пошкодило її роботі. Виникає додаткова вимога - в процесі графітування різко підвищити антифрикційні властивості. Коефіцієнт тертя надає великий вплив на роботу і втрати в ковзаючому контакті. Для щіток значення коефіцієнта тертя, що допускається, як

правило, не перевищує 0,20 і лише в окремих випадках досягає 0,25, нижньої межі допустимих значень не існує.

Якщо показник електроопору для електродів коливається в межах від 10…6 Ом·мм/м, то для щіток, наприклад, марки ЕГ-74, цей показник встановлений в межах 35…75 Ом·мм/м, причому вихід за ці межі недопустимий. Для інших видів виробів, наприклад, блоків для будівництва атомних реакторів, перш за все потрібна дуже висока хімічна чистота і хороша теплопровідність.

Таким чином, вимоги до готових графітованих матеріалів різноманітні, а можливості процесу графітування обмежені, і полягають в дії високої температури на вироби, що графітують. Тому основні напрями в організації властивостей виробів, що графітують, закладаються на різних ступенях технології: при виборі сировини і методів його переробки.

Характер теплової дії на оброблювані матеріали полягає в досягненні максимальних температур (до 3000 ºС) і швидкостей нагрівання. Ось, по суті, весь арсенал технолога-графітувальника. Представляється, що це вельми нескладна технологічна процедура. Але, враховуючи необхідність дуже високих температур і властивості оброблюваних матеріалів, а також специфіку конструкції печей графітування, технологічна операція графітування є дуже важкою.

1.2 Печі графітації

1.2.1 Загальні відомості

Графітацією називають технологічну операцію впливу високих температур (2500 - 3000 ° С) на кокси, вугілля або вироби з них. Графітації піддають головним чином напівфабрикати (заготівлі), що пройшли такі технологічні операції, як пресування та випал. Високотемпературної обробки (графітації) можуть піддаватися кускові (наприклад, виробництво термографіту) та порошкоподібні матеріали. Через війну такої високотемпературної обробки різко змінюються властивості вихідних матеріалів: підвищуються їх щільність, хімічна стійкість, електропровідність і теплопровідність, і навіть стають жирними і залишають слід папері, тобто. матеріали набувають властивостей, характерних для природних графітів. Звідси виник термін графітація - отримання виробів з характерними ознаками природних графітів.

Процес графітації належить до енергоємних електротермічних виробництв: витрата електроенергії в залежності від виду та розмірів виробів становить 3000 - 10000 кВт · год/т.

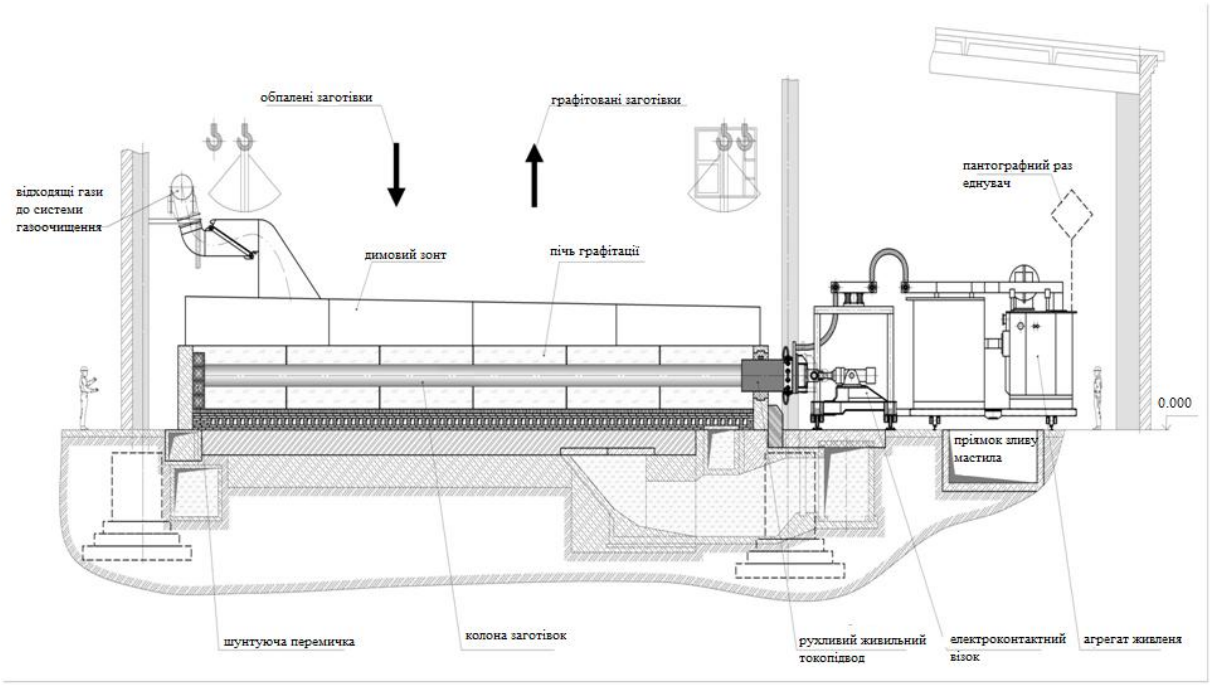
Вперше графітацію вугілля (електродів) запропонував Кастнер (США, 1893 р.), проте не розробив техніку графітації, а обмежився пропозицією нагрівати вугільні стрижні, затискаючи їх між струмоподводящими електродами, якими проходить електричний струм. Вперше промислові печі для графітації були сконструйовані Жираром та Стрітом (Франція, 1893 – 1895 рр.). Це були дугові печі безперервної дії для графітації вугільних стрижнів невеликого діаметра. У замкнутому просторі між двома електродами запалювалася електрична дуга, через яку простягалися вироби, що графітуються. Непрактичність печей цього очевидна, тому де вони отримали промислового розвитку. Ачесон (США, 1896 р.) знайшов більш ефективний спосіб графітації, застосовуючи нагрівання струмом, що протікає через оброблюваний матеріал. Їм же запропоновано конструкцію

печі, що дозволяє одночасно графітувати великі маси матеріалів різноманітних форм та розмірів. Спосіб, розроблений Ачесоном, набув широкого поширення у всіх країнах світу. З часу Ачесона техніка його методу майже прогресувала. Збільшилися тільки розміри печей, зросли потужності трансформаторів, що живлять.

Печі графітації були запозичені у виробництва карбідів ще наприкінці XIX століття і дотепер зберегли всі конструктивні елементи. Ці печі належать до групи електричних однофазних печей опору прямого нагріву. Опором служать графітовані матеріали, якими протікає електричний струм, нагріваючи їх. Цінність цих печей полягає в тому, що в малих обсягах печі можна сконцентрувати величезні кількості енергії, що дозволяє створювати високі температури - до 3000 ºС.

Під терміном "електрична піч" слід розуміти весь комплекс пічного обладнання, включаючи власне піч, трансформатор і електричну, так звану коротку, мережу, що зв'язує. Короткою електричною мережею або вторинним струмопідведенням називається система провідників, що передають струм робочої напруги від джерел живлення (наприклад, трансформатор, генератор та ін.) до робочої зони електричної печі графітації, де електрична енергія перетворюється на теплову.

На рис. 1.3 показана графітувальна піч. Основними елементами конструкції печі служать дві торцеві стінки, розташовані один проти одного і з'єднані між собою основою 2, яка є подіну печі. У торцевих стінках закладені струмопідвідні електроди 3, службовці для введення електроенергії в її робочий об'єм - простір між струмопідвідними електродами 4. Цей робочий об'єм завантажують виробами або матеріалами, що підлягають графітації та завантажений робочий об'єм печі вже називається керном.



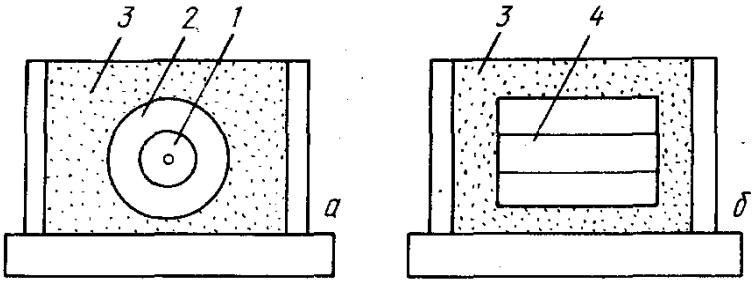
1 -торцева стінка; 2 - основа печі; 3 - струмопідвідні електроди; 4 - робочий об'єм (керн)

Рисунок 1.3 – Схема печі графітації

Деякі ділянки короткої мережі можуть одночасно служити елементами конструкції печі (наприклад, струмопідвідні електроди).

На рис. 1.4 наведені поперечні розріз карборундової (а) та графітувальної (б) печей. У карборундовій печі в центрі робочого об'єму розташовані керни 1, навколо нього - шихта 2, з якої утворюється карбід кремнію (SiC). Керн у цьому випадку є нагрівачем (через нього тече електричний струм) і елементом, який створює теплове поле для виникнення та завершення процесу утворення карбіду кремнію з шихти 2. У графітувальній печі завантажені вироби також називають керном 4, але функції його зовсім інші, ніж у карборундовій. У тому ж обсязі, де виділяється тепло за рахунок струму, що протікає, протікає і основний

процес - графітація.



а - карборундовий; б - графітувальний; 1 - керн; 2 - шихта; 3 - теплова ізоляція; 4 - робочий об'єм (керн)

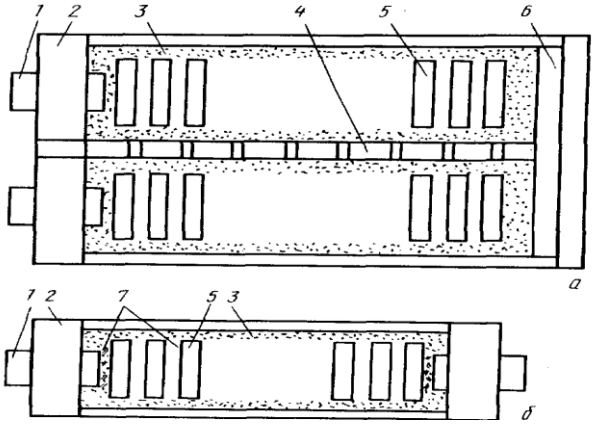
Рисунок 1.2 – Схематичні поперечні розрізи електричних однофазних печей опору

Тому термін "керн" для печі графітації не несе того значеннєвого навантаження, що для карборундової, а перенесений з практики експлуатації карборундової печі.

Печі графітації відносяться до класу печей періодичної дії. Графітація виробів провадиться окремими партіями; після завершення процесу графітації (кампанії) піч охолоджують, потім розвантажують, а після огляду та ремонту - знову завантажують та підключають до електричної мережі.

Піч Ачесона має великі недоліки, зумовлені переважно періодичністю її дії. Це – низький к.п.д. і мала продуктивність через тривалий процес графітації простоїв при охолодженні, розвантаженні та завантаженні. Через малу продуктивність однієї печі потрібна установка великої кількості печей, спорудження для них великої площі будівлі, довгі магістралі струмопідвідних шин. Крім того, необхідні величезні кількості допоміжних матеріалів – теплоізоляційної шихти та пересипання. Наприклад, для завантаження однієї печі потужністю близько 8000 кВ цих матеріалів потрібно на проведення однієї кампанії близько 50 т, що пов'язано з незручностями при експлуатації. До того ж виробничі операції доводиться виконувати вручну і в безпосередній близькості до великих мас сильно нагрітих матеріалів.

В даний час у промисловості використовуються дві характерні конструкції печей графітації: нормальні (прямі) або, як їх іноді називають, печі Ачесона та П-подібні печі. На рис.1.5 представлені схеми цих печей.



а - П-подібна піч; б - нормальна піч (Ачесона); 1 - струмопідвідний електрод; 2 -торцева стіна; 3 - теплоізоляційна шихта; 4 - роз'єднувальна стінка; 5 - електроди; 6 - сполучний провідник; 7 - пересипання

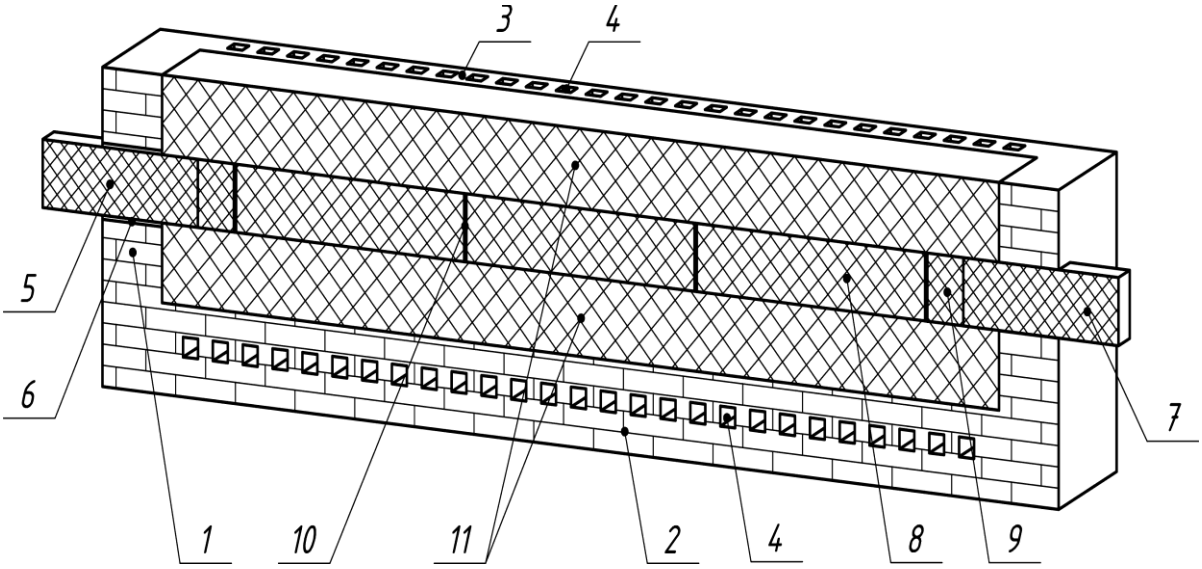
Рисунок 1.5 – Схеми основних типів печей графітації

Нормальні печі набули найбільшого поширення; вони працюють як на змінному, так і на Постійному струмі, а П-подібні печі застосовуються лише на потужних установках, що працюють на постійному струмі.

1.2.2 Піч нормальна пряма

На рис. 1.6 показана конструкція нормальної прямої графітувальної печі. Пекти має міцну основу у формі прямокутного корита 1 і дві торцеві стінки 2. У торцевих стінках створені отвори для укладання струмопідвідних електродних пакетів 3, до яких підводиться від потужних джерел електричний струм. В основу печі (корито) набивають спеціальну подину, що складається із суміші порошкоподібних вуглецевих матеріалів та піску. На підготовлену подіну завантажують вироби (наприклад, електроди) 4, що піддаються графітації. Бічні стінки 5 служать, щоб утримати завантаження печі. Ці стінки – розбірні, їх кожну кампанію збирають та розбирають. Будують також печі, у яких ці стінки нерозбірні

або розбирається одна стінка для зручності обслуговування печі при розвантаженні та завантаженні. Розміри печей для графітації залежать від величини завантаження, а також від геометричних розмірів виробів, що графітуються. Наприклад, при графітації електродів ширину печі визначає довжина електрода, що підлягає графітації, оскільки він укладається перпендикулярно до осі печі. Нині виробляються електроди довжиною 1700 мм, інколи ж до 2000 мм. Отже, ширина печі дорівнює сумі. довжини електрода, товщини шару теплової ізоляції, розміри якої становлять 500 - 700 мм (на сторону), і товщини шарів, що шунтують, і бічних стінок. При графітації конструкційних графітів та щіток для електричних машин - малотоннажної продукції, невеликих розмірів допускаються форсовані режими графітації. Зазвичай для графітації цих матеріалів застосовуються печі малих потужностей, переріз керна у яких становить від 0,3 до 1,0 м^2.



1,3 - торцева і бічна стіни; 2 - подина; 4 - повітряні канали; 5 - рухливий струмопідвод; 6 - гніздо рухливого струмопідвода; 7 - нерухомий струмопідвод; 8 - заготовки; 9 - вирівнююча вставка; 10 - демпферна прокладка; 11 - теплоізоляція.

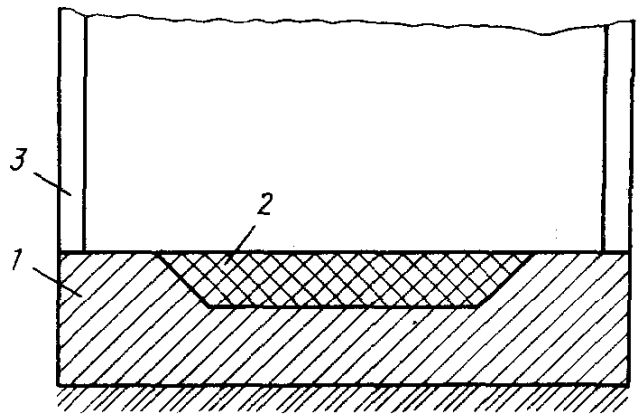
Рисунок 1.6 – Графітувальна піч нормальна пряма

Важче визначити оптимальну довжину печі. В даний час застосовуються печі довжиною від 4 до 20 м, що живляться змінним

струмом, і до 40 м - постійним струмом. Довші печі при тій же потужності трансформатора економічніше, оскільки подовження керна призводить до підвищення теплового та електричного к.п.д. і, як наслідок, до збільшення продуктивності та зниження питомої витрати електроенергії. Зі збільшенням довжини керна збільшується активний опір, що призводить до тих самих результатів. Однак із збільшенням довжини печі зростає індуктивний опір (для печей, що працюють на змінному струмі), що знижує ефект, отриманий від збільшення опору омічного. Чим довша піч, тим більше зростає індуктивний опір, і на дуже довгих печах вплив індуктивного опору стає настільки значним, що різко знижуються всі техніко-економічні показники, і експлуатація таких печей стає невигідною. У промисловій практиці печі графітації довші 20 м (по керну) не будують. Нижче наведено дані щодо довжини керна та потужності печей графітації.

Потужність живильного агрегату,	1250	2100	2950	3900	3000	4000	5000	5000	8000	8000
Довжина печі по керну, м	6,5	8,0	12,35	17,0	10,0	10,0	10,0	12,0	16,0	20,0
Питома потужність кВ/м	195	260	220	230	300	400	500	415	500	400

Поділна. На рис. 1.7 наведено розріз печі по подини. Шамотова основа має коритоподібну форму, яка набивається сумішшю з піску та вуглецевого матеріалу. Висота набивання близько 300 мм. Цільове призначення набійки полягає у запобіганні шамотної основи від впливу високих температур. Для будівництва печей застосовується шамотовий вогнетрив, але у промисловій практиці зустрічаються печі, побудовані з жароміцного бетону.



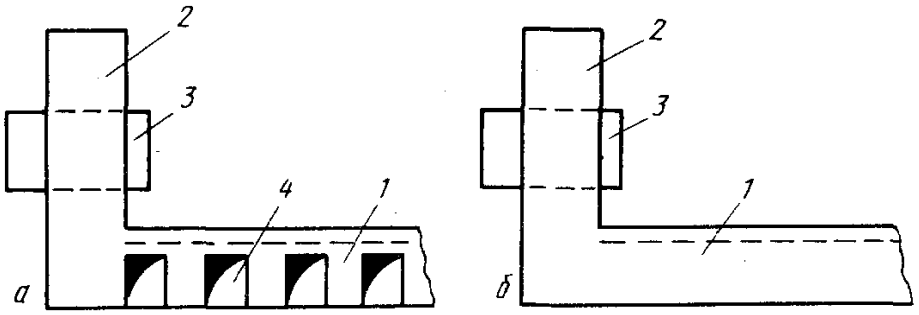
1 - подина; 2 - набивання подини; 3 - бічна стіна печі

Рисунок 1.7 – Подина нормальної прямої печі (розріз)

Основні вимоги, що пред'являються до маси, якою набивають, полягають у тому, щоб вона мала високі тепло- та електроізоляційні властивості і не плавилася при високих температурах. Пісок, що входить до складу маси, плавиться близько 1700 ^{0}C, отже, він не задовольняє одну з вимог. Але весь сенс комбінації піску з вуглецем полягає в тому, що при нагріванні цієї суміші до 1500-1600 ^{0}C утворюється карбід кремнію, який не плавиться і не розкладається до 2300 ^{0}C. Разом з карбідом кремнію, що утворюється, може вийти силоксикон (сполука кремнію, вуглецю, кисню) - жаростійка речовина світло-салатового кольору, яка також успішно служить в умовах експлуатації подини.

За дуже високих температур (вище 2200 °C) можливе заграфічення подини - розкладання карбіду кремнію з утворенням вуглецю. В цьому випадку набійка різко втрачає свої ізоляційні властивості: сильно зростає її електропровідність, що супроводжується витіканням струму в подіну, а головне - руйнується. Тому при експлуатації печі повинні бути створені такі умови, щоб температура набивання не перевищувала 2000 ^{0}C. Хід процесу графітації багато в чому залежить від стану подини, тому перед кожною кампанією печі проводять сувору перевірку подини та усувають виявлені дефекти.

Подини будують двох видів: охолоджувані та неохолоджувані (рис.6). Неохолоджувані подини викладають суцільним масивом на фундаментній основі. В даний час їх майже не будують, лише іноді – на печах малої потужності та продуктивності. Печі з охолоджуваними подинами будують двох видів: з природним та примусовим охолодженням. У печах з природним охолодженням подини охолодження здійснюється повітрям, що протікає через спеціальні канали споруджені під подиною (рис. 1.8, а). Канали розташовуються поперек печі. Для того, щоб посилити теплообмін, необхідно збільшити швидкість руху повітря, що протікає через канали, що досягається за рахунок створення нахилу каналу від краю печі до іншого.



а - охолоджувана; б - неохолоджувана; 1 - подина; 2 – торцева стінка печі; 3 - струмопідвідний електрод; 4 - канал для охолодження

Рисунок 1.8 – Подини печей графітації

Площа охолодження, що охоплюється каналами, становить близько 40% від площі поданої графітувальної печі. Печі з примусовим охолодженням подін, що працюють на змінному струмі, зустрічаються рідко, тому що простіше і дешевше в експлуатації печі з природним охолодженням подини.

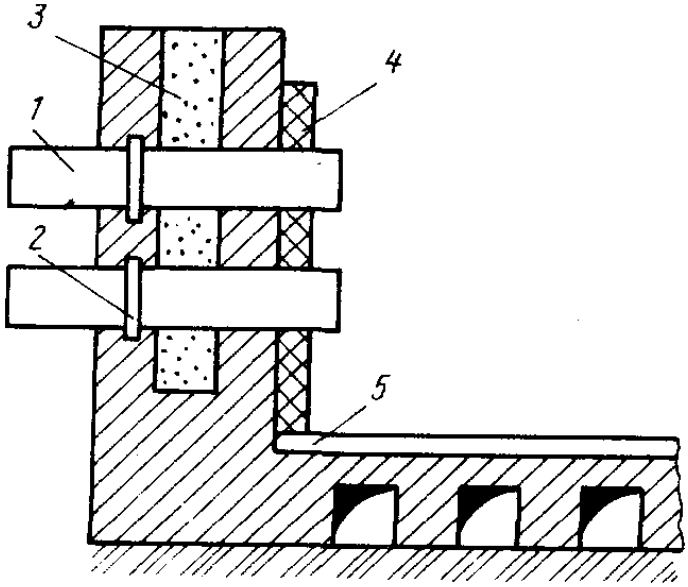
Торцеві стіни. Торцеві стінки – дуже важливі елементи графітувальної печі та найбільш уразливі її частини. Стінки повинні бути легкими, міцними та надійними в експлуатації. У торцеві стінки закладені струмопідвідні електродні пакети, а самі стіни споруджені з шамотного вогнетриву або з жароміцного бетону. Товщина стінки 800 - 1000 мм в залежності від зусиль

розпирання, що створюються в печі, числа та розмірів струмопідвідних електродів.

Найбільш відповідальною ділянкою є контакт електрода зі стінкою. При недостатній герметизації цієї ділянки поверхні електродів згоряють, а в щілини, що утворилися безперервним потоком надходить повітря, інтенсифікуючи процес згоряння електродів. Ремонт торцевої стінки, що полягає в заміні струмопідвідних електродів, дуже дорогий і вимагає тривалої зупинки печі. Тому потрібна герметичність електродного пакета.

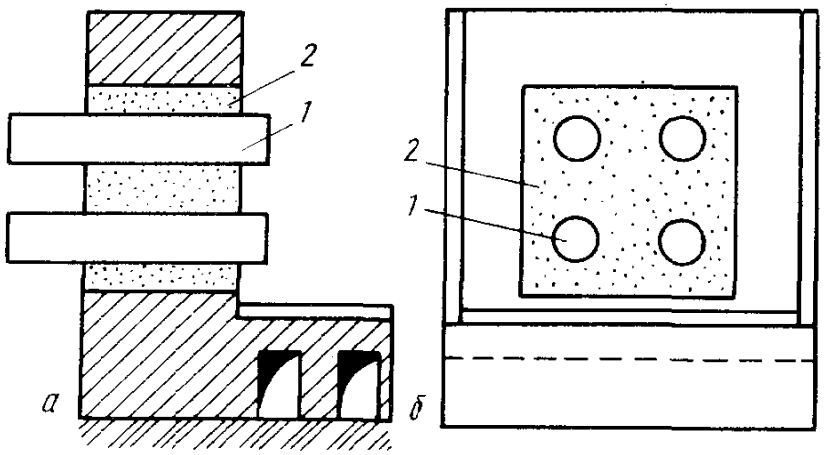
На рис. 1.9 наведено два способи герметизації: або за допомогою спеціальних герметизуючих "сальників" 2 або шляхом засипки вільного простору в середині кладки порошкоподібним графітом. Шар графіту перешкоджає протіканню повітря, а якщо навіть припустити, що гаряче повітря все ж таки проникне, то окислиться насамперед порошкоподібний графіт.

Довготривала служба торцевих стін забезпечується блоковою загортанням струмопідвідних електродів. Конструкція такого закладення показана на рис. 1.10.



1 - електрод; 2 - сальникове ущільнення; 3 - графітовий порошок; 4 - вугільна плита; 5 - набійка поділи

Рисунок 1.9 – Закладення струмопідвідних електродів у торцевій стінці



а – поздовжній розріз; б – поперечний розріз; 1 – електроди; 2 - електродна маса

Рисунок 1.10 – Блокове закладення електродів у торцевій стінці

Готовий (обпалений) блок встановлюється у спеціальному отворі торцевої стінки. Для захисту внутрішньої поверхні торцевої стіни від впливу високих температур вона захищена вугільними плитами товщиною 80 - 100 мм (див. рис. 1.9. Цей шар струмопровідний, що необхідно враховувати під час розрахунків та експлуатації печей.

Бічні стіни. Бічні стінки виконують менш відповідальні функції, ніж торцеві. Головне їх завдання полягає у збереженні обсягу завантажених виробів та допоміжних матеріалів. У промисловій практиці можна зустріти печі, у яких бічні стінки мають примусове охолодження повітрям. Це практикується в тому випадку, коли ширина печі невелика і шар теплоізоляційної шихти дуже малий. Такі конструкції печей нераціональні, вони дорогі у спорудженні та експлуатації.

При будівництві торцевих і бічних стінок слід уникати застосування залізобетону та сталевих конструкцій, тому що сталеві конструкції збільшують індуктивність контуру печі та витрату електроенергії.

1.2.3 Токопідводні електроди

Електрична енергія підводиться до робочого обсягу графітувальної печі (керн) за допомогою електродів. Струмопідвідні електроди, закріплені в торцеву стінку, називають електродним пакетом. Сила струму в сучасних графітованих печах досягає кількох десятків тисяч ампер, електродний пакет повинен бути складений з такої кількості електродів, щоб загальний їх переріз задовольняв вимогам, що висуваються до електричних провідників за допустимою щільністю струму.

Як струмопідвідні електроди використовуються графітовані електроди. Вони мають високу електропровідність і допускають високі щільності струму (до 12 А/см^2) в умовах графітувальної печі. Тому переріз таких електродів може бути прийнято невеликим. Це дуже важливо, тому що чим менше переріз електродів, тим легшою може бути конструкція торцевої стінки. Графітовані електроди легко обробляються і з великою точністю, що забезпечує високу якість контакту з металевими провідниками, а отже знижують втрати в контактних з'єднаннях і збільшуються терміни служби.

При визначенні оптимального перерізу електродів слід пам'ятати, що із зменшенням перерізу електродів зростають електричні втрати.

Завантаження печі. Завантаження печі складається з низки послідовних операцій: підготовки подини, укладання виробів, завантаження пересипання та теплоізоляційної шихти (рис. 1.11).

Щоб уникнути теплових втрат та витоку струму через подину, перед кожною кампанією її контролюють та відновлюють. Якщо виявлено, що заграфічність подини проникла глибоко та ізоляційні властивості її майже втрачені, її видаляють та набивають нову подину.

У середині печі, між струмопідвідними електродами, укладають вироби, призначені для графітування. Їх укладають перпендикулярно осі печі одне на інше на пересипання, насипане рівним шаром на подину. Перший ряд укладають на відстані 250-300 мм від кінців струмопідвідних

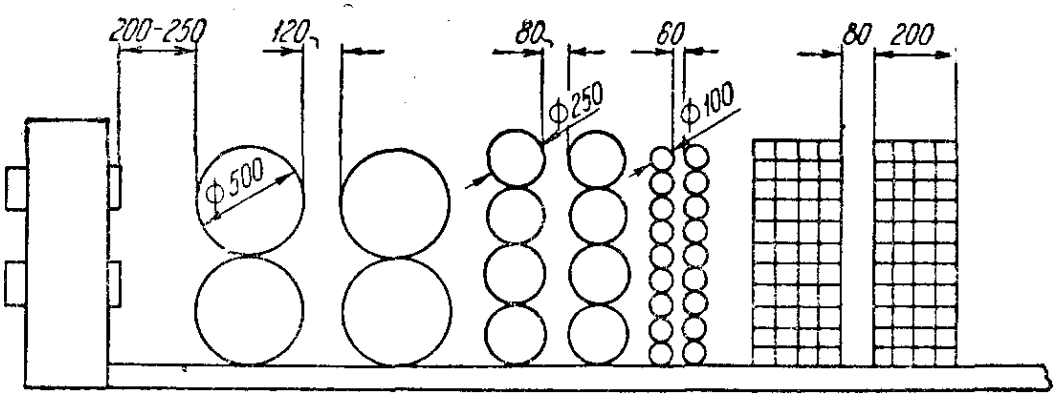
електродів. Відстань між кожним рядом покладених виробів повинна становити 20% від діаметра виробу, що графітується. Проміжки між рядами заповнюють пересипанням. Невеликим шаром пересипання одягають весь укладений керн.

Для зручності та більшої точності укладання виробів користуються дерев'яними шаблонами, які встановлюються між вертикальними рядами. З боків керна, що укладається, встановлюють металеві щити. Після того як вироби укладені, простір між рядами та металевими щитами заповнюють пересипанням. Простір між металевими щитами та бічними стінками печі заповнюють теплоізоляційною шихтою. Після цього видаляють шаблони та щити, а зверху завантаженого керна виробів насипають шар теплоізоляційної шихти. Одночасно збирають бічні стіни.

У печах регульованого опору можливе графітування пластин невеликого розміру, наприклад щіткових блоків. Вироби укладають між струмопідвідними електродами щільно один до одного широкою площиною. Пересипання не застосовується. Як теплова ізоляція застосовують сажу, якою вкривають керн з усіх боків.

Допоміжні матеріали. До допоміжних матеріалів відносяться: пересипання, теплоізоляційні матеріали та шихта для набивання подини.

Як пересипання застосовують кокси. При графітуванні електродів використовують ливарний кокс.



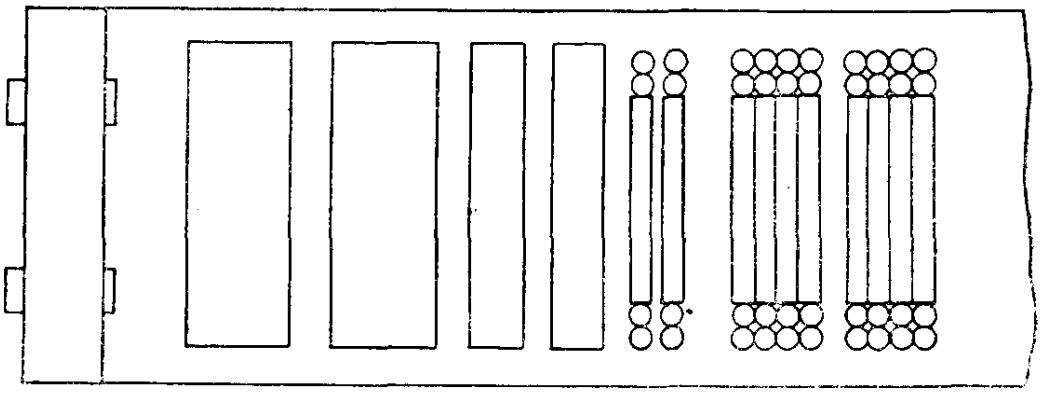


Рисунок 1.11 – Схема укладання електродів у піч

Гранулометричний склад пересилочного матеріалу різний. При графітуванні великих електродів максимальна величина шматків сягає 30 мм. При графітуванні дрібних виробів максимальне зерно знижується до 6-10 мм. Бажано, щоб усі зерна за своїми розмірами були близькі. Для електричного режиму печі дуже важливо мати сталість гранулометричного складу пересипання.

В якості теплоізоляційної шихти найчастіше застосовують суміш коксової дрібниці, піску і тирси. Співвідношення цих матеріалів за обсягом дорівнює 2:2:1. Суміш має добре перемішуватися. Теплопровідність такої шихти дорівнює 0,15 кал/см^2 і близька до теплопровідності азбесту. Насипна вага шихти 800-900 кг/м^3.

Як теплова ізоляція застосовують тонкоподрібнений кокс, який по теплопровідності близький до теплоізоляційної суміші. Чим дрібніший кокс, тим менша його теплопровідність. Іноді цих цілей застосовують сажу. Але це дуже дорогий матеріал. Застосування сажі та дрібного коксу погіршує умови роботи із завантаження та розвантаження печей.

Шихту для подини готують із суміші піску та коксової дрібниці. Не можна допускати надлишку коксу, тому що провідність подини може зрости, але не можна допускати і надлишку піску, бо це призведе до швидкого виходу з ладу в результаті плавлення надлишкового піску. Шихту складають за стехіометричною формулою: $SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO$.

Режим графітації. Гранична температура, коли він має закінчуватися процес графітації, практично коливається не більше 2300 – 3000 °С. Менш зрозумілою є проблема швидкості підйому температури. Швидкість нагрівання обмежується, з одного боку, прагненням отримати більш щільні вироби, а з іншого - не допустити утворення тріщин. Ці вимоги перебувають у суперечності з теплотехнікою процесу та встановленим електротехнічним обладнанням. З цього погляду найефективнішим є швидкий процес нагрівання. Будь-яке уповільнення знижує граничну температуру та збільшує витрату електроенергії.

Критичний інтервал температур, в якому протікають найважливіші процеси, що супроводжуються усадкою, 1300 - 2100 °. Деякі фахівці рекомендують цей інтервал проходити повільно, зі швидкістю близько 30 ° / год. Якщо цей інтервал температур пройдено з більшою швидкістю, то усадка у виробах різко знижується, а отже, знижується щільність та механічні властивості. Нижче і вище вказаних меж температури швидкості можуть бути значно збільшені.

Основна причина утворення тріщин при графітації полягає в нерівномірному нагріванні виробу за довжиною та перерізом. В результаті створюються величезні напруги, що розривають виріб.

Розглянемо це явище з прикладу графітування електродів. Нагрівання електродів у печі починається з поверхні та поступово поширюється до центру. Це пояснюється наступним: керн печі складається з послідовно з'єднаних опорів пересипання з високим опором та електродів з відносно низьким опором.

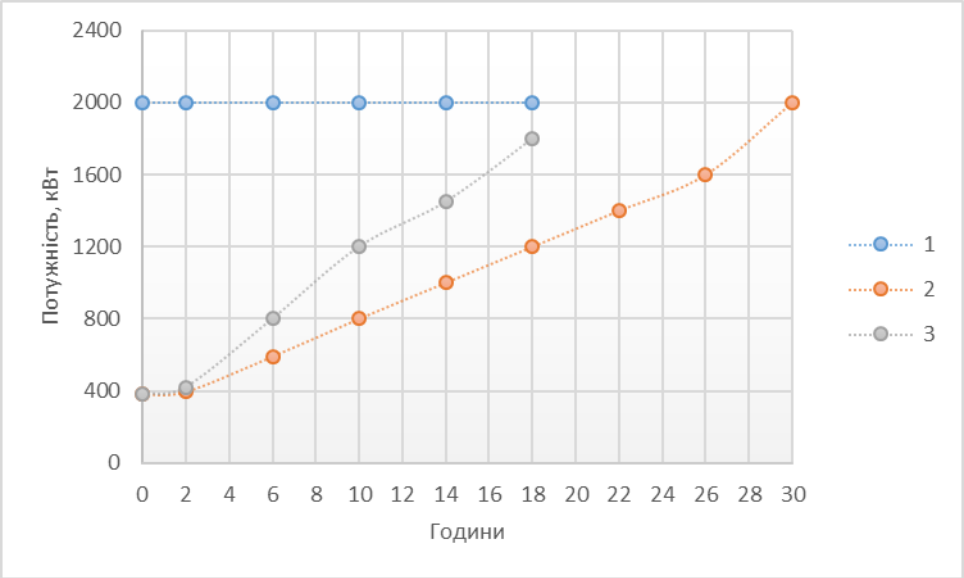
При однаковому струмі, що протікає через піч, кількість тепла, що виділяється в завантаженні пропорційно опору. Оскільки опір пересипання становить у середньому 98%, отже, і кількість тепла, що виділилося у пересипанні, відповідає цій же величині. Внаслідок досить низької теплопровідності коксових електродів при швидкому підйомі температури

в печі відбуватимуться значні перепади температур на периферії та в центрі електрода, що може спричинити його руйнування.

У графітувальній печі виключена можливість ведення режиму графітування вимірювання температури в оброблюваному виробі. У практиці процес графітування визначається графіком потужності, що підводиться до печі. Цей метод заснований на тому, що температура в керні знаходиться у прямій залежності від кількості енергії, введеної в піч. Кількість енергії, що споживається піччю, також не дає ясного уявлення про швидкість підйому температури печі. Однак чим коротший час, за який введено задану кількість енергії, тим різкіше підйом температури і тим більш високі температури можуть бути досягнуті в печі. При уповільненому режимі введення енергії у піч спостерігаються зворотні явища.

Незважаючи на зазначені недоліки ведення режиму електровимірювальних приладів, у промисловій практиці цей метод особливо широко застосовується, бо всі інші методи страждають ще більшими недоліками. Графік потужності встановлюють експериментально, в основі лежить отримання виробів високої якості, великий вихід придатного і відносно невеликі витрати електроенергії.

На рис.1.12 наведено графіки потужності при графітуванні виробів різних розмірів. Показано лише ліву керовану частину графіків. Графік застосовують для графітування дрібних виробів. У цьому випадку піч підключають на максимальну напругу та з трансформатора знімають максимум потужності. Процес протікає досить швидко. Це дуже економічний графік, при якому різко знижуються теплові втрати та забезпечується низька витрата електроенергії.

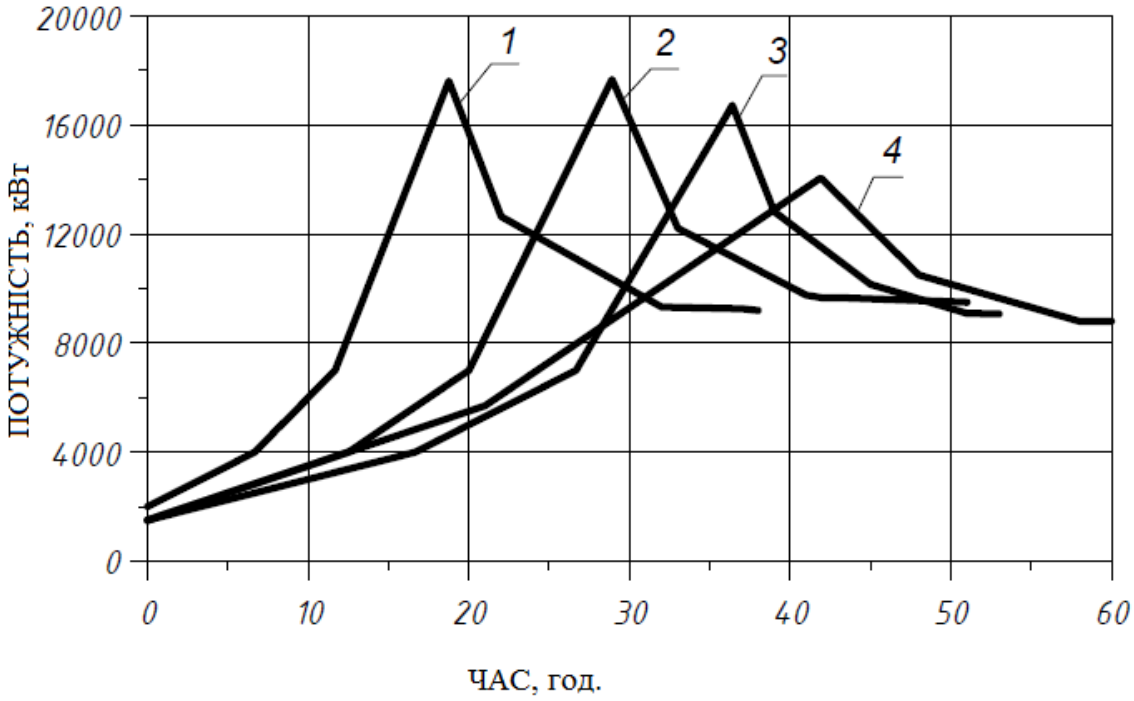


1 - для дрібних виробів; 2 - для великих виробів; 3 - для середніх виробів

Рисунок 1.12 - Криві потужності при графітуванні різних виробів

Графік 3 застосовується великих виробів. Він характеризується великою розтягнутістю та невеликою початковою потужністю. Такий режим графітування пов'язаний з великою витратою електроенергії та зниженням продуктивності. Графік 2 займає проміжне місце та служить для графітування виробів середнього розміру.

Досліджуючи режими графітування, що застосовуються в промисловості, можна виявити у всіх випадках їхню подібність, яка полягає в характері електротехнічних характеристик процесів. Крива потужності поступово зростає до певного максимуму. Ця точка називається критичною і у всіх випадках після неї потужність зменшується на рис. 1.13. Одночасно знижується активний опір печі та коефіцієнт потужності.



1 - Ø300 мм; 2 - Ø350 мм; 3 - Ø400 мм; 4 - Ø600 мм

Рисунок 1.13 – Графіки типових регламентів введення потужності

Інтенсифіковані режими введення потужності при графітуванні заготівок малих і середніх діаметрів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Інтенсифіковані режими графітування заготівок

Ø заготівок, мм	ПВЕ, кВт·г/т	Потужність включення, кВт		Підйом потужності, кВт/ч					
				до 4000 кВт		до 6000 кВт		до максимуму	
		на піч	на тонну	на піч	на тонну	на піч	на тонну	на піч	на тонну
200	3700	1500	30	500	10	без обмежень			
250	3900	1200	24	350	7	450	9	700	14
300	4000	1200	24	300	6	400	8	700	14
350	4100	1200	24	250	5	400	8	600	12
400	4500	1000	20	150	3	250	5	400	8

Застосування описаних режимів введення потужності забезпечило скорочення тривалості кампаній, підвищення продуктивності печей і

збільшення виходу вищих сортів електродів в порівнянні з режимами без інтенсифікації. Такий спосіб найбільш простий в реалізації і не вимагає унікального приладового забезпечення, але він не дозволяє отримати точне уявлення про головний критерій процесу графітування - температурі, її розподілу і швидкості зміни.

Як видно, з приведеного вище аналізу, розробка раціонального регламенту введення електроенергії є достатньо складним завданням. З одного боку відомо, що енергетично ефективними є високоінтенсивні режими. З іншого боку застосування високо інтенсивних графіків підведення енергії в печі обмежено по причинах недостатньої потужності живлячого устаткування і можливої появи тріщин і руйнування вуглеграфітових заготівок із-за високого темпу нагріву і великого перепаду температур, що особливо актуально для заготівок великого діаметру і довжини.

Як видно забезпечення науково обґрунтованого нагріву вуглеграфітових виробів, при якому досягаються необхідні фізичні властивості графіту, зберігається цілісність виробів і забезпечується прийнятна енергоємність процесу, є досить складним завданням, залежним від безлічі чинників. Тому дуже важливим є завдання дослідження процесів що проходять при графітуванні, що особливо актуально при розробці технічних заходів пов'язаних з виробництвом нової продукції, поліпшенням якісних показників виробів, що графітують, і збільшенням енергетичної ефективності кампаній графітування.

Розподіл температур у керні. Одне з найважливіших завдань укладання керна полягає в тому, щоб досягти рівномірного розподілу температур перерізу і довжини керна. Досліди показують, що при невдалому укладання керна різниця температур в межах 300-400 ° в різних ділянках його зберігається на всьому протязі кампанії, незважаючи на її тривалість. Однак викласти керн настільки однорідно, щоб забезпечити рівномірну температуру по всьому об'єму практично неможливо. Тому в

практиці змушені зважати на ці обставини і організовувати режим графітування таким чином, щоб мінімальні температури знаходилися в межах, що забезпечують отримання графіту необхідної якості.

Отримання однакових температур по всьому перерізу і по всій довжині керна можливе тільки за умови виділення в кожній одиниці об'єму керна однієї і тієї ж кількості енергії. початкових температур, тисків у нижніх та верхніх шарах, електродинамічний ефект взаємодії струму печі зі струмом у зворотних шинах, явище скін-ефекту тощо.

Керн печі має явно виражену властивість наростаючого ефекту. Будь-яка нерівномірність укладання керна, незначна в холодному стані, неминуче розростається в значні нерівномірності розподілу струму при високих температурах (рис. 1.14).

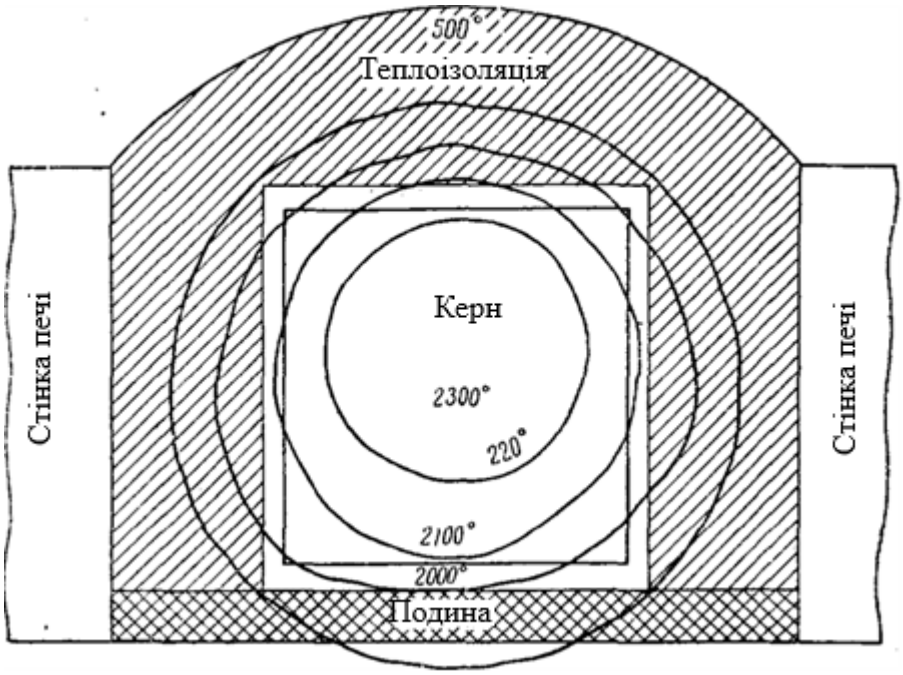


Рисунок 1.14 - Топограма розподілу температур у печі графітації

1.3 Прилади та методи для управління процесом графітації

Основним показником, що визначає хід процесу графітації, повинна служити температура. Від швидкості підйому температури залежить ефективність процесу - якість виробів, витрати електроенергії. Крім швидкості підйому температури, необхідна точна установка часу закінчення процесу. Різко відрізняється температура в об'ємі, займаному пересипанням, від температури виробів, причому різниця температур з плином часу безперервно змінюється. тепла, що виділяється в різних ділянках керна, неоднаково. Залишається єдиний шлях - отримати непрямі показники, якщо неможливі прямі вимірювання.

1.3.1 Методи керування режимом графітації

Чим більші розміри печі, тим складніший контроль за процесом графітації. Через відсутність досить повного розробленого об'єктивного контролю за процесом не повністю використовується обладнання та подовжується кампанія графітації, що призводить до перевитрати електроенергії.

Найбільш слабке місце контролю - визначення кінця кампанії. Відсутність промислового методу контролю температури керна або якого-небудь іншого об'єктивного методу визначення моменту завершення процесу змусило шукати непрямі методи визначення кінця кампанії. забезпечує для даної схеми завантаження, маси та розміру електродів необхідну якість електроенергії.

Практикується на додаток до цього методу вимірювання максимальної температури, за якої повинен завершуватися процес. Найбільш бажаним і точним методом контролю процесу графітації та часу його закінчення міг би послужити безпосередній вимір температури у керні печі. Вимірювання температури до 1500 "С не представляє труднощів і виробляється термопарами. Вищі температури, особливо вище 2000 0С,

зазвичай вимірюються оптичним пірометром через візирну вугільну трубку, вставлену в керн печі. Але в візирну трубку надходять газоподібні продукти, вимірювання температури Щоб підвищити точність вимірювань, цю хмаринку видаляють шляхом застосування додаткових пристроїв, що ускладнює операцію вимірювання.

Висновки

В результаті аналізу сучасного стану виробництва графітованої продукції, проведеного на основі вивчених літературних джерел і практичного досвіду дослідницької роботи видно, що:

- при виробництві графітової продукції одним з найбільш важливих і енергоємних технологічних процесів є переділ графітування;

- у промисловості графітування вуглеграфітової продукції проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого (печі Кастнера), або непрямого (печі Ачесона) нагріву, що забезпечують рівень температур у виробах 2400-3000 °С;

Для багатьох підприємств електродної промисловості надзвичайно актуальним є завдання вдосконалення теплових і енергетичних показників процесу графітування електродних виробів.

Проведена оцінка чинників що впливають на температурні і енергетичні режими процесу графітування показує, що:

- основним критерієм, що впливає на якість графітуємої продукції є температура, її максимальний рівень, швидкість зміни і розподіл по керну;

- на температурний режим роботи найбільш сильну дію надають енергетичний режим роботи печі, властивості теплоізоляційних матеріалів і геометрія керна;

- енергетичний режим роботи характеризується регламентом введення потужності і питомою витратою електроенергії, і великою мірою

залежить від геометрії керна і властивостей кернової пересипки - температурної залежності її електропровідності;

- управління процесом графітування в печах Кастнера виконується за заданим регламентом введення потужності і питомою витратою електроенергії, оскільки такий спосіб управління найбільш простий в реалізації. Проте раціональніше виконувати управління по температурі процесу, як основному показнику якості готової продукції;

- вплив різних чинників на температурний і енергетичний режим роботи достатній неоднозначно, тому достатньо гостро стоїть завдання дослідження розподілу температурних полів в печі графітування;

- зараз достатньо слабо розвинена методика комплексного дослідження енергетичного режиму роботи печі графітування.

2 МАТЕРІАЛЬНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ПЕЧЕЙ ГРАФІТАЦІЇ

Балансові вимірювання рекомендується проводити після будівництва нової установки або після великих конструктивних змін. На графітувальних установках виконують три види балансових вимірів; матеріальний, тепловий та електричний.

2.1 Матеріальний баланс

У табл. 2.1 наведений матеріальний баланс печі графітації привертає увагу застосування величезної кількості порошкоподібних матеріалів, які в промисловій практиці вважаються допоміжними. До них відносяться пересипочні матеріали та теплоізоляційна шихта. Маса цих матеріалів майже вдвічі перевищує корисне завантаження (електроди). Найбільша кількість матеріалів припадає на частку теплоізоляційної шихти (близько 40% всього завантаження печі), проте ця величина не є постійною для всіх типів та розмірів печей. Встановлено, що чим більше потужність печі, тим більше її розміри та об'єм, а значить вищий коефіцієнт заповнення об'єму печі теплоізоляційною шихтою. Нижче представлені обсяги графітувальних печей різної потужності, а також заповнення їх допоміжними матеріалами:

Потужність, кВ·А	37400	8000	4000
Об'єм печі, $м^3$	700	138	83
Об'єм керна, $м^3$	130	58	46
Заповнення допоміжними матеріалами, $м^3$	570	80	46
%	81	59	55

Збільшення споживання допоміжних матеріалів пов'язане із втратами тепла. Слід прагнути зниження кількості цих;

матеріалів, але не можна перевищувати розумної межі, щоб не погіршити теплотехнічні та електротехнічні показники печі.

У коксі, з якого виробляють пересипання та теплоізоляційну шихту, міститься вологи 7 - 9 %, а при незадовільному зберіганні вміст її сильно зростає. На видалення вологи в процесі графітації витрачається до 2 - 4% від усієї витраченої енергії. Тому слід уникати надто зволожених матеріалів та зберігати їх у захищених приміщеннях. У деяких випадках застосовують сушіння коксів.

Таблиця 2.1 - Матеріальний баланс печі графітації

Статті приходу	кг	%	Статті витрати	кг	%
Електроди	28196	35,8	Електроди графітовані	27894	35,4
Подина (ліжко)	11800	15,0			
Пересипка	8800	11,2	Пересипання та тепло ізоляційні матеріали	41919	53,2
Теплоізоляційна шихта	30000	38,0			
Усього	78796	100			
			Втрати:		
			випаровування вологи	4648	5,9
			леткі речовини	709	0,9
			вигоріло тирсу	946	1,2
			чад шихти	315	0,4
			випаровування золи	473	0,6
			чад електродів	236	0,3
			Нев'язка балансу	1656	2,1
			Усього	78796	100

У статтю "нев'язка балансу" входять дрібні невраховані статті та похибки зважування.

2.2 Тепловий баланс

У табл. 2.2 наведено тепловий баланс печі графітації. У балансі не враховано тепло, витрачене відновлення оксидів металів, які є у золі, і навіть утворення карбідів цих металів. Не враховано також прихід тепла за рахунок згоряння вуглецю на поверхні печі, екзотермічних реакцій, втрати тепла з газами, що йдуть, і теплот на випаровування зольних домішок.

Таблиця 2.1 - Тепловий баланс печі графітації

Статті балансу	Кількість енергії, мВт·год	Втрати енергії, %	
		до загальної	до витрати на керне
Надходження тепла Електроенергія на боці високої напруги,	140	100	
Витрата тепла			
Нагрів електродів	32,2	22,0	30,2
Нагрівання ліжка	7,6	5.41	7,15
Нагрів пересипки	9,95	7,1	9,42
Нагрів теплоізоляційної бічної шихти	8,20	5,85	7,70
Нагрів верхньої частини шихти	6,65	4,75	6,26
Нагрівання подини	2,40	1,71	2,25
Нагрів бічних стін	3,90	2,09	2,75
Нагрів торцевих стін	2,74	2,00	2,60
Випаровування вологи	3,46	2,47	3,24
Електричні втрати	3,36	24,0	-
Теплові втрати з поверхні печі (по різниці)	30,30	21,62	28,40
Усього	140	100,0	100,0

До неминучих втрат слід віднести такі: на нагрівання пересипки 7 – 9 %, на нагрівання ліжка 5 – 7 %, теплової ізоляції – 10 – 14 %, подини – 1,5-2 %. Ці втрати властиві способу графітації в печах Ачесона, і якщо можна досягти деякого їх зниження, то невеликою мірою. Найбільші втрати (до 22 - 28%) - в навколишній простір. Спостереження за роботою печей показали, що через 40 - 50 год після початку кампанії верх печі сильно розігрівається, і в цей час втрати досягають великих величин. Найбільші втрати в навколишній простір припадають на кінець кампанії.

Тепловий ККД печі графітації, підраховані з відношення кількості тепла, витраченого на нагрівання електродів, до загальної витрати тепла за кампанію, становить 24 - 25%. Якщо ж враховувати витрати тепла як на нагрівання електродів, а й керна, то ККД буде 30-33%.

2.3 Розрахунки графітувальних печей

2.3.1 Розрахунок перерізу та числа електродів

Розрахунок перерізу та числа електродів у струмопідвідному пакеті можна проводити наступним чином. Характеристика джерела струму (трансформатор) є відомою. Отже, відомий номінальний струм I, А. Приймаючи допустиму щільність струму *i*, А/см^2, визначаємо переріз електродів S=I/*i*.

Щільність струму I вибираємо, керуючись такими міркуваннями. Чим менша потужність трансформатора, тим нижче *i*. При малій потужності трансформатора можна прийняти найнижчі густини струму (3-4 А/см^2). Що потужність установки, то вище номінальний струм. Щоб не встановлювати в стінку електроди великих перерізів, приймають підвищені густини струму (6-8 А/см^2) і навіть 10 - 12 А/см^2. Зі збільшенням густини струму зростають електричні втрати. Громіздкі струмопідвідні пакети ускладнюють службові функції торцевої стінки.

Проведемо розрахунок та вибір числа електродів. Приймемо, що:

- номінальну силу струму прийнято 40 кА;

- густина струму в електродах 7 А/см^2;

- трансформатор має парне число виходів.

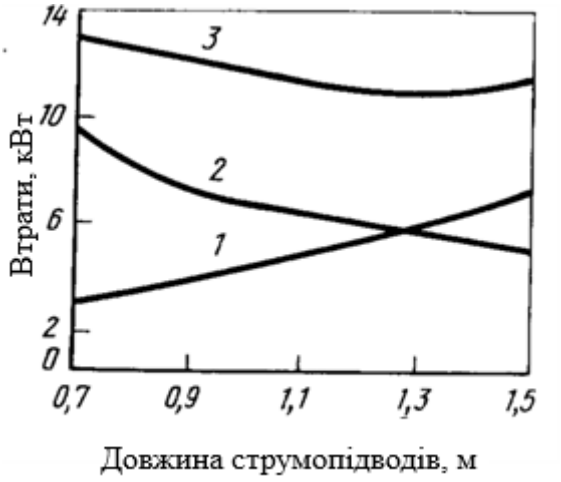
Загальна площа електродів, см 2:5 = 40:7 = 5700. Приймемо діаметр електродів, d = 30 см^2, площа перерізу яких ~ 900 см^2. Тоді число електродів у пакеті становитиме 5700/900 ~ 6 шт.

Перетин керна та переріз струмопідвідних електродів неоднакові, тому необхідно визначити розташування електродів у струмопідвідному електродному пакеті і периметр перерізу керна, зайнятий цим пакетом. Відповідно до технологічних вимог, по всьому перерізу керна має бути однакова температура, а це можливо тільки в тому випадку, якщо електричний струм протікає рівномірно по перерізу, тобто, у будь-якій ділянці перерізу виділяється однакова кількість тепла (за умови однакового омічного опору цих ділянок). Отже, розташовувати електроди в пакеті необхідно те щоб живлення електроенергією по всій торцевої поверхні керна було рівномірним, тобто. розташування електродів у пакеті має відповідати габаритам керна.

2.3.2 Визначення довжини електродів

Коли перетин електрода вибрано, слід визначити найвигіднішу його довжину. У промисловій практиці довжину електрода визначають, з конструктивних міркувань. Товщина торцевої стінки відома (близько 1 м); вільний кінець електрода всередині печі дорівнює 100 – 150 мм. На зовнішній частині електрода здійснюється контактне з'єднання електрода з шиною та пристроєм для охолодження, для чого потрібна ділянка довжиною 350 – 500 мм. Отже, довжина електрода визначиться додаванням зазначених ділянок, що становитиме 1450 - 1650 мм. При більш точних розрахунках для вирішення цього питання слід виходити з міркувань найменших теплових та електричних втрат у електродах. Працюючи електрода тепловий потік спрямований від керна до зовнішнього кінця електрода, а робочий

електричний струм - у напрямі. При певному перерізі електродів теплові втрати за рахунок теплопровідності перебувають у зворотній залежності від довжини електрода, а втрати з допомогою електроопору - у прямій залежності, тобто. у першому випадку вигідніше довгі електроди, а у другому – короткі (рис. 2.1).



1 – електричні; 2 – теплові; 3 – загальні

Рисунок 2.1 – Втрати в струмопідводних електродах залежно від їх довжини

При розрахунку довжини електродів для печі графітації можна скористатися розрахунками Герінга. За Герінгом, найвигідніша довжина електрода *L*, см, може бути визначена за такою формулою:

$$L = \frac{I}{\Delta i}\sqrt{2\frac{\lambda}{\rho}(T-t)}, \qquad (2.1)$$

де Δi – щільність тока в електродах, А/см^2; λ – питома теплопровідність електрода, Вт/(см^2·°С); ρ – питомий електроспротив електрода. Ом/см^3; (T – t) – різниця температур між кінцями електрода, °С.

Таким чином, щоб скористатися формулою Герінга, необхідно знати електро- та теплопровідність електродів, ці дані можна отримати з довідкової літератури.

Визначити оптимальну довжину електрода можна і не вдаючись до формули Герінга. Загальні втрати мінімальні за такої довжини електродів, при якій теплові та електричні втрати рівні.

2.3.3 Розрахунок розмірів печі

Основне завдання розрахунків полягає у визначенні конструктивних розмірів печі та потужності джерела струму. Розрахунки печі слід починати з визначення оптимальних розмірів керна, тому що від розмірів (перетину і довжини) залежать параметри всієї пічної установки. Правильне визначення цих розмірів має велике технологічне та економічне значення, тому що тісно пов'язане з вибором оптимальних характеристик джерела струму, в даному випадку – пічного трансформатора. Розміри керна визначаються параметрами джерела струму, що живить пічну установку.

При проектуванні печі графітації задаються її продуктивністю, і не тільки розраховують піч, а й визначають параметри силової установки. У промислових умовах, коли відомі параметри силової установки та характеристика оброблюваних виробів, може виникнути необхідність розрахунку оптимальних розмірів керна, а, отже, і конструктивних розмірів печі. У разі чинного заводу це завдання вирішувати значно складніше, ніж під час проектування, оскільки електроди, які у піч для графітації, непостійної довжини. Довжина електродів визначає ширину керна і не завжди вдається за рахунок зміни висоти керна зберегти сталість його перерізу.

Перетин керна визначити досить легко, якщо відома оптимальна щільність струму на керні. Але, на жаль, таких наукових даних немає, тому доводиться користуватися виробничими даними. Досвід експлуатації печей показує, що раціональна густина струму на керні повинна становити 1,6 – 2,0 А/см^2, але є пічні установки, щільність струму в керні яких становить 3 А/см^2. Однак такі великі щільності струму нераціональні, тому що при цьому можливе зниження коефіцієнта потужності печі.

Перетин керна можна визначити за формулою:

$$S = I/\Delta i, \quad (2.2)$$

де I – номінальна сила струму, А;

Δi – оптимальна щільність струму; А/см^2;

S – перетин керна, см^2.

Складніше визначити довжину керна; сучасна промислова практика не має в своєму розпорядженні розробленої та випробуваної методики розрахунку оптимальної довжини керна.

Керн печі є провідником, обсягом якого, як зазначалося вище, виділяється тепло відповідно до закону Джоуля - Ленца. Для виконання процесу графітації в обсязі керна має виділятися така кількість тепла, щоб забезпечити підвищення температури до 3000 ^{0}С. Отже, до керна має бути підведена певна потужність, що залежить від його розмірів. Звідси, щоб визначити потрібну потужність, необхідно мати показник, який виражав оптимальну питому потужність - на одиницю об'єму або поверхні керна. Таким показником раціонально вибрати оптимальну питому поверхневу густину потужності Δw. Виходячи з досвіду вітчизняної та світової практики графітації електродів, оптимальною є Δw = 5 – 6 Вт/см^2.

Для визначення довжини керна використовується формула:

$$L = W\,(w \cdot A), \quad (2.3)$$

де L – довжина керна, см;

W – потужність трансформатора, Вт;

w – питома поверхнева щільність потужності на керне, Вт/см2;

А – периметр керна, см^3.

Розрахунок довжини керна. Потужність трансформатора (W) відома; периметр керна визначають, виходячи із завантаження печі та асортименту; питома поверхнева густина потужності дорівнює 5-6 Вт/см^2. Приймаємо:

- потужність трансформатора 5000 кВ · А,

- перетин керна 170 Х 170 см (прийняті електроди довжиною 1700 мм),

- периметр керна 680 см.

Підставивши ці величини. формулу, отримаємо довжину керна:

$$L = \frac{5000000}{5 \cdot 680} = 1450 \text{ см} = 14{,}5 \text{ м}.$$

Для печей змінного струму не рекомендується довжина понад 20 м у зв'язку з тим, що сильно зростає індуктивність контуру пічної установки, що призводить до зниження коефіцієнта потужності. Отже, довжина печі повинна бути приведена у відповідність до цих вимог.

2.3.4 Розрахунок потужності трансформатора

У промисловій практиці можуть бути два підходи до розрахунку оптимальної потужності трансформатора для установки графітації:

1) коли необхідно запроектувати (розрахувати) потужність трансформатора для заданої продуктивності печі;

2) коли необхідно ефективно використовувати встановлену потужність трансформатора існуючої установки графітації.

Для визначення потужності трансформатора на задану продуктивність використовується формула:

$$W = \frac{Q \cdot q}{8760 \cdot \cos\varphi \cdot K_B K_M}. \quad (2.4)$$

де W – потужність трансформатора, кВт;

Q – річна продуктивність, т;

q – питома витрата електроенергії, кВт·год/т;

cos φ – коефіцієнт потужності;

Кв – коефіцієнт використання часу трансформатора;

Км - коефіцієнт використання потужності трансформатора;

8760 - число годин на рік.

Середньозважений cos φ за кампанію (один цикл) становить 0,70 - 0,75. Коефіцієнт часу (Кв) розраховується за формулою:

$$К_В = \frac{Т_Т}{Т_К} = \frac{(Т_К - Т_{п.п} - Т_Р)}{Т_К}, \quad (2.5.)$$

де Тт – час перебування трансформатора під напругою;

Тк – календарний час;

Тп.п – час, витрачений на перемикання печі,

Тр – час профілактичного ремонту трансформатора та короткої мережі.

З багаторічної практики відомо, що Кв для печей графітації становить 0,9 – 0,95.

Коефіцієнт використання потужності трансформатора (Км) визначають за формулою:

$$Км = Wн/Wср, \quad (2.6.)$$

де *W*н – номінальна потужність джерела струму, кВт;

*W*ср – середня потужність, підведена до печі, кВт.

Середню потужність *W*ср можна визначити двома методами - розрахунковим чи графічним.

За показаннями лічильника фіксується кількість електроенергії, витраченої на кампанію графітації (кВт·год). Відома також тривалість цієї кампанії (години). Якщо поділити перше на друге, це буде *W*ср.

Це завдання можна вирішити графічно. Для цього необхідно побудувати графік споживаної потужності в часі, а також для однієї кампанії. Потужність, що споживається (підводиться) графітувальною піччю, безперервно змінюється за кампанію графітації, що показано на рис. 2.2.

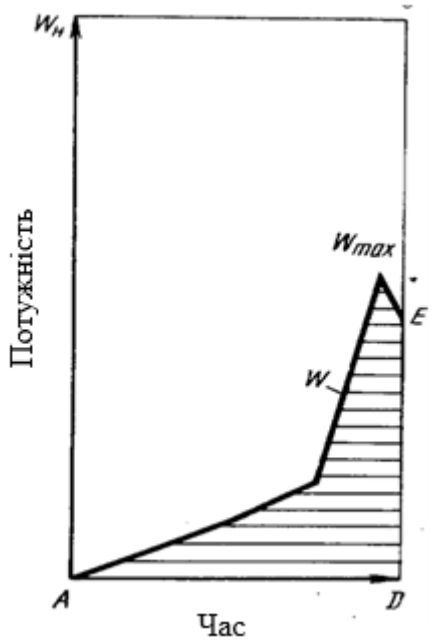


Рисунок 2.2 – Схема до визначення середньої потужності, що споживається піччю графітації

Площа, укладена між координатами і кривою потужності, $AW_{max}ED$, представляє спожиту енергію за кампанію, чи кількість енергії Wн, яку джерело струму перетворив і передав на графітацію (номінальна потужність джерела струму). Якби за кампанію графітації піч спожила всю цю потужність, то кількість енергії, передана печі, виразилася площею ABCD (максимальна ефективність використання встановленої потужності), але це практично неможливо. При розподілі площі ADE на площу ABCD отримаємо середню потужність, використану від номінальної потужності джерела струму ($W_{ср}$).

Коефіцієнт використання потужності Км - непостійний за величиною і від потужності установки: що стоїть потужність джерела, тим нижче Км. Для величезних потужностей він може знижуватися до 0,2, тоді як для мінімальних потужностей змінюється в межах 0,5 - 0,6. Нижчий Км призводить до зниження знімання продукції з одного встановленого кіловата потужності. Підрахунки показують, що оптимальною потужністю пристроїв живлення є приблизно 6 МВт. У цьому випадку забезпечується

високий знімання продукції з встановленого кіловату потужності при відносно невеликих капітальних витратах.

З досвіду експлуатації печей потужністю до 6 МВт коефіцієнт потужності складає 0,5 – 0,6. Для розрахунків слід прийняти питому витрату електроенергії для графітації дрібних виробів (d < 300 мм) близько 5 МВт·год/т.

Наведемо приклад розрахунку

1. Потрібно визначити потужність трансформатора для виробництва 3000 т/рік електродів великих розмірів:

$$W = \frac{Q \cdot q}{8760 \cdot \mathbf{COS}\,\varphi \cdot K_B K_M} = \frac{3000 \cdot 5500}{8760 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}6} = 5 \text{ МВт}$$

2. Потрібно визначити річну продуктивність установки потужністю 8 МВт; вироби великих розмірів:

$$Q = (W \cdot 8760 \cdot \frac{\cos\varphi \cdot K_B \cdot K_M)}{q} = (5000 \cdot 8760 \cdot \frac{0{,}75 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}6)}{5500} = 3000 \frac{\text{т}}{\text{рік}}.$$

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Створення найбільш сприятливих умов праці, запобігання виробничому травматизму та професійним захворюванням, виробничих аварій та усунення будь-якого шкідливого впливу виробничих процесів на персонал, навколишнє середовище та населення – це важливі фактори, від яких в кінцевому рахунку залежить виробництво.

Технологічні процеси, обладнання, режим роботи повинні забезпечити сприятливі умови праці та її безпеку та нешкідливість.

3.1 Техніка безпеки у цеху графітації обпалених заготовок

3.1.1 Основні шкідливості та небезпеки цеху графітації обпалених заготовок

Перелік шкідливостей та небезпек з їх характеристиками представлені відповідно у таблицях 3.1 - 3.3.

Таблиця 3.1 – Перелік та показники шкідливості цеху графітації обпалених заготовок

Найменування фактора шкідливості	Шляхи проникнення	Джерело шкідливості	Вплив на людину	ГДК, мг/м^3	Клас небезпеки
1	2	3	4	5	7
Вуглецевий пил	Інгаляційний, шкірний	Пил, механічне обладнання, що пиле.	Фіброгенна	0,5	4
Тепловиділення	Через повітряний шар	Піч, гарячий пек, комунікації гарячої пари	Опіки, головний біль, тепловий удар	348 Вт/м^2	4

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6
Граничні вуглеводні	Інгаляційний	Теж	Задушливе	15	4
Смоляні	Інгаляційний, шкірний	Теж, просочені заготівлі	Концерогенні	0,01	2
Загазованість: - CO	Інгаляційний	Пек при порушенні технологічного режиму та герметизації	Отруєння, ураження центральної нервової системи, дихання, зору	1	4
- SO_2	Інгаляційний	Теж	Дихання, слизова оболонка	0,5	3

Таблиця 3.2 – Перелік та характеристики небезпек цеху графітації опалених заготовок

Найменування небезпеки	Джерело небезпеки	Вплив на людину	Примітка
1	2	3	4
Електрична	Пробій ізоляції, відсутність захисного заземлення	Електроопік, електроудар	Порогові значення
Пожежонебезпека	Автоклави, печі при порушенні технологічного режиму	Опіки	
Вибухонебезпека	Автоклави, печі при порушенні технологічного режиму	Пошкодження	Межа вибуховості
Механічне ушкодження	Механічні місця на висоті, верстати, крани, автомашини	Травмування	

Таблиця 5.3 - Порогові значення електричного струму

Порогове значення	Вплив на людину	
	Змінний струм	Постійний струм
1	2	3
0,5 - 1,5	Легке тремтіння пальців рук	Не відчувається
2,0 – 3,0	Сильне тремтіння пальців рук, відчуття доходять до зап'ястя	Не відчувається
5,0 – 7,0	Легкі судоми, болючі відчуття в руках	Сверблячка, відчувається нагрівання

3.1.2 Заходи щодо усунення шкідливостей та небезпек

Інженерні заходи:

а) для зниження шкідливого впливу тепловиділень цех обладнаний аераційними ліхтарями з вітровідбійними щитами і фрамугами, що відкриваються. Вентиляція приміщення розрахована на зменшенню тепловиділень та здійснюється за допомогою аерації.

Шкідливий вплив тепловипромінювань слід знизити в жарку пору року за допомогою вентиляційних установок, в холодну пору – слід знижувати вплив протягів ізоляцією цеху від зовнішнього середовища воротами з тепловими завісами повітря.

б) для зниження запиленості та загазованості передбачені електрофільтри та димососи (на печі), вакуум відсмоктувачі, аспіраційні установки, пневмоприбиральні пристрої, аспіраційні парасольки над кришкою автоклава.

в) для запобігання механічним ушкодженням постійно відкриті канали, що височіють над нульовою відміткою обладнання огороджується. Сход із майданчика печі здійснюється по сходах із поручнями, на відкриті камери встановлюються перильні огорожі. Камери, на яких виконуються роботи, накриваються запобіжними металевими ґратами. Огороджуються рухомі частини верстатів.

Для запобігання травматизму у відділенні просочення всі операції максимально механізовані, застосовують спеціальні траверси, процеси відкриття – закривання кришок автоклавів автоматизовані.

г) для попередження пожеж у газоходах застосовується практика запланованого випалювання смоли, контроль температури в газоходах здійснюється самопишучими реєструючими приладами, при загрозі пожежі (підвищена температура) знижують температуру газів, що відходять зменшенням подачі газу.

При гарячій продукції між рядами її повинні бути прокладки з негорючих матеріалів. На практиці автоклави працюють під тиском, тому передбачені блокування безпеки та пристрої контролю для запобігання пожежам та вибухам.

д) вибухопожежна ситуація можлива при проскоку полум'я в пальнику печі або його відриві від пальника, тому при проскоку необхідно відключити пальник і охолодити його, при відриві полум'я - вимкнути всі пальники, провентилювати топку. На практиці запобігання вибухам здійснюється шляхом встановлення контрольно-вимірювальної апаратури на автоклаві.

е) електровпливи запобігаються шляхом застосування захисного заземлення.

Організаційні заходи:

а) рухомі частини верстатів, що не підлягають огородженню, повинні мати попереджувальне забарвлення;

б) огородження забарвлюються в червоний або оранжевий колір.

в) до роботи допускаються робітники старше 18 років з посвідченням на право роботи стропальником вантажів, посвідченням на звання «Правил безпеки в газовому господарстві», знанням правил техніки експлуатації та техніки безпеки під час роботи в електроустановках обсягом 1 групи;

г) ремонтні роботи в камерах печі та всередині автоклавів дозволяються проводити бригадою з оформленням наряду-допуску;

д) робітники забезпечуються спецодягом та засобами індивідуального захисту;

е) проводиться інструктажі робітників;

ж) раз на рік проводиться атестація на знання правил роботи стропальником, в газовому господарстві, в електроустановках.

3.1.3 Електроустаткування

Приміщення цеху графітації відносять до класу В-Іа, тому що при нормальній роботі не утворюються вибухонебезпечні суміші, але це можливо при аваріях, тому при монтажі та ремонті електрообладнання необхідно дотримуватися Правил Установки Електроустаткування. Усі електроустановки, електродвигуни, електропускові апарати повинні бути виконані у вибухозахищеному варіанті з маркуванням 2ЕХЕ II ТЬ. Електричні світильники можуть застосовуватися при встановленні, що рівень їх вибухозахищених властивостей відповідав класу В-Іа. Для приміщення класу В-Іа допускаються масляні пускачі підвищеної надійності проти вибуху серії ПМ-700. Допускається прокладання приводів усередині вибухонебезпечних приміщень по стінах та найменш небезпечних місцях. Застосовуються кабелі ВРГ.

3.2 Виробнича санітарія у цеху графітації обпалених заготовок

3.3.1 Природне та штучне освітлення

Цех графітації належить до VIII розряду зорових робіт. Норма штучного освітлення має бути 50 лк, оскільки у цеху організовано періодичне спостереження ходом процесу виробництва за постійного перебування людей приміщенні. Коефіцієнт природного висвітлення дорівнює 0,58. Природне освітлення у світлий час доби здійснюється через бічні отвори. Штучне освітлення здійснюється ртутними лампами ДРП-1000.

При виконанні ремонту виникає необхідність додаткового освітлення. Для цього передбачено використання переносних світильників СПВ-27. Крім цього передбачено аварійне освітлення світильниками ІНБН-150 у кількості 35.

У разі раптового відключення робочого освітлення включається аварійне на робочих місцях. Воно має бути не нижче 5% нормативного, але не менше 2 лк усередині будівлі.

3.2.2 Вентиляція

Метеоумови в цеху мають бути такими: швидкість руху повітря 0,2-0,4 м/с, відносна вологість 79-82 %, категорія робіт 3 (важка).

У цеху передбачена аерація, суміщена з механічною вентиляцією. Витяжна. Система складається з димососів, газоходів, вентиляторів, аераційних установок.

3.2.3 Побутові та допоміжні приміщення.

За санітарною характеристикою цех графітації відносять до IIб групи виробництва.

До складу побутових приміщень входять:

a) гардеробні (чоловічі та жіночі), 2 приміщення;

b) душові (чоловічі та жіночі), 4 приміщення із загальною кількістю 25 (5-6 осіб на 1 сітку);

c) умивальники (чоловічі та жіночі), 10 одиниць;

d) вбиральні (чоловічі та жіночі), 4 приміщення;

e) кімнати для відпочинку, 2 приміщення площею 10 м2;

f) їдальня, 300 м від будівлі цеху;

g) буфет, там же, де й їдальня;

h) здравпункт, там же.

3.2.4 Індивідуальні засоби захисту.

Для захисту працюючих у цеху графітації передбачені такі засоби:

a) захист шкіри від пилу та шкідливих речовин – бавовняні костюми (в зимовий час ще сукняна куртка);

b) захисні окуляри;

c) захист від опіків – брезентові рукавиці;

d) захист голови – каска «Праця» з підшоломником;

e) захист органів дихання – респіратор;

f) валянки та черевики зі шкірозамінника;

g) основні засоби захисту - ізолюючі, ізолюючі та електровимірювальні кліщі, покажчики напруги, діелектричні рукавички.

3.3 Протипожежна безпека у цеху графітації

3.3.1 Характеристика цеху з вибухопожежної безпеки

Приміщення цеху графітації належать до вибухопожежної категорії виробництва Б.

a) джерелами пожеж та вибухів є:

b) неправильне ведення технологічних процесів;

c) неправильна експлуатація пальників печі;

d) пожежонебезпечні матеріали на ділянці графітації – коксик;

e) небезпека утворення вибухонебезпечних сумішей горючих речовин та пилу з повітрям.

3.3.2 Профілактичні протипожежні заходи

1. Інженерні заходи:

- приміщення цеху будуються з негорючих матеріалів I ступеня вогнестійкості;
- контрольно-вимірювальні прилади та блокування на печах;
- датчики для найбільш раннього виявлення пожежі, що почалася;
- з влаштування блискавкозахисту цех відноситься до III категорії, оскільки клас В-Іа захищає від прямого удару блискавки, електричної індукції та занесення високих електропотенціалів через наземні та підземні комунікації.

2. Організаційні заходи:

- організація пожежної дружини та пожежно-технічної комісії;
- проведення протипожежного інструктажу та занять із пожежно-технічного мінімуму;
- встановлення строго пожежного режиму;
- прибирання робочих місць після закінчення робіт;
- забезпечення справного утримання та постійної готовності до дії засобів пожежогасіння, зв'язку та сигналізації.

3.3.3 Засоби гасіння пожеж

Застосовувані засоби пожежогасіння в цеху графітації представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Засоби гасіння пожеж

Засоби гасіння	Місце встановлення
2	3
Вогнегасники пінні ОВП-5	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади
Вогнегасники вуглекислотні ОУ-8	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади
Установки парового пожежогасіння	Газоходи печей, приміщення просочення
Пристрої автоматичного або дистанційного відключення газу та димососів	Цех графітації
Установки автоматичного сповіщення та гасіння пожеж типу 12АМ, ТОЛ-10/100	Склади у цеху
Гідранти пожежні	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади

Крани пожежні	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади
Пожежне обладнання	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади
Пожежний інвентар	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади
Пожежний ручний інструмент	Виробничі приміщення цеху, побутові приміщення, склади

3.4 Розрахунок розсіювання у атмосфері газових викидів

Визначити максимальні приземні концентрації сернистого ангідриду SO_2 і CO, створювані в результаті викиду газів з димової труби за несприятливих метеорологічних умов, і знайти положення точок з максимальними приземними концентраціями SO_2 і CO щодо димової труби за наступних вихідних даних: кількість викиданих димової труби; температура газів Тг = 100 ^{0}C, масова концентрація SO_2 та CO в газах z_1 = 40мг/м^3, z_2 = 80мг/м^3 відповідно; висота димаря H = 35 м, діаметр труби D = 1 м. Завод розташований у південній частині України.

1. Швидкість газів у гирлі труби:

$$W_0 = V/0{,}785 \cdot D2 = 75/0{,}785 \cdot 1 = 95 \text{ м/с}$$

2. Максимальні приземні концентрації SO_2 та CO у повітрі у разі викиду з одиночного (точкового) джерела з круглим гирлом при несприятливих метеорологічних умовах на відстані $x_т$ від джерела:

$$Cm = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n}{H^2 \sqrt[3]{V \cdot \Delta T}}$$

де A – коефіцієнт, A = 120 з 2/3*мг*град1/3/г;

M - маса SO_2 і CO, що викидається в атмосферу за 1 секунду, M_{SO_2} = 3 г; M_{CO}= = 6 г;

ΔT = Тг - Тв = 75 - 24 = 51 ^{0}C, де Тв - середня температура повітря в 13 годин для найбільш спекотного місяця для даної місцевості;

F – безрозмірний коефіцієнт, що приймають: для газоподібних шкідливих речовин і дрібнодисперсних аерозолів F = 1;

m – безрозмірний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$m = \frac{1}{0{,}67+0{,}1\sqrt{f}+0{,}34\sqrt[3]{f}}$, він залежить від значення *f*, що обчислюється за формулою:

$$f = 10^3 \cdot \frac{W_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T} = 10^3 \frac{95^2 \cdot 1}{35^2 \cdot 51} = 1{,}8 \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot \text{град});$$

n - безрозмірний коефіцієнт, за V*m* > 2 n = 1, де

$$Vm = 0{,}65\sqrt{\frac{V \cdot \Delta T}{H}} = 0{,}65\sqrt{\frac{75 \cdot 51}{35}} = 6{,}8 > 2$$

$$C_m^{SO2} = \frac{120 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 0{,}82 \cdot 1}{35^2 \cdot \sqrt[3]{75 \cdot 51}} = 0{,}038 \text{ мг}/\text{м}^3$$

$$C_m^{CO} = \frac{120 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 0{,}82 \cdot 1}{35^2 \cdot \sqrt[3]{75 \cdot 51}} = 0{,}03 \text{ мг}/\text{м}^3$$

Виходячи з розрахунку видно, що концентрація SO_2 і CO в приземному шарі повітря менша за гранично допустимі в 13 і 33 рази відповідно.

Відстань від димової труби, на якій за несприятливих метеоумов по осі факела досягається максимальна приземна концентрація SO_2 і CO:

$$Xm = \alpha \cdot H,$$

де α – безрозмірна величина, яка визначається за формулою:

якщо V*m* > 2, $\alpha = 7 \cdot \sqrt{Vm}(1 + 0{,}28\sqrt[3]{f}) = 7 \cdot \sqrt{6{,}8}(1 + 0{,}28\sqrt[3]{1{,}8} = 24{,}5$

$$Xm = 24{,}5 \cdot 35 = 856{,}5 \text{ м}$$

В) Небезпечна швидкість вітру, за якої спостерігається максимальна приземна концентрація SO_2 та CO в атмосфері повітря:

якщо V*m* > 2, $Um = Vm \cdot (1 + 0{,}12\sqrt{f})$

$$Um = 7{,}9 \text{ м/с}$$

За даними розрахунку видно, що концентрація шкідливих речовин (SO_2 і CO) у приземному шарі повітря менша за гранично допустимі, тобто, дотримуються норм і правил очищення.

$$q = C1/ГДК1 + C2/ГДК2 = 0{,}106 < 1$$

Отже, немає потреби встановлювати газоочисні споруди.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто етапи технологічного процесу виробництва електродних вуглеграфітових виробів. Також розглянуто технологічну схему. Описано основні етапи: надходження сировинних матеріалів, їх зберігання, дроблення та підготовку до подальшого перероблення. Основну увагу приділино характеристикам сировини, які значною мірою впливають на якість кінцевого продукту. Окремо проаналізовано зміни фізико - хімічних властивостей матеріалу під час графітації при різних температурах.

Проаналізовано процес графітації, під час якого відбувається вирівнювання кристалітів та формування впорядкованої графітової структури, що суттєво покращує фізико - хімічні властивості матеріалу. Наведено класифікацію основних типів штучного графіту відповідно до їхнього призначення.

В результаті аналізу сучасного стану виробництва графітованої продукції, проведеного на основі вивчених літературних джерел і практичного досвіду дослідницької роботи видно, що у промисловості графітування вуглеграфітової продукції проводять в однофазних електричних печах періодичної дії прямого (печі Кастнера), або непрямого (печі Ачесона) нагріву, що забезпечують рівень температур у виробах 2400-3000 °С.

Для багатьох підприємств електродної промисловості надзвичайно актуальним є завдання вдосконалення теплових і енергетичних показників процесу графітування електродних виробів.

Проведена оцінка чинників, що впливають на температурні і енергетичні режими процесу графітування показує, що основним критерієм, що впливає на якість графітуємої продукції є температура, її максимальний рівень, швидкість зміни і розподіл по керну. На температурний режим роботи найбільш сильну дію надають енергетичний

режим роботи печі, властивості теплоізоляційних матеріалів і геометрія керна.

Енергетичний режим роботи характеризується регламентом введення потужності і питомою витратою електроенергії, і великою мірою залежить від геометрії керна і властивостей кернової пересипки - температурної залежності її електропровідності.

Управління процесом графітування в печах Кастнера виконується за заданим регламентом введення потужності і питомою витратою електроенергії, оскільки такий спосіб управління найбільш простий в реалізації. Проте раціональніше виконувати управління по температурі процесу, як основному показнику якості готової продукції.

Вплив різних чинників на температурний і енергетичний режим роботи достатній неоднозначно, тому достатньо гостро стоїть завдання дослідження розподілу температурних полів в печі графітування.

2. Уході виконаної роботи було розглянуто основні розрахунки, пов'язані з експлуатацією печі графітації, зокрема:

- матеріальний баланс печі показав співвідношення між вхідними сировинними матеріалами та кінцевим продуктом -графітованими електродами. Було визначено кількість витратних матеріалів на одиницю продукції, що дозволяє оптимізувати ресурсне забезпечення процесу;

- тепловий баланс змогу встановити основні джерела теплових втрат та ефективність використання електроенергії в печі;

- розрахунок перерізу та числа електродів дозволив визначити оптимальні геометричні параметри струмопідводної системи. Це забезпечує рівномірний розподіл струму та теплової енергії в робочому просторі печі , що критично важливо для рівномірного графітування виробів;

- визначення довжини електродів здійснювалося з урахуванням необхідного опору та теплового режиму. Отримані параметри забезпечують стабільну роботу печі, без перевантажень та втрат енергії;

- розрахунок розміру печі дозволив підібрати оптимальні габарити

камери графітації з урахуванням продуктивності , технологічного зазору, кількості заготовок та необхідного об’му обкладального матеріалу. Це сприяє підвищенню ефективності, завантаження та зменшинню втрат тепла.

Усі проведені розрахунки спрямовані на забезпечення енергоефективної та технологічно обгрунтованої роботи печі графітації. Отримані результати можуть бути вмкористані для вдосконалення конструкції обладнання та оптимізації технологічного процесу у виробництві вуглеграфітових матеріалів.

3. У цеху графітації обпалених заготовок створені умови, що відповідають вимогам нормативно-правових актів з охорони праці та техногенної безпеки. Усі технологічні процеси організовані з урахуванням потенційних небезпек та шкідливих факторів виробництва.

Техніка безпеки в цеху графітації передбачає чітке дотримання інструкцій з експлуатації обладнання, контроль за справністю печей графітації, механізмів подачі сировини та транспортування заготовок. Обмежений доступ до зон з високими температурами та рухомими частинами обладнання забезпечує додатковий захист персоналу.

Заходи щодо усунення шкідливостей та небезпек включають герметизацію печей, використання локальних і загальнообмінних вентиляційних систем, автоматизацію процесів контролю температури й тиску, а також встановлення сигналізації при аварійних викидах.

Електроустаткування відповідає вимогам електробезпеки: забезпечене заземленням, автоматичним відключенням у разі короткого замикання або перевантаження, а також відповідним маркуванням. Всі працівники проходять інструктаж з електробезпеки.

Освітлення у цеху комбіноване: природне — через віконні прорізи з урахуванням санітарних норм, штучне — забезпечується вибухозахищеними світильниками, що дають рівномірне освітлення робочих місць.

Вентиляція організована за змішаним принципом: загальнообмінна

припливно-витяжна та локальні витяжки у зонах виділення пилу й газів. Це забезпечує підтримку допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі.

Приміщення цеху відповідає будівельним нормам для об'єктів з високотемпературним обладнанням: підлога має вогнестійке покриття, передбачені аварійні виходи та зони евакуації.

Індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ), обов’язкові для персоналу: термостійкий спецодяг, респіратори або маски від пилу і газів, захисні окуляри, навушники від шуму, рукавиці з вогнетривких матеріалів.

Протипожежна безпека в цеху графітації забезпечується відповідно до вимог ДБН та ДСТУ: встановлено автоматичну пожежну сигналізацію, вогнегасники (вуглекислотні, порошкові), протипожежні щити. Проведено інструктаж з дій у випадку пожежі.

Протипожежні заходи включають регулярні перевірки електрообладнання, усунення джерел займання, контроль температурного режиму в печах, а також обмеження доступу до легкозаймистих матеріалів.

Розрахунок розсіювання газових викидів у атмосфері показав, що при встановлених параметрах вентиляції та висоті викидної труби, концентрації шкідливих речовин на межі санітарно-захисної зони не перевищують гранично допустимих норм, що свідчить про безпечний вплив підприємства на довкілля.

Отже умови праці в цеху графітації обпалених заготовок можуть вважатися безпечними за умови дотримання встановлених регламентів. Комплекс технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів забезпечує високий рівень захисту працівників, а також знижує екологічний ризик виробництва для довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Углеродные наноматериалы: электронное строение и процессы структурообразования / Я.В. Зауличный, С.С. Петровская, Е.В. Грайворонская, Ю.М. Солонин. Киев: Наукова думка, 2012. 277 с.

2. Куцова В.З., Котова Т.В. Вуглецеві наноматеріали : навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. 61 с.

3. E. Rollings et al. Syn--thesis and characterization of atomically thin graphite films on a silicon carbide substrate. J. of Physics and Chemistry of Solids, 2006. Vol. 67; Zh. Chen et al. Graphene Nano-Ribbon // Electronics Physica E. 2007. Vol. 40.

4. І.Ф. Миронюк,В.І. Мандзюк, В.М. Сачко Вуглецеві електродні матеріали для електрохімічних конденсаторів (огляд). PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDSTATE Т. 17, № 2 (2016) С. 262-268.

5. Овсієнко І.В., Вовченко Л.Ю., Мацуй Л.Ю. Вуглецеві матеріали та інтеркальовані сполуки на їх основі / І.В.Овсієнко, Л.Л.Вовченко, Л.Ю.Мацуй. Київ. 2009. 135 с.

6. Станкевич И.В., Никеров М.В., Гальперин Е.Г., Бочвар Д.А. Кристаллические модификации углерода: относительная стабильность и характер электронного спектра. Журнал структурной химиию, 1987. №4. С.96.

7. Черныш И.Г., Карпов И.И., Приходько Г.П., Шай В.М. Физико-химические свойства графита и его соединений. Киев : Наукова думка, 1990. 200 с.

8. Charlier J.-C., Michenaud J.-P., Gonze X. First-principles study of the electronic properties of simple hexagonal graphite. Phys. Rev.B. V46. 1992. N8. P.4531-4539.

9. Slonschewski J.-C., Weiss P.-K. Band structure of graphite. Phys. Rev. V109. 1957. N4. P. 272-296.

10. Tatar R.S., Rabii S. Electronic properties of graphite: A unified theoretical study. // Phys. Rev.B. V25. 1992. N6. P.4126-4141.

11. Уббелоде А.Р., Льюис Ф.А. Графит и его кристаллические соединения. Москва: Мир, 1965. 256 с.

12. Mairo I., Mering J. Graphitization of soft carbon. Chemistry and physics of carbon, 1970. V.6. P.125-190.

13. Charlier J.-C., Michenaud J.-P., Lambin P., Vigneron J.P. Tight-binding density of electronic states of pregraphitic carbon. Phys.Rev. B. V45. 1991. N8. P. 4540-4543.

13. Charlier J.C., Michenaud J.P., Gonze X. Tight-binding model for the electronic properties of simple hexagonal graphite. Phys.Rev. B. V44. 1991. N24. P.13237-13249.

14. Harker H. An electronic model for amorphous carbon. Phil. Mag., 1967. V.16, N44. P.1193-1296.

15. Adkins C.Y, Freaker S.M., Hamilton E.M. Electrical conduction of amorphous carbon. Proc. Ray.Soc., 1970. N2. P.183-188.

16. Galushka A.A., Madden H.H., Allred R.E. Electron spectroscopy of graphite, graphite oxide and amorphous carbon. App. Surf. Sc., 1988. V.32, N1. P.253-272.

17. Григорчак І.І. Інтеркаляція: здобутки, проблеми, перспективи. Фізика і хімія твердого тіла, 2001. Т.2. №1. С. 7-55.

18. Herold A. Synthesis of graphite intercalation compounds. NATO ASY., Ser.B., 1987. V.175. P. 3-45.

19. Kirczenow G. Domain model of stage order and disorder in intercalation compounds. Phys.Rev. B. V31. 1985. N8. P. 5376-5386.

20. Leung S.Y., Underhill C., Dresselhaus G., Krapchev T. X-ray chracterization of graphite intercalation compounds. Solid State Commun. V32. 1979. N3. P. 635-639.

21. Beguin F., Messaoudi Ali. New method for preparing Supported Metals: Decomposition of Metallocenes by Graphitide KC8. J. Mater. Chem., 1992. V2. N9. P. 957-960.

22. Dahn J.R., Dahn D.C., Haering R.R. Elastic energy and staging in intercalation compounds. Solid State Communs, 1982. V.4., N3. P.179-183.

23. Anderson S.H., Chung D.D.L. Kinetics and thermodynamics of intercalation of bromine in graphite – I Experiment. Carbon, 1987. V.25,.N2. P.191-210.

24. Anderson S.H., Chung D.D.L. Kinetics and thermodynamics of intercalation of bromine in graphite – II. Theory. Carbon, 1987. V.25. N2. P.211-218.

25. Anderson S.H., Chung D.D.L. A theory for the kinetics of intercalation of graphite. // Carbon, 1987. V.25. N2. P.377-389.

26. Ho C.T., Chung D.D.L. Kinetics of intercalate description from carbon fibers intercalated with bromine. Carbon, 1990. V.28. №6. P.825-830.

27. Andersson O.E., Sundqvist B., McRae E., Marêché J.F., Lelaurain M. A study of temperature and pressure induced structural and electronic changes in SbCl5 intercalated graphite: Part II. Experimental data for c-axis resistivity. J. Mater. Res, 1992. V.7. N11. P. 2989-3000.

28. Sugihara K. Theory of the c-axis conduction and thermoelectric power in graphite intercalation compounds. J Phys. Soc. Jap., 1993. V.62. N2. P. 624-633.

29. Enoky T., Sakamoto N., Nakaxawa K., Suzuki K., Sugihara K., Kobayashi K. C-axis electrical conductivity of sodium-hydride-graphite intercalation compounds. Phys. Rev. B., 1993. V.47. N16. P. 10662-10670.

30. Suzuki M., Suzuki I-S., Lee C., Niver R., Matsubara K., Sugihara K. C-axis resistivity of SbCl5 graphite intercalation compounds. J. Phys.: Condens. Matter., 1997. V.9. P. 10399- 10420.

31. Дворкіна І.В., Мацуй Л.Ю., Вовченко Л.Л., Харьков Є.Й., Турчин О.М. Фононне захоплення в пірографіті, інтеркальованому хлоридами металів. Вісник київського університету, 1991. №2. С.78-83.

32. Iye Y., Takahashi O., Tanuma S.-I., Tsuji K., Minomura S. Effect of pressure on Electronic Properties of Acceptor-Type graphite intercalation Compounds. J. Phys. Soc. of Japan, 1982. V.51. N2. P. 475-482.

33. Andersson O.E., Lelaurain M., Marêché J-F., McRae E., Sundqvist B. Structure, C-axis resistivity and P-T phase diagrams SbCl5 intercalated graphite. Synthetic Metals, 1989. V.34. P. 187-192.

34. Hwang D.M., Nicolaides G. Ultrasonic studies of phase transition in stage-4 antimony pentachloride intercalated graphite. Sol.Stat.Comun., 1984. V.49. N5. P.483-487.

35. De Groot K., Mauder D., Müller V. Ultrasonic investigations of the kinetics of ordering in $SbCl_5$-intercalated graphite. Synthetic Metals, 1989. V.34. P.335-340.

36. Zhu W. et al. Diamond and Related Materials, 2002. №10. P 1709–1713.

37. Mykhailova H.Yu., Nishchenko M.M., Kovalchuk B.V. et all. Universal J. Mater. Sci 2016. №.5. P.109 -125.

38. Михайлова Г.Ю., Лень Є.Г., Галстян І. Є. та ін. Металлофіз. новітні технол., 2020. № 4. P. 575–593.

40. Galstian I.Ye. et all. Metallofi z. Noveishie Tekhnol., 2020. № 4. P. 451–470.

41. Xiao G. et al. Applied Energy, 2017. №. 208. P. 1318-1342.