

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

кафедра металургії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему "Аналіз процесу об'єму енергетичних
заготовок"

Виконав: студент II курсу, групи 8.1369-МКМ
спеціальності 136 - металургія

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми

МКМ
(назва освітньої програми)

Борщинець М. Ю

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Березина О. Р

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент д.х.н., проф. Трубуцьков Д. В

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра металургії _____
Рівень вищої освіти II магістрський _____
Спеціальність 136 - металургія _____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма металургія кольорових металів _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« 02 » вересня 2020 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Боршимолець Максим Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз процесу обжигу електродних заготовок.

керівник роботи к.т.н., доц. Феретина О.Р.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 25 » 05 2020 року № 596-С

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи кокс, лек, 91500/1915.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Загальна частина. Технологія виробництва електродних заготовок. Вплив температурних режимів.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схема виробництва графітованих електродів. Схема баластнокамерної печі. Опанівання м'якого Роквелла вимаму. Властивості електродних виробів. Усадка виробів. Властивості.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Юзеф Беретис О.Р.		
2	Юзеф Беретис О.Р.		
3	Юзеф Беретис О.Р.		

7 Дата видачі завдання 02 вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Загальна частина	20.09.20	
2	Технологія виробництва електричних загонів	15.10.20	
3	Вплив температурно-часових режимів на властивості загонів	15.11.20	
4	Оформлення проєкційної матеріалу	30.11.20	

Студент

(підпис)

М. Ю Беретис

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)

(підпис)

О.Р. Беретис

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

Р.М. Волк

(ініціали)

та

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: на 93 сторінках машинного тексту, з застосуванням 30 ілюстрації, 20 таблиць та 19 літературних посилань.

ВИПАЛ, ТЕМПЕРАТУРА, ЕЛЕКТРОДИ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, РЕЖИМИ ВИПАЛУ, ПІЧ ВИПАЛУ

Тема магістерської роботи «Аналіз процесу обжигу електродних заготовок».

В загальній частині представлена технологічна схема виробництва електродної продукції. Достатньо повно розглянуто властивості сировинних матеріалів та принцип роботи печей для випалу.

У другій частині представлено схеми завантаження заготовок в печі та температурні режими випалу електродів. Досліджено температурні поля при випалюванні електродів.

В третій частині розглянуто вплив температурного поля печі на зміну властивостей по довжині електрода. Досліджено способи обігріву електродних заготовок та вплив зовнішніх та внутрішніх обігрівальних стінок.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	9
1.1 Технологічна схема виробництва електродної продукції	9
1.2 Зв'язуюче для електродів	14
1.3 Властивості коксу.....	15
1.4 Технологія випалу електродів.....	16
1.5 Схеми конструкції і принцип роботи печей	18
1.6 Значення засипки для процесу випалу.....	30
2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК.....	37
2.1 Схема завантаження заготівель в печі	37
2.2 Температурний режим випалу електродів.....	40
2.3 Дослідження температурних полів при випалюванні електродів.....	57
3 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ РЕЖИМІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗАГОТОВОК.....	65
3.1 Дослідження способів обігріву електродних заготовок.....	65
3.2 Усадка виробів при випалюванні.....	72
3.3 Вплив температурного поля печі на зміну властивостей по довжині електрода.....	77
3.4 Вплив зовнішніх і внутрішніх обігрівальних стінок.....	85
ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	92

ВСТУП

Всі вуглеграфітові матеріали у своїй основі містять вуглець, що володіє рядом властивостей, які дозволили застосувати його для широкого спектру виробів, в якому майже кожен вид має специфічні властивості.

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

Внаслідок низького тиску парів вуглецю всі процеси при виготовленні різних видів виробів протікають у твердому стані.

Одним з найбільш великих споживачів електродів є алюмінієва промисловість. Електроди тут працюють у дуже жорстких експлуатаційних умовах (висока температура, агресивне середовище у вигляді розплавлених солей і т.д.), тому вони повинні відповідати таким основним вимогам: 1) витримувати високу температуру; 2) мати хорошу електропровідність, малу пористість і достатню механічну міцність; 3) володіти хорошою стійкістю проти окислення киснем повітря і роз'їдання різними хімічними речовинами; 4) містити мінімальну кількість домішок; 5) мати правильну геометричну форму; 6) бути достатньо дешевими.

Найбільш повно цим вимогам відповідають електроди з вуглецевих матеріалів.

Вуглецеві електроди і вироби залежно від методу їх виготовлення ділять на пресовані обпалені і безперервні самообпалюючі. Крім того, вуглецеві вироби можна поділити залежно від сировини, з якого вони виготовлені, на вугільні, коксові та графітовані.

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

Мета роботи: провести аналіз та оцінити варіанти вдосконалення процесів та технологічних методів в процесі випалу електродних заготовок.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести всебічний аналіз сировинних та технологічних матеріалів та оцінити їх вплив на якість заготовок.
2. Вдосконалити способи формування керна печі випалу.
3. Надати оцінку можливості організації трьох систем вогню в 36 камерній печі випалу.

Об'єкт дослідження: фізико – механічні закономірності в процесах випалу електродних заготовок.

Предмет дослідження: технологія формування керна печі, технологічні режими процесу випалу в кільцевих багатоканальних печах.

Методи дослідження: оцінка розподілу температури по об'єму керна печі і впливу температурного поля на властивості та дефектоутворенню заготовок.

Наукова новизна:

1. Вдосконалена схема формування керна печі.
2. Встановлено вплив засипки на властивості обпалених заготовок.
3. Встановлено вплив температурно – часових параметрів на якість заготовок.

Практичне значення:

1. Запропоновано схеми формування керна печі можуть бути використані в реальному процесі.
2. Уточнено технологічні режими, які можуть бути використані при розроблені рекомендації по зменшенню виходу бракованою продукцією.

Апробація результатів роботи: результати досліджень, які включено до кваліфікаційної магістерської роботи, доповіли на конференції кафедри металургії.

Відомості про публікації:

Боришполець М.Ю. Аналіз процесу обжигу електродних заготовок / М.Ю. Боришполець, О.Р. Бережна / Матеріали XXV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. ІННІ ЗНУ. – Запоріжжя:ЗНУ. – 2020 р. С.27.

Структура і об'єм роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 51 найменувань, викладена на 93 сторінках машинописного тексту, включаючи 30 рисунків, 20 таблиць.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічна схема виробництва електродної продукції

Принципова технологічна схема електродного виробництва складається з таких основних операцій:

- прийом і підготовка сировинних матеріалів;
- приготування електродної маси;
- пресування заготівель;
- випалення;
- ущільнення;
- графітація;
- механічна обробка заготівель.

За цією схемою виробляють графітовану продукцію. При виробництві вугільних виробів виключенням є процес графітації, а товарні маси після змішування і брикетування відправляють споживачеві.

Незважаючи на різноманітність виробів електродного виробництва вони виготовляються за загальним способом. Процес полягає в спекаючому випаленні виробів, відформованих з суміші сипкого вугільного матеріалу з добавкою єднальних речовин.

На рис. 1.1 приведена принципова схема виробництва електродних виробів усіх видів. Проте залежно від початкової сировини, а також від наявності того або іншого технологічного устаткування схема виробництва може змінюватися.

Виробництво електродної продукції характеризується великою кількістю операцій і значною тривалістю процесу, що досягає, наприклад, при виробництві графітованих виробів більш 2-х місяців.

Дуже важливо чітко організувати роздільний прийом і закрите зберігання сировинних матеріалів різних за властивостями. Це дозволить

забезпечити точне дозування сировини на наступних стадіях виробництва, що є основою для отримання виробів стабільної якості.

Тверді вуглецеві матеріали, що поступили на завод, зберігаються в спеціальних, обов'язково закритих, складах, де оберігаються від зволоження і засмічення.

Зазвичай ці матеріали прибувають на завод в шматках розміром 25 - 70мм. На заводі матеріали заздалегідь дробляться на зубчастих вальцьових або щічних дробарках. Міра попереднього дроблення визначається технологічними операціями і наявністю устаткування. Для великих шматків існує операція ручного піддроблення на колосникових решітках перед попереднім дробленням.

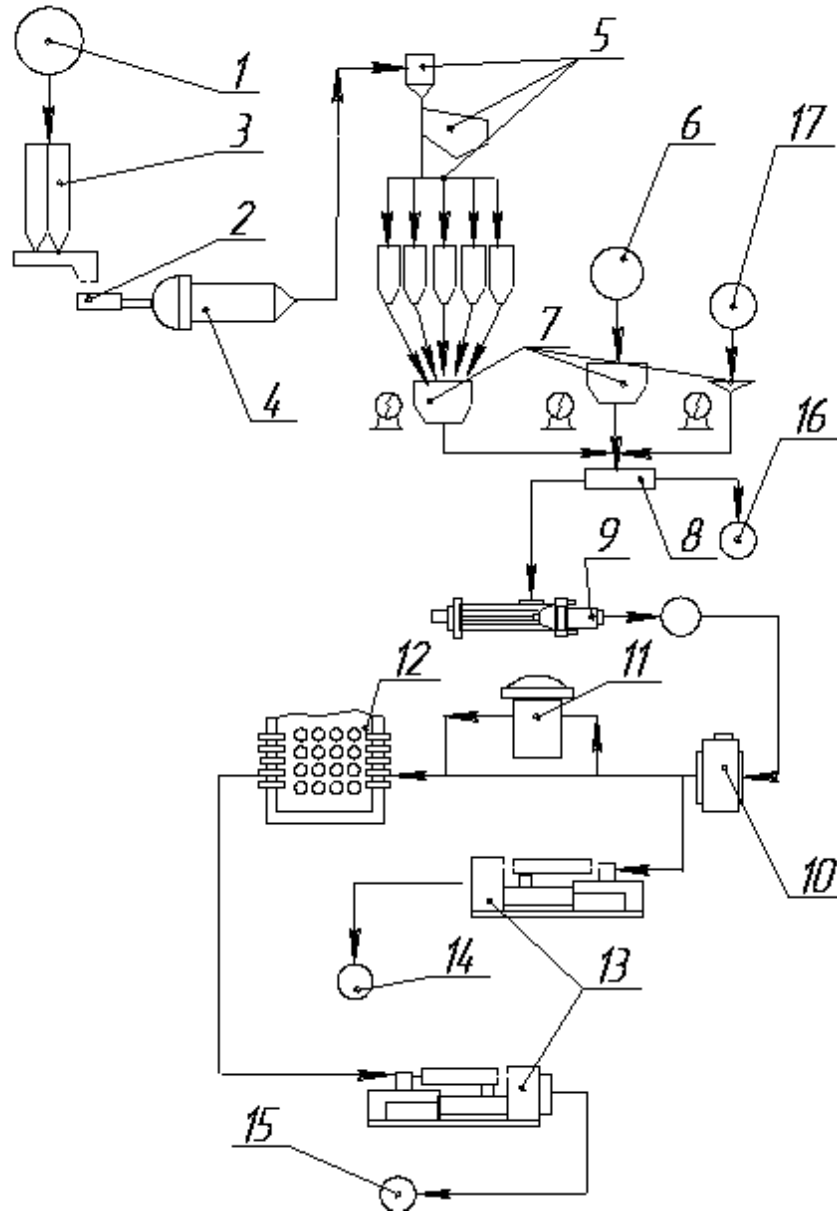
Зберігання кам'яновугільного пека визначається способом застосування його у виробництві. Зазвичай пек застосовується в рідкому стані, тому його зберігають в спеціальних бункерах, що обігріваються, їх називають пекоплавителями. Якщо пек використовується в твердому виді, його зберігають в критих приміщеннях. При роботі на твердому печі в складських приміщеннях встановлюють дробарки для подрібнення пека.

Розчинники (антраценове масло) зберігаються в цистернах і поступають безпосередньо в відділення змішування.

Усі види єднальних матеріалів, пройшовши стадію попередньої підготовки, поступають безпосередньо на переділ змішування, звідки після зважування подаються в змішувальні машини.

Вуглецеві матеріали після попереднього дроблення поступають на прожарення.

Після прожарення виробляють подрібнення і класифікацію матеріалів.



1 - склад сировини; 2 - попереднє дроблення; 3 - прожарення; 4 - подрібнення; 5 - розсівання по фракціях в сортові бункери; 6 - склад єднальних матеріалів; 7 - дозування; 8 - змішування; 9 - пресування заготівель; 10 - випалення; 11 - просочення; 12 - графітація; 13 - механічна обробка; 14 - склад готової продукції; 15 - склад графітованих електродів; 16 - товарні маси; 17 - склад добавок

Рисунок 1.1 - Технологічна схема електродного виробництва

Середнє подрібнення може вироблятися на кульових млинах з ситами або вальцових дробарках з наступною класифікацією на грохотах. Для отримання тонких фракцій застосовуються трубчасті млини.

Розділені по класах крупини вуглецеві матеріали зберігаються в дозувальних бункерах. Для кожного виду матеріалу і для кожного розміру зерна має бути свій бункер. Бункерне відділення обладнано спеціальними дозувальними вагами.

Бій електродів, що утворюється при пресуванні, випаленні, графітуванні і механічній обробці, повертається у виробництво, пройшовши операцію дроблення. Технологія переробки уточнюється залежно від виду бою і умов його застосування.

Після зважування усі матеріали поступають в змішувальні машини, де з окремих компонентів вуглецевих матеріалів і єднальних готується однорідна суміш, звана електродною масою. Електродна маса або поступає для наступної переробки на електродні вироби, або видається як готова товарна продукція.

Для зручності транспортування і застосування електродну масу формують (брикетують). Відформована маса, пройшовши випробування, поступає на склад зберігання готової продукції.

Маса, що призначається для виробництва електродів, після змішування передається в пресовий цех і, після того, як в ній буде досягнута рівномірна температура, піддається трамбуванню. Ця операція здійснюється або безпосередньо в контейнері пресу, або на окремих машинах, з яких затрамбований блок завантажується в контейнер пресу.

Після охолодження спресовані електроди зберігаються на проміжному складі. З цього складу вони поступають на випалення. Виробничий цикл для одних виробів закінчується цим переділом, і після випробування вони поступають на склад готової продукції. До таких виробів відносяться аноди для електролізу алюмінію, деякі види футерувальних блоків.

Інші обпалені вироби перед вступом на склад готової продукції повинні піддаватися механічній обробці для надання їм товарної форми.

Деякі обпалені вироби призначаються для графітування. Графітовані вироби або поступають безпосередньо на склад готової продукції, або ж передаються на завершальну операцію - механічну обробку. Тут вироби поступають на різні верстати залежно від необхідної форми обробки. Переділ механічної обробки оснащується необхідним набором верстатів різних типів, щоб забезпечити різноманітні вимоги до готових виробів.

Як показує багаторічний досвід роботи заводів, усі технологічні операції мають велике значення для забезпечення високого виходу якісної продукції.

Дотримання режимів змішування, охолодження і пресування електродної маси, а також застосування мундштуків заданої геометрії при формуванні дає можливість отримувати заготівлі з високим виходом придатного. При випаленні, найтривалішому процесі, заготівлі зазнають значні термохімічні зміни, в результаті яких формуються основні властивості майбутніх виробів. Для забезпечення збереження форми і цілісності заготівель, отримання міцного однорідного по структурі обпаленого матеріалу, необхідно строго витримувати усі технологічні параметри випалення.

При наступній термообробці заготівель в печах графітації вони придбають високу електро- і теплопровідність. В даному випадку вимагається дотримання не лише електричних режимів графітації, але і схем завантажень заготівель і упаковки печі пересипним і теплоізоляційним матеріалами.

Точна обробка ніпеля і ніпельного гнізда досягається в процесі механічної обробки, значною мірою впливає на питому витрату електродів у споживача.

У отриманні якісних виробів електродного виробництва важливу роль грає контроль дотримання технологічного режиму і властивостей сировини, напівпродуктів і готової продукції на кожному переділі.

1.2 Зв'язуюче для електродів

Основними функціями сполучного при виробництві вуглеграфітових матеріалів є пластифікація електродної маси і спікання спресованих з неї виробів [2]. Пластифікація здійснюється шляхом змочування сполучною вуглецевого наповнювача, створення адгезійного зв'язку з ним при збереженні когезійної міцності плівки сполучного, що і додає зв'язність електродної маси. При змішанні і пресуванні плівка сполучного повинна залишатися досить рухомий, щоб забезпечити можливість рівномірного розподілу компонентів шихти, а потім і пластичної течії маси. При охолодженні спресованих заготовок завдяки високій в'язкості плівки пов'язує і міцності зв'язку її з наповнювачем зберігається форма виробу, стає можливим транспортування спресованих виробів.

При наступному випалюванні під дією високих температур зв'язуюче переходить у якісно новий стан – кокс. Зміцнюється вуглецевий наповнювач шляхом фізичного склеювання його знову утворюється коксом і створення хімічних зв'язків на кордоні наповнювач - кокс. При цьому формується структура та властивості готового продукту.

Таким чином, функції сполучної різноманітні, причому головні з них - пластифікація і спікання - є незалежними, зумовленими різними властивостями пов'язує.

В ряду відомих сполучних речовин, що застосовувалися в технології вуглеграфітових матеріалів, - кам'яновугільна смола і пек, нафтові залишки, штучні смоли, каніфоль, патока та ін. Кам'яновугільний пек найбільш повно задовольняє всім вимогам до сполучній. Пеки дають при термічному розпаді велика кількість коксу високої міцності. Ці продукти здатні цементувати будь-які сипкі тіла, нездатні до спікання. Крім того, ці печи володіють високими пластифікуючими властивостями.

1.3 Властивості коксів

Кокс - це твердий вуглець.

Фізичні властивості коксу:

- містить 96 - 98% С, решта Н, S, N, O;
- пористість - 49...53%,
- істинна щільність - 1,80...1,95 г/см³,
- уявна щільність ≈ 1 г/см³,
- насипна маса 400...500 кг/м³,
- зольність 9...12%,
- вихід летких речовин - 1%,
- вологість при гасінні водою і інертним газом - відповідно 2...4% і не більше 0,5%;
- межа міцності при стискуванні – 15...25 МПа, при зрізі (характеризує стійкість до стирання) – 6...12 МПа,
- теплота згорання 29...30 МДж/кг.

Будова і властивості коксу кам'яновугільного залежать від складу вугільної шихти, кінцевої температури і швидкості нагріву коксованої маси.

Зі збільшенням вмісту в шихті газових та іншого вуглецю, що характеризується малою мірою метаморфізму, пониженням кінцевої температури коксування і зменшенням витримки при цій температурі, реакційна здатність і горючість отриманого коксу зростає. При збільшенні вмісту газового вуглецю в шихті міцність і середня крупність шматків коксу зменшуються, а пористість його зростає. Підвищення кінцевої температури коксування сприяє збільшенню міцності коксу кам'яновугільного, особливо до стирання. При подовженні періоду коксування і зниженні швидкості нагріву коксованої маси середня крупність шматків коксу збільшується.

Властивості коксу визначаються з представницьких проб, відібраних від товарних партій коксу за СОУ МПП 75.160-323. Методи відбору та

підготовки проб мають відповідати вимогам ГОСТУ 322-12-3-95, обладнання, яке використовується - ГОСТУ 322-004-96.

1.4 Технологія випалу електродів

Випал - одна з найважливіших технологічних операцій, в процесі якої формуються якісні характеристики та експлуатаційні властивості електродних матеріалів різного призначення .

Під випаленням розуміють процес термічної обробки пресованих заготівель, що призводить до спікання часток порошку наповнювача коксом зв'язуючого.

Як видно з визначення, основним при випаленні вуглецевих пресованих заготівель є формування зі зв'язуючого цементуючих коксових решіток. При цьому відбувається термічна деструкція зв'язуючого, утворення з нього напівкоксу і наступне перетворення його в кокс, що зв'язує в єдине ціле частки вуглецевого наповнювача. Матеріал, що утворюється в результаті спікання, представляє агломерат вуглецевих часток, скріплених коксом зв'язуючого. Це новий стан забезпечує такі цінні властивості виробів, як міцність, термічна і хімічна стійкість, висока електропровідність, завдяки яким вуглецеві матеріали широко застосовуються в різних галузях промисловості.

Цільове призначення операції випалу полягає в перетворенні сполучних речовин (наприклад, кам'яновугільний пек) у кокс, в результаті нагріву спресованих (зелених) заготовок до високої температури (близько 1000°C).

Виходячи з призначення операції випалення вуглецевих формованих заготівель, головними завданнями при випаленні вважають забезпечення максимального виходу коксового залишку зі зв'язуючого, що обумовлює міцність спікання часток наповнювача і кінцеву механічну міцність

обпалюваних заготівель і готових виробів; отримання матеріалу з однорідної за усім об'ємом заготівлі бездефектною структурою.

Виконання цих вимог залежить від безлічі чинників, у тому числі від якості початкових сировинних матеріалів (коксу-наповнювача і зв'язуючого), умов виготовлення "зеленої" заготівлі (рецептури, параметрів змішування і пресування маси), а також від параметрів випалення: швидкості нагріву "зелених" і охолодження обпалених заготівель, рівномірності температурного поля по довжині заготівель, кінцевої температури випалення, властивостей засипочних матеріалів, схем завантаження заготівель в камери і так далі.

В процесі випалення у вуглецевих заготівлях внаслідок їх складного початкового складу протікають різні фізико-хімічні процеси, що супроводжуються зміною агрегатного стану (заготівля спочатку розм'якшується внаслідок розплавлення зв'язуючого пека, потім знову твердне в результаті коксування останнього); зміною розмірів (розширенням і усадкою); втратою маси. Ці зміни заготівель можуть відбуватися в певній послідовності і одночасно супроводжувати один одного. Результатом різноманітних дій є напруга в заготівлях, які при несприятливому поєднанні технологічних параметрів можуть привести до спотворення форми заготівель або до їх розтріскування. Тому нагріваючи і охолоджуючи заготівлі при випаленні за інших рівних умов необхідно вести так, щоб звести до мінімуму напругу, що неминуче виникає в них.

1.5 Схеми конструкції і принцип роботи печей

У світовій практиці виробництва електродної продукції нині використовують печі випалення декількох типів :

- 1) багатокамерні кільцеві закриті, типу Ридгаммера;
- 2) багатокамерні кільцеві відкриті, вживані переважно при випаленні анодних блоків для алюмінієвої промисловості;
- 3) багатокамерні кільцеві закриті для випалення заготівель в контейнерах при прямому нагріві їх газами (без пересипки між контейнерами);
- 4) з викочуванням подиною для випалення великогабаритних заготівель в індивідуальних і малогабаритних - в групових контейнерах з прямим нагрівом їх газами;
- 5) тунельних для повторного швидкісного випалення продукції, просоченої пеком;
- 6) електричних.

З вказаних конструкцій найбільш поширені багатокамерні кільцеві печі закриті, типу Ридгаммера.

За багато років експлуатації за кордоном вони зазнали значних конструктивних змін, спрямовані в основному на зменшення перепаду температур по висоті робочого об'єму камер, зниження теплової інерції. За останніми даними передових зарубіжних фірм печі Ридгаммера в основному будують вище за нульову відмітку і обладнують підвісними боровниками. Їх застосовують переважно для спеціалізованого випалення великогабаритних електродних заготівель. Розміри касет визначають, виходячи із строгого розрахунку завантаження: не більш за одну заготівлю по ширині касети, двох заготівель по її висоті.

Газ спалюється за допомогою пальників, вмонтованих в край зведення камери з боку руху "вогню", з напрямом факела у вогневі колодязі, що служать для перетікання продуктів згорання з попередньої камери в

наступну. Вогневі колодязі, на відміну від вітчизняних конструкцій, розташовані усередині камер.

Звуження касет, спеціалізація печей на один типорозмір заготівель дозволяють не лише механізувати процес обслуговування і значною мірою інтенсифікувати випалення, але і збільшити продуктивність печей (таблиця 1.1).

Та ж принципова особливість відрізняє і багатокамерні печі відкритого типу швейцарської фірми "Алюсвис", французької фірми "Пешине", у яких ширина касет розрахована на один блок, що дозволяє рівномірно і швидко прогрівати його з обох боків касети.

Печі з викочуванною подиною для контейнерного випалення продукції, а також тунельні печі для випалення просоченої продукції почали застосовувати в останні 10-15 років. В порівнянні з багатокамерними касетними печами ці пристрої відрізняються зниженою тепловою інерцією, дозволяють спалювати летючі речовини, що виділяються, що дає можливість при роботі на них отримати значну економію палива (таблиця 1.1).

Відсутність засипки між контейнерами і безпересипочне випалення просочених заготівель в тунельних печах забезпечують значну економію засипочних матеріалів, а також різко знижують трудоемність операцій чищення обпаленої продукції. На печах контейнерного випалення і тунельних можна повністю механізувати трудоемні операції завантаження і розвантаження заготівель.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика обпалювальних печей

Характеристика	30-камерна піч, не спеціалізована	26-камерна піч, спеціа лізована	Печі з викочуванням подини для контейнерного випалення
Випалення великогабаритних заготівель 500-710мм			
Площа подини, м ²	387	479	140
Коеф. використання, %	93,0	-	-
Подова продуктивність печей по завантаженню, т/(м ² ·год)	10,25	28,9	22,4
Питома витрата засипки на 1 т завантажених заготівель, кг/т	90-100	70-80	60-70
Питома витрата палива, МДж/т	10,48	3,35-4,19	3,14-3,35
Випалення заготівель, просочених пеком			
Подова продуктивність печей по завантаженню, т/(м ² ·год)	40-36,0	-	43
Питома витрата засипки, кг/т	90-110	-	60-70
Питома витрата палива, МДж/т	6,28-8,38	-	3,27-3,35

У вітчизняній практиці використовують в основному заглиблені в землю багатокамерні кільцеві, закриті печі. Для окремих видів малогабаритної продукції, що не вимагають повільного нагріву, застосовують індивідуальні камери. Їх відмінність від камер багатокамерних

печей лише в тому, що вони забезпечені індивідуальною системою обігріву (підводу і спалювання газу і відведення продуктів згоряння).

Багатокамерна обпалювальна піч складається з двох паралельних рядів камер, які розташовані в безпосередній близькості одна від одної і сполучені між собою каналами для послідовного переходу газів з однієї камери в іншу.

На вітчизняних заводах експлуатуються 20-, 30 - і 32-камерні печі, опалювальні природним газом з теплотою згоряння 42,5...46,9МДж/кг. З моменту будівництва перших печей і приблизно до 50-х років минулого століття вітчизняні печі конструктивно відповідали печам Ридгаммера.

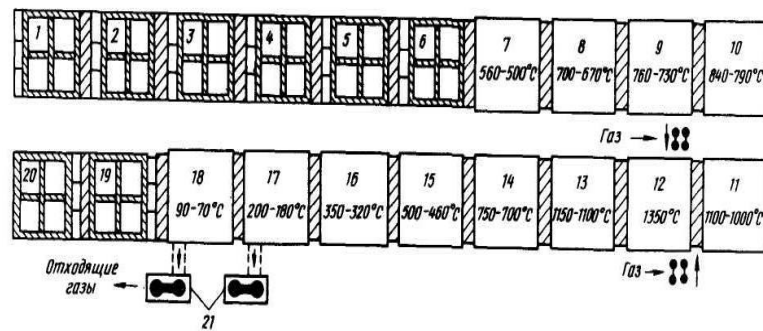
Протягом багаторічної експлуатації до пристрою вітчизняних багатокамерних печей було внесено багато змін, головним з яких було перенесення вогневих колодязів з камери в міжкамерні простінки. Це дозволило підвищити продуктивність печей. Нині діючі печі мають переважно шестикасетні камери з розмірами касет 1240×1740×3800 (4000) мм. Звуження касет (реконструкцією шестикасетних камер на восьмикасетні) на окремих печах сприяло деякому збільшенню їх теплової потужності. Це дозволило використовувати вузькокасетні печі для випалення великогабаритних заготівель з одночасним скороченням тривалості графіка випалення і витрати палива.

Для випалення великих електродних виробів застосовують багатокамерні обпалювальні печі, а для дрібних електродних і електровугільних матеріалів - тунельні печі. Для найбільш відповідальних конструкційних і щіткових матеріалів застосовуються печі періодичної дії.

Необхідно звернути увагу на деякі властивості вуглецевих матеріалів, що підлягають випаленню. Передусім вони повинні обпалюватися у відновному або нейтральному середовищі, щоб оберегти їх від згоряння. Усі електродні матеріали мають здатність деформуватися під власним навантаженням при нагріванні. Ці умови накладають відомі вимоги до будь-якої конструкції обпалювальної печі.

Усі обпалювальні печі будують з непрямим обігрівом через захисну стінку. Проте цього недостатньо, необхідно ввести в завантажувальну камеру пакувальний зернистий матеріал (засипку), який оберігав би вироби від згорання і деформації. Захисні стінки є своєрідним муфелем, в якому розміщуються обпалювані вироби і пакувальний матеріал, а зовні виробляється обігрів муфеля. Ці обставини зумовили конструкцію печі, яка у свою чергу зробила істотний вплив на розподіл температурного поля в об'ємі камери.

На рис. 1.2 представлена схема багатокамерної обпалювальної печі.



1-20 - камери; 21 - перекидний патрубок

Рисунок 1.2 – Схема багатокамерної печі

На цій схемі видно, що піч складається з великого числа окремих камер (20 камер), розташованих в безпосередній близькості одна до одної і сполучених між собою каналами для послідовного протікання газів з однієї камери в іншу.

Багатокамерні печі будуються з числом камер 30, у минулому будувалися двадцятикамерні печі. Проте залежно від виробничих умов число камер може бути збільшене. Печі працюють на газоподібному паливі, яке підводиться до кожної камери по газопроводах, розташованих по обидві сторони кожного ряду. За допомогою розводячої арматури газ може бути спрямований в будь-яку камеру. Уздовж печі по обох зовнішніх сторонах камер розташовані борони для виведення димових газів. Будь-яка камера за

допомогою спеціальних пристроїв може бути приєднана до борова. Боров з'єднаний з димарем для викиду димових газів в атмосферу.

Багатокамерні печі відносяться до печей безперервної дії. Уважно подивившись на схему, можна переконатися, що кожна камера працює по періодичному циклу, тільки піч в цілому працює по безперервному циклу.

Щоб представити роботу багатокамерної печі, скористаємося схемою печі, зображеної на рис. 1.2. Уявимо собі, що в якийсь момент газоподібне паливо підведене до камери 12, де газ змішується з повітрям і згорає. Отже, в камері 12 температура максимальна або, як то кажуть, камера знаходиться "на вогні". Продукти згорання газу не викидаються відразу в трубу, а заздалегідь проходять через ряд камер (камери 14 - 18) і, підігриваючи завантажені в них вироби, значно охолоджуються. Продукти згорання, що відходять, пропускають через таке число камер, щоб їх температура знизилася до 180...200°C і їх подальше використання стало недоцільним.

Необхідне для спалювання газу повітря проходить заздалегідь через ряд камер (камери 7 - 11), в яких знаходяться вже обпалені, але такі, що мають досить високу температуру вироби. Повітря, охолоджуючи вироби, само нагрівається і поступає в камеру випалення (камера 12) при температурі 600...800°C.

З описаного виходить, що камери з 7 по 18 знаходяться в системі випалення і охолодження, а інші камери розвантажуються, завантажуються або ремонтуються.

Після закінчення випалення в камері 12 в неї припиняється подача газу і вона перестає бути вогневою, а живлення газом переводиться на камеру 13, яка стає вогневою. При цьому камера 7 буде відключена, оскільки вона досить охолоджена, і поставлена під розвантаження, а камера 19, тільки що завантажена, буде підключена на підігрівання (у систему випалення). Разом з цим пристрої для приєднання печі до борова будуть переведені з 18 камери на 19. Ці операції проводяться по замкнутому циклу.

Таким чином, в багатоканерних печах використовується тепло продуктів спалювання палива, що відходять, і тепло остигаючих виробів, тому багатоканерні печі є рекуперативними. З описаного вище витікає також, що виробни знаходяться увесь час в стані спокою, а пересуваються з камери в камеру по ходу випалення зони вогню, тому ці печі називають ще печами з рухливою зоною вогню.

У багатоканерних печах розрізняють три зони - підігрівання, випалення і охолодження. Протягом одного циклу, який триває чотири -шість тижнів, кожна камера послідовно проходить стадію попереднього нагріву, стадію випалення і нарешті, повільного охолодження повітрям. При великому числі камер печі може працювати одночасно на двох і більше "вогнях". Наприклад, якщо піч складається з 30 камер, то при роботі "на двох вогнях" кожна обпалювальна система складається з 15 камер. Отже, в кожній системі є камери, що знаходяться і на підігріванні, і на випаленні, і на охолодженні. В цьому випадку треба строго дотримуватися синхронного пересування вогневої камери і усіх операцій в системах. Продуктивність печі при роботі на двох вогнях відповідно зростає.

Продуктивність багатоканерної печі визначається по наступній формулі (для одного вогню) :

$$Q = 24 (q/t), \quad (1.1)$$

де Q - продуктивність печі, т/доб;

q - завантаження однієї камери, т;

t - час знаходження камери на випаленні ("темп вогню"), год.

"Темп вогню" визначається діленням тривалості випалення в одній камері (режим випалення), вираженою в годинах, на число камер, що знаходяться на підігріванні і вогні. Цією ж формулою користуються при

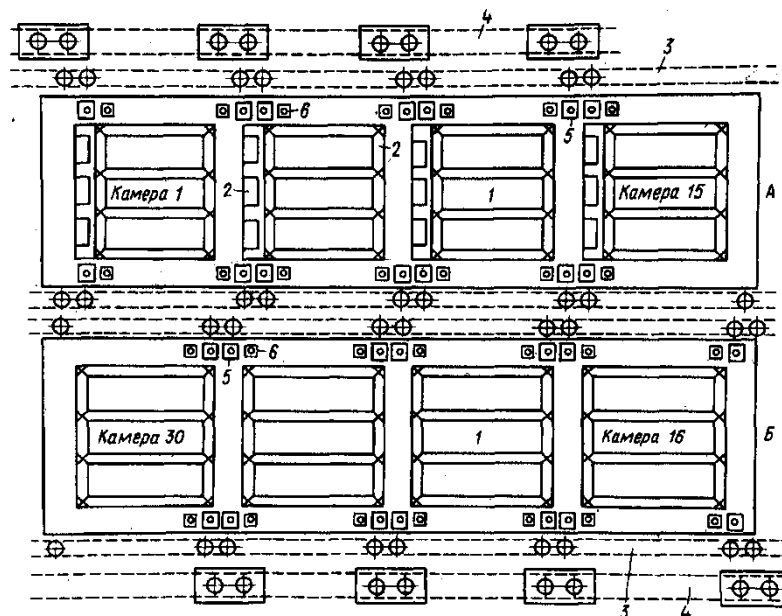
визначенні продуктивності печі, що працює на двох або трьох вогнях, тільки кінцевий результат множиться на число "вогнів".

У електродній промисловості застосовуються обпалювальні печі двох видів - склепінні і безсклепінні. Найбільшого поширення набули склепінні печі.

Склепінні багатокамерні печі часто називають закритими на відміну від безсклепінних печей, які називають відкритими. Піч на усю висоту заглиблена в ґрунт. Для зручності обслуговування печі обладнують знімними склепами.

Основним елементом закритої обпалювальної печі, так само як і всякій багатокамерній печі, являється камера. У печі окремі камери сполучені між собою каналами, через які протікають газоподібні продукти і повітря, а також пристроями для виведення димових газів в трубу.

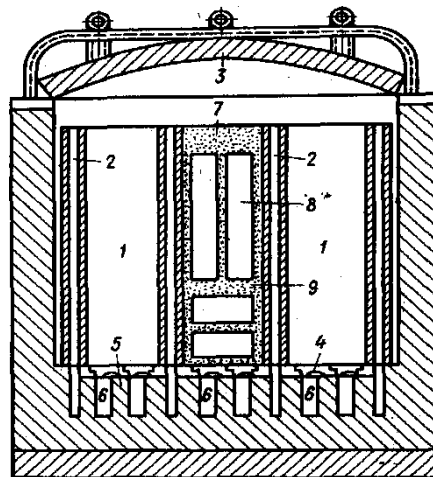
На рис. 1.3 показаний план обпалювальної печі, в якій умовно приведено дві характерні конструкції камер.



1 - муфель; 2 - вогнева шахта; 3 - газопровід; 4 - димовий бороз; 5 - газовий канал; 6 – воздуховод

Рисунок 1.3 – Багатокамерна піч зі знімним зведенням

Верхній ряд А відповідає печам, у яких є вогневі колодязі (шахти) 2; камери нижнього ряду Б не мають цих колодязів, вони винесені в простінок. Нині рідко можна зустріти печі з вогневими колодязями; вони перебудовані за типом камер Б. Кожна камера складається з камери, в яку завантажуються обпалювані матеріали, бічних стін і простінки, по якій камера граничить з сусідньою. Камера розділена на три або шість муфелів (касет), розміри яких визначаються розмірами обпалюваних виробів (рис. 1.4).



1 - муфель; 2 - нагрівальні канали; 3 - знімне склепіння; 4 - подина муфеля; 5 - стовпчики для подини; 6 - підподовий простір; 7 - завантажений муфель; 8 - електрод; 9 – засипка

Рисунок 1.4 – Подовжній розріз по камері обпалювальної печі

Стінки муфелів викладаються з фасонної шамотної цеглини з каналами 2 усередині, через яких протікають гарячі гази, нагріваючи стінку і завантажені вироби (електроди) 8. Стінки і подина 4 муфелів споруджуються на цегляних стовпчиках 5, складених на фундаментній плиті. Стовпчики розташовані таким чином, що забезпечують міцну основу для муфелів і створюють умови для вільного проходження газів під подиною камери. Згори камера накривається знімним склепінням 3. Знімне склепіння складається з жорсткого металевого каркаса, викладеного для зменшення маси і теплових втрат легковагою вогнетривкою фасонною цеглиною.

На рис. 1.5 показаний розріз розділового простінка для камер, в яких вогневі шахти винесені в камеру, а на рис. 1.6 цих каналів розміщені в самому простінку.

Видалення вогневих камер в простінок збільшує корисну місткість печі. Простінки з одного боку сполучені трьома невеликими боровами 1 з сусідньою камерою, а з іншої - глуха стінка (рис. 1.6) або розташовуються сполучні канали з вогневими шахтами.

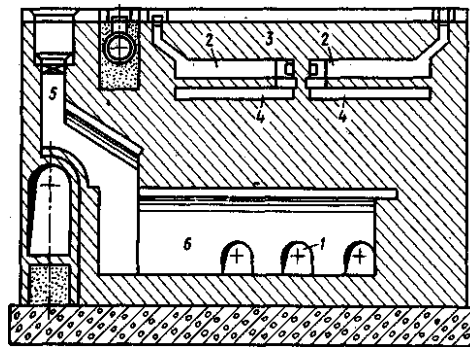
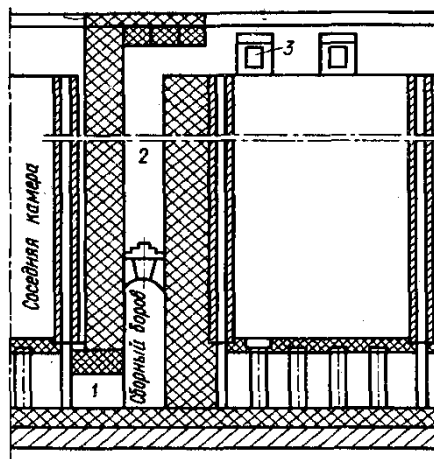


Рисунок 1.5 – Розділюючий простінок камери з вогневою шахтою



1 - сполучний боров; 2 - канал для повітря і газів, замінюючий вогневу шахту; 3 – палик

Рисунок 1.6 – Розділюючий простінок камери без вогневої шахти

У простінку (рис. 1.5) є канали, за допомогою яких продукти згорання, що відходять, можуть змінювати свій напрям, тобто прямувати не в сусідню камеру, а в димовий боров. Для цієї мети уздовж розподільного простінка

розташовується збірний боров 6, в який газу поступають з сусідньої камери через три сполучних борова 1, а потім через похилий боров 5 у вертикальну шахту. Вертикальна шахта може з'єднуватися з димовим бором за допомогою переносного патрубку. Для того, щоб направити димові газу в трубу, необхідно камеру приєднати до димового борова, а вогневі шахти закрити шиберами.

Простінок для камер з виносними шахтами має додаткові пристрої, як це показано на рис. 1.5. У ній розташовані газові канали 2, пальники 3 і канали 4 для підведення холодного повітря до пальників. Ці пристрої були потрібні для того, щоб підвести газ до середньої вогневої шахти. Крайні вогневі шахти живляться газом через пальники, розташовані в бічних стінках. Пальники вбудовуються у верхній частині шахт. Повітря для горіння поступає з сусідньої камери через сполучний боров і піднімається вгору по шахті в зону розташування пальників.

Рух газів в цій конструкції камери здійснюється таким чином. Гарячі газу, що утворюються в результаті згорання опалювального газу у вогневих шахтах, прямують під зведення печі, потім проходять вертикальні отвори в стінках муфелів, віддаючи тепло (через стінку муфеля) завантаженим виробам. Далі газу, змішуючись під подиною камери, через сполучні борони поступають у вогневі шахти сусідньої камери і так далі, поки їх не відведуть в димовий боров.

Ліквідація вогневих шахт привела до спрощення конструкції простінка, але одночасно викликала деякі зміни конструкції камери, що відносяться до опалювальної системи. Відмінність полягає в тому, що вогневі шахти перенесені в простінок. Їх тепер уже не можна назвати вогневими шахтами, оскільки паливним простором став увесь підсклепінний простір камери, а вони стали каналами, через які рухаються продукти згорання і повітря. По суті, вони стали продовженням сполучних боронів.

Розташування пальників також змінилося (див. рис. 1.4). Вони тепер розташовані уздовж бічної стінки з обох боків камери. Газ поступає через ці

пальники, а необхідне повітря - з отворів, розташованих в простінку. Процес спалювання газу відбувається під склепінням, а продукти згорання розподіляються по вертикальних каналах, що обігрівають стінки муфелів.

Пальники, вживані в обпалювальних печах, є шамотною пластиною з щілинами (щілиновидні пальники), через які широким фронтом в піч поступає газ. Щілиновидні пальники закладаються в кладку у кінці отвору, через який газ вводиться в піч. Газовими пальниками називають пристосування для підготовки і подачі в камеру згорання газо-повітряної суміші. У обпалювальних печах електродної промисловості газ і повітря вводяться окремо. Змішування газу і повітря відбувається в процесі горіння в підсклепінному просторі. Наявність великого паливного об'єму (підсклепінний простір) дозволяє раціонально використовувати такий спосіб спалювання газу, а можливість створення довгого факела більш рівномірно обігрівати камери по висоті.

У промисловій практиці в кожній камері влаштовується по три-пять колодязів, через які поступає повітря з сусідньої камери.

Уздовж подовжніх стін влаштовується до 12 пальників. Таке велике число пальників забезпечує рівномірне спалювання газу в об'ємі камери. Чим менше пальників, тим менш ідеальне змішування газу і повітря відбувається в підсклепінному просторі камери. Іноді пальники розташовують в склепінні камери, число яких досягає чотирьох. При такому розподілі газового і повітряного потоків здійснюється рівномірний розподіл продуктів горіння по усіх муфельних каналах. Зменшення числа пальників і каналів для повітря знижуватиме рівномірний розподіл продуктів згорання по муфельних каналах.

Найбільш серйозний недолік багатокамерної склепінної печі - обмежена можливість регулювання кількості теплоносія, що вводиться в піч. У печі постійно відчувається недолік теплоносія, тому камери, що знаходяться далеко від вогневої, недоотримують тепло, що позначається на уповільненні підйому в них температури.

1.6 Значення засипки для процесу випалу

Для оберігання випалюються, електродів від деформації і згоряння їх пересипають зернистими матеріалами, які називають засипанням.

У електродної промисловості засипку відносять до розряду допоміжних. Звідси історично склалося ставлення технологічної служби заводів до засипання. Вважають, що вона не робить впливу на перебіг основних процесів при випалюванні електродів. Тому при виборі матеріалів і способів підготовки засипки керуються міркуваннями дешевизни, зручності та місцевими умовами, не враховуючи значення технологічного боку і навіть економіки процесу.

У випалювальних печах нагрів випалюються, електродних матеріалів проводиться побічно, тобто через стінку муфеля. Отже, при випалюванні тепло від газового потоку передається стінці муфеля, потім засипці і нарешті електроду. Виходить, що в залежності від властивостей засипки, створюються умови для більш активної або навпаки - неактивній передачі тепла обпалювати виробу. Засипка, що володіє кращою теплопровідністю, завжди призводить до кращих результатів випалу.

Роль засипки не обмежується захисними функціями; вона має великий вплив на склад і тиск газової атмосфери в печі. Виділяються летючі речовини - продукти коксування пеку - частково адсорбуються засипанням, а частково піролізу, і піролітичний вуглець тонким шаром відкладається на поверхні зерен засипки. Тому залежно від її адсорбційних властивостей може змінюватися газова атмосфера в печі, що в свою чергу впливає на властивості опалюваних виробів.

Адсорбційні властивості залежать від природи засипки та її дисперсності (табл. 1.2). Чим активніше в адсорбційному відношенні засипка, чим вище її дисперсність, тим більше поглинається газів з атмосфери печі, тим більше втрати маси виробами при спіканні.

Наприклад, дослідженнями доведено, що застосування засипки з активованого вугілля показало погіршення якості обпалених виробів через зниження коксового числа пеку.

Таблиця 1.2 - Властивості електродних виробів, обпалених в засипці з різних матеріалів

Матеріал засипки	Властивості засипки		Вихід кокса зі зв'язуючого, %	Об'ємна маса, %	Питоме електроопір, Ом·м	Опір на стиск, МПа
	Розмір фракції, мм	Абсорбаційна властивість, мг/г				
Кварцевий пісок	До 1,5	6,0	63	1,58	36	68,7
Термоантрацит	0,5 – 6	6,9	61	1,55	41	65,7
	0,5 – 2	7,3	62	1,56	40	67,0
Кокс каменновугільний	0,5 – 6	11,0	59	1,50	49	53,9
	0,5 – 2	11,7	60	1,53	42	60,1
Кокс каменновугільний графітований	0,5 – 6	14,6	50	1,46	48	49,0
	0,5 – 2	21,3	51	1,48	47	50,5
сажа	-	23,0	46	1,26	65	12,4

Були досліджені: активований вугілля, лінійний кокс і пісок. Гранулометричний склад цих матеріалів був однаковий. Вихід коксу отриманий наступний: для активованого вугілля 59,3%; для ливарного коксу 60,7%; для піску 61,3%. Теплопровідність цих матеріалів різна, тому дані слід розглядати як сумарний ефект.

Для приготування засипки можуть бути використані різні матеріали (табл. 1.3), проте всі вони повинні відповідати таким вимогам: не повинні плавитися і спікатися при температурах випалу електродів; не повинні вступати в хімічні сполуки як з обпалюваними електродами, так і з вогнетривами, з яких складена піч [1]. Необхідно віддати перевагу тим матеріалам, які володіють кращою теплопровідністю. Для того щоб були відтворені результати при випалюванні електродів, необхідно застосовувати

засипку постійної якості як за матеріалом, так і за гранулометричним складом.

Таблиця 1.3 - Характеристика матеріалів, які можуть бути використані для виготовлення засипки

матеріал	Наспна маса, кг/м ³	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/К
Кокс металургійний	-	0,06 – 0,12	0,88
Антрацит прокалений	600	0,18	0,92
Шлак котельний	1000	0,29	0,75
Шлак доменний гранульований	500	0,14	0,75
пісок	1900	2,3	3,77

Оскільки в процесі випалу мають місце втрати засипки, необхідно виробляти її заповнення завжди в однаковій пропорції і рівномірному перемішуванні з оборотною частиною засипки. Краще якщо втрати засипки будуть компенсуватися завантаженням у верхні горизонти муфелів, де свіжа засипка не контактуватиме з обпалювати електродами.

При проектуванні та будівництві цехів випалу повинні створюватися спеціальні установки, що гарантують постійність властивостей засипки. (Найкращим матеріалом для засипки є крупнозернистий річковий пісок. Як видно з табл. 1.2 і 1.3, він володіє найбільшою теплопровідністю з усіх можливих до використання матеріалів. Пісок володіє і найменшою адсорбційною здатністю. Він порівняно дешевий і не вимагає попередньої обробки. Але в чистому вигляді його застосовувати не можна, тому що він володіє великою плинністю і, через нещільність в кладці печі витікає в подподоше простір.

Щоб уникнути цього, до піску слід подшихтовувати прожарений антрацит відповідної грануляції у співвідношенні 1:1.

На наших електродних заводах досить часто в якості матеріалу для засипки використовується металургійний кокс. Це найгірший вид засипки, тому що він має дуже низьку теплопровідність, підвищеної адсорбційної здатності, а також великою схильністю до спікливості і прикоксуванню до тіла випалювального електрода.

Треба уникати присутності тонких фракцій (дрібніше 0,5 мм), щоб не збільшувати сорбційну поверхню засипки, а також занадто великих зерен (крупніше 6 мм), тому що вони можуть викликати зовнішні дефекти в випалюються, електродах.

Найбільш ґрунтовні дослідження засипки та її впливу на властивості обпалених електродів були виконані співробітниками ГосНШЕП [12].

З даних табл. 1.4 слід, що чим вище адсорбційні властивості засипки, тим нижче вихід коксу з сполучного при випалюванні електродів. Великий вплив на властивості обпалених електродів надає природа матеріалу, з якого готується засипка. Хороші результати отримані при застосуванні засипки з піску і антрациту, що підтверджують дані наших досліджень.

При експлуатації випалювальних печей доводиться стикатися з вельми небажаними явищами - спікання засипки і прикоксування її до тіла електрода. Спікання засипки відбувається навіть в деякому віддаленні від випалювального електрода. Видалення спеченого засипки з камер випалювальних печей - дуже трудомістка і дорога операція, тому що в цьому випадку виключається застосування пневматичного видалення засипки. Очищення поверхні електрода від прикоксувавшихся засипки також трудомістка операція.

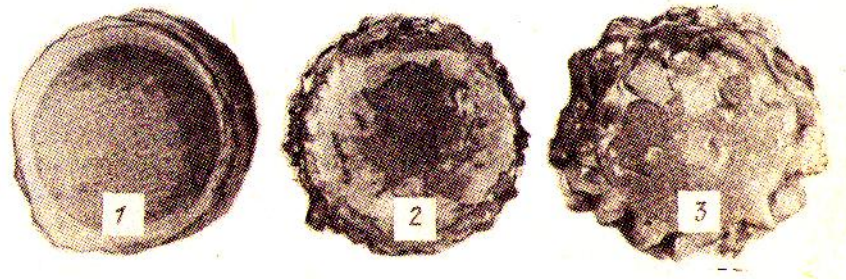
Таблиця 1.4- Вплив гранулометричного складу засипки на вихід коксового залишку при випалюванні електродів [12]

Розмір фракції засипки, мм	Абсорбаційна властивість, мг/г			Вихід коксового залишку зі зв'язуючого при випаленні, %		
	прокалений	Графітований	Оборот	прокалений	Графітований	Оборот
	каменувий - гільний кокс	каменувий гільний кокс	на засипка	каменувий - гільний кокс	каменувий гільний кокс	на засипка
-6+4	5,00	16,5	-	16,4	54,7	-
-4+2	5,37	17,2	15,44	63,0	54,0	58,8
-2+0,5	6,62	18,37	15,87	-	46,6	55,2
-0,5	11,50	19,31	17,25	52,2	41,9	54,2

На підставі досліджень були зроблені висновки, що спікання засипки відбувається в результаті утворення піролітичного вуглецю з газової атмосфери. Але навряд чи піролітичний вуглець може так сильно спікати засипку, як це спостерігається на практиці.

У роботі [13] причини, що викликають прикоксване засипки до тіла випалювального електрода, були пояснені наступним чином при нагріванні заготовок сполучна розм'якшується і в рідко-текучий стан, в результаті чого змочуються здатність зростає. Зерна засипки, оточуючі тіло заготовки, впроваджуються на деяку глибину в тіло електрода і спікається з його основною масою.

У результаті було виведено припущення, чим дрібніше засипка, тим слабкіше ступінь прикоксування (рис. 1.5). Однак автори не пояснили, чому шар, прикоксувавшийся до тіла електрода, може досягнень гать від 1 до 5 см.



1 - 0-0,5; 2 - 3-4; 3 - 4-8

Рисунок 1.7 - Ступінь прикоксовування засипки в залежності від її розмірів, мм

Найбільш достовірний механізм прикоксовування засипки, висловлений Е.А.Шуваєвої [14] і [Окада] 15, що полягає в тому, що в результаті нагрівання електрода відбувається витіснення пеку назовні, що і викликає ефект прикоксовування засипки. Ними ж висловлені рекомендації для зниження цього ефекту - слід зменшити кількість сполучних у електродної шихті. На рис.1.8 показана залежність кількості прикоксовуючої засипки до тіла електрода від змісту сполучного в електродної шихті. При вмісті пеку в шихті 18-20% ефект прикоксовування майже зникає.

На закінчення слід сказати, що в промисловій практиці незаслужено мало приділяється уваги такому важливому елементу технології випалу електродів, як засипочні матеріали. Зовсім не враховується вплив засипки на властивості обпаленої електрода і не вживаються заходи до придбання таких засипочних матеріалів, які гарантують отримання електродів кращих якісних характеристик. Необхідно ретельно контролювати дотримання сталості гранулометричного складу та вихідної сировини для приготування засипки. Вже на стадії проектування заводу повинні закладатися умови, що забезпечують приготування засипки хорошої якості.

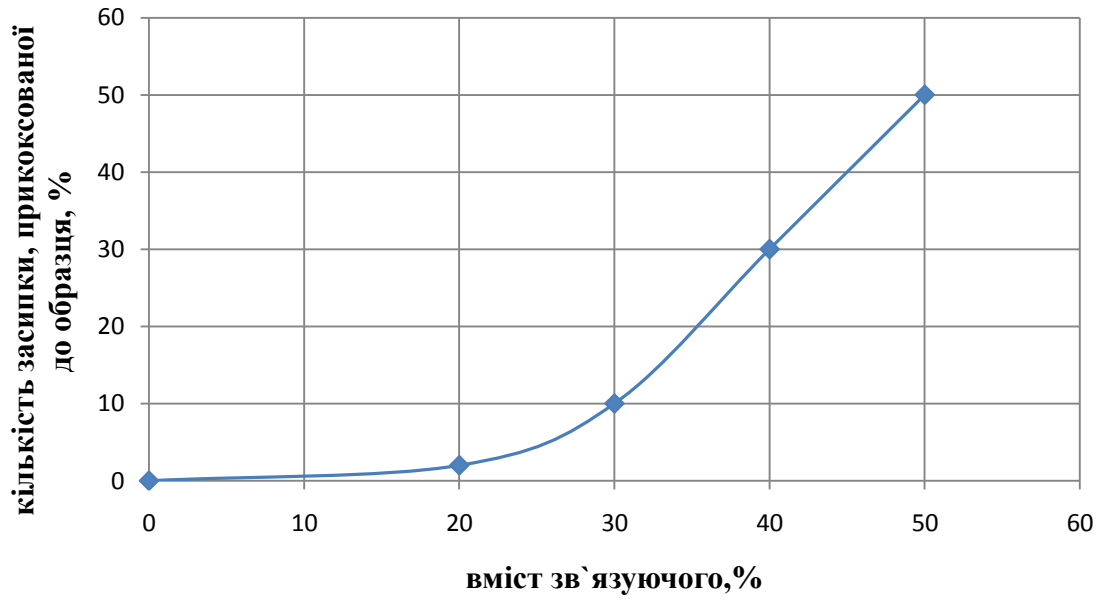


Рисунок 1.8 - Кількість прикокованої засипання в залежності від вмісту сполучного в масі

2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК

2.1 Схема завантаження заготівель в печі

Розміщення заготівель в печах (камерах) випалення виробляють за схемами, заснованими, як правило, на наступних вимогах:

- оптимальні співвідношення робочих розмірів камер (касет) і заготівель;
- облік температурних можливостей печі (нерівномірність температурного поля в об'ємі камер);
- забезпечення максимального коефіцієнта використання об'єму камер і знімання обпаленої продукції;
- забезпечення нормальних умов обслуговування камер засобами завантаження-вивантаження заготівель;
- забезпечення необхідних виходів придатної продукції і якості.

Внаслідок підвищеної нерівномірності температур по висоті камер багатоканерних печей великі електродні заготівлі діаметром більш 400мм, як чутливіші до перепаду температур, прийнято завантажувати в нижню частину камер. Заготівлі середніх діаметрів (перерізом 220...400мм) обпалюють по усій висоті камер. І, нарешті, продукцію малих розмірів (діаметром або стороною менш 200мм) щоб уникнути можливого викривлення і деформації під тяжкістю верхніх рядів заготівель, а також із-за підвищеної трудомісткості їх завантаження і вивантаження обпалюють тільки у верхніх рядах камер. При цьому вертикальні ряди заготівель завантажують в певному порядку. Щоб засипочний матеріал не припікався, на подину печі насипають шар деревної тирси і потім шар засипки. Її товщина обумовлена габаритами завантажуваних заготівель (вона тим більше, чим більше маса і розміри заготівель), властивостями засипки.

Подинна подушка повинна виключати деформацію (обпливання) торців заготівель і термічний удар на них з боку подини.

Встановлений на подинну подушку ряд заготівель пересипається засипкою; згори на нього насипається шар засипки, що запобігає спіканню заготівель верхнього і нижнього рядів і деформацію нижніх торців заготівель верхнього ряду.

Останні, як і заготівлі нижнього ряду, упаковуються засипним матеріалом так, щоб над заготівлями утворилася захисна подушка завтовшки не менше 250...300 мм. Основна роль верхньої засипної подушки - захист заготівель від окислення і термічного удару при прямому контакті з теплоносієм в підсклепінному просторі. Схема розставлення заготівель в горизонтальних рядах (у верхньому і нижньому) лімітується можливістю термічного удару від гріючих стінок, що може привести до деформації і розтріскування заготівель і деформації заготівель з утворенням пролежнів на них при щільному розставленні заготівель між собою.

При цій відстані від стінок касети до заготівель і між заготівлями мають бути пропорційні їх горизонтальним розмірам. Недотримання схем, порядку, умов завантаження і упаковки заготівель в камерах призводить до браку по деформації і тріщинам. Виникненню браку сприяють не лише порушення схеми розставлення і упаковки заготівель, але і завантаження заготівель в гарячу камеру, застосування гарячої і вологої засипки і так далі

Важливу роль в забезпеченні необхідних умов випалення електродної продукції грає засипний матеріал.

Засипний матеріал при випаленні повинен перешкоджати деформації заготівель при осіданні їх в період в'язко-пластичного стану і викривленню їх, рівномірно підводити тепло до заготівель, оберігати заготівлі від окислення.

Відповідно до призначення засипні матеріали повинні мати теплопровідність, певні пружні властивості, оптимальну адсорбційну здатність до єднальної речовини, газопроникність, бути хімічно інертними по

відношенню до заготівель. В основному як засипка при упаковці електродних заготівель в печах випалення використовують сипкі вуглецеві матеріали: прожарений або просушений кам'яновугільний кокс (коксова дрібниця), прожарений антрацит, повернення з печей графітації, оборотний засипний матеріал, неодноразово вже використаний.

Властивості засипних матеріалів визначаються як властивостями самого матеріалу, так і гранулометричним складом (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Властивості засипного матеріалів

Засипний матеріал	Щільність, кг/м ³	Стираність, %	Коефіцієнт міцності часток, %
Кварцевий пісок	1400	-	-
Термоантрацит	1846	3,80	59,0
Кам'яновугільний кокс з температурною обробкою: 1300°C	1893	3,20	57,0
1800°C	2138	8,80	54,2
2500°C	2180	9,20	50,0
Оборотна засипка на основі кам'яновугільного прожареного і графітованого коксу	2035	9,0	64,0

Роль засипки не обмежується захисними функціями. Вона чинить великий вплив на склад і тиск в газовій атмосфері печі. Летючі речовини, що виділяються, це продукти коксування пека - частково абсорбуються засипкою, а частково піролизуються, і піролітичний вуглець тонким шаром відкладається на поверхні зерен засипки. Тому залежно від її адсорбуючих властивостей може змінюватися газова атмосфера в печі, що у свою чергу впливає на властивості опалюваних виробів.

2.2 Температурний режим випалу електродів

У багатокамерних печах зі знімним склепінням виключена можливість безпосереднього вимірювання температури виробів, що випалюються. Спостереження за температурним режимом проводиться за показниками приладів, поміщених в газовому (під склепінням) просторі. Однак цей спосіб не дає чіткого уявлення про температуру виробу та швидкості поширення температури в окремих ділянках камери, завантаженої електродами. Це великий недолік, тому що технолог не має точних уявлень про процеси, в даний момент протікають в різних ділянках обсягу робочої камери.

Протягом багатьох років експлуатації випалювальних печей вважали, що температура у завантаженні синхронно зростає з температурою під склепінням печі, де встановлена термопара, відстаючи на деяку величину від досягнутої під склепінням температури. Однак багаторічні спостереження за роботою промислових печей і накопичений величезний досвід експлуатації печей викликали сумніви в правильності цього положення. Ці обставини послужили підставою для проведення балансових випробувань роботи випалювальних печей.

Дослідження температурних режимів протікали наступним чином. У камері випалювальної печі на різних рівнях і глибині були встановлені термопари. Основна ідея полягала в тому, щоб зареєструвати співвідношення температурних залежностей підсклепінного простору і різних ділянок камери, завантаженої електродами. Дослідженню були піддані режими різної тривалості - від 72 до 420 ч. Це час, який витрачається на підйом температури до 1300°C під склепінням печі. Час охолодження не регламентувать, але воно не було коротше 5 діб.

На рис. 2.1 і 2.2 наведені дані для режимів тривалістю 72 і 420 год; проміжні режими опущені. Для спрощення наведено. Надання тільки трьох термопар: крива 1 показує зміну температури під склепінням печі в газовому середовищі; крива 2 демонструє показання термопари, поміщеної в центрі

завантаженого муфеля на глибині 0,5 м від верху завантаження; крива 3 - свідчення терморпари, поміщеної в середину муфеля на глибині 0,6 м від поду муфеля.

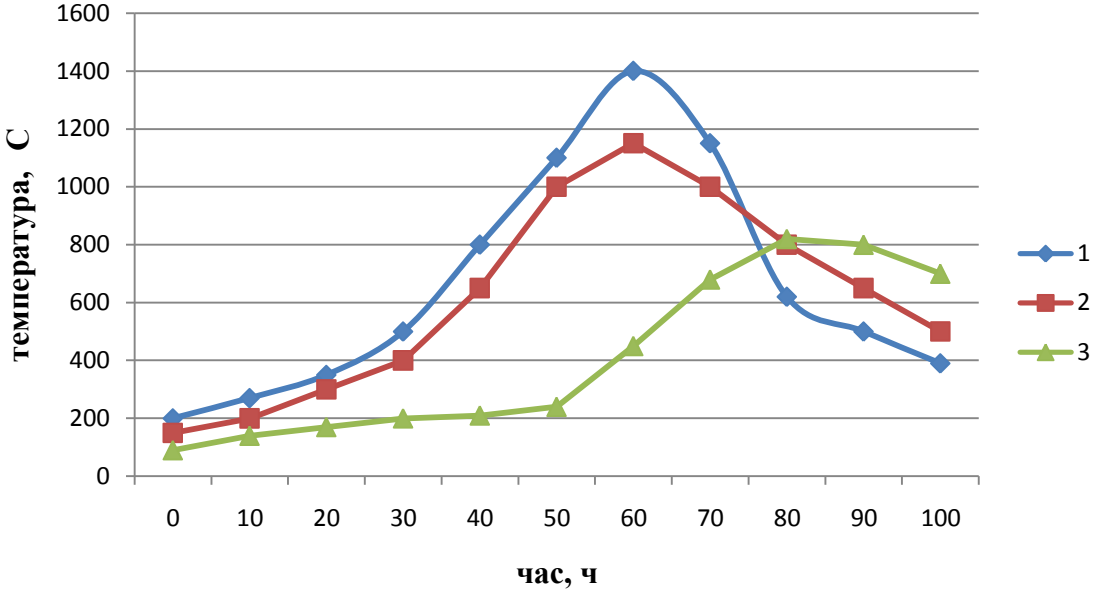


Рисунок 2.1 - Температурний режим випалу тривалістю 72 год

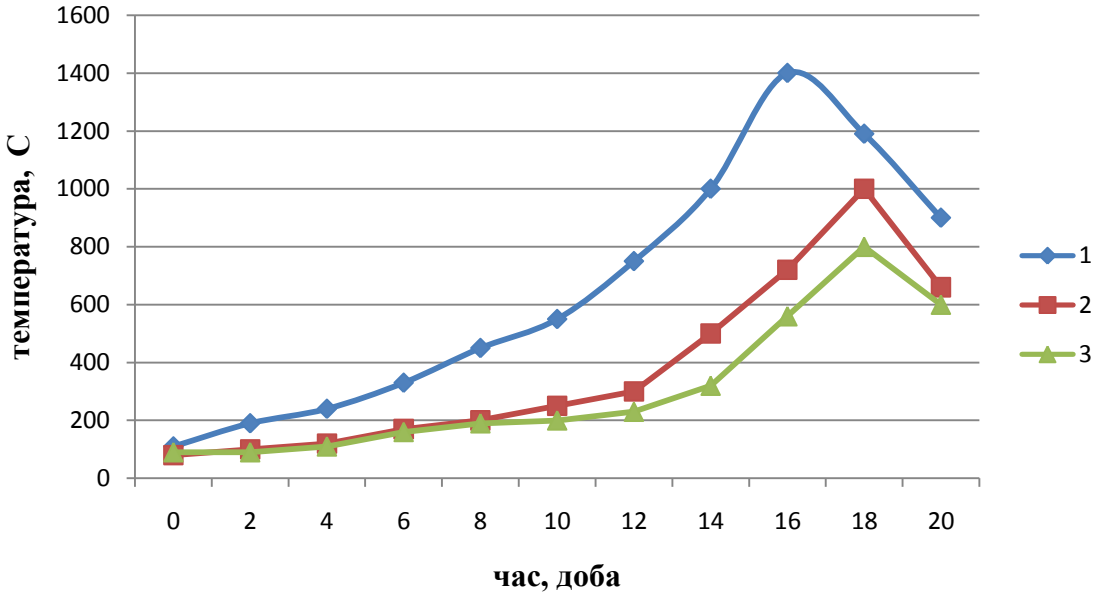


Рисунок 2.2 - Температурний режим випалу тривалістю 420 год

Отримані результати показали, що неможливо встановити залежність між температурним режимом підсклепінного простору і температурним режимом будь-якої точки завантаженого муфеля. Вони розрізняються за абсолютно досягнутим температур і за швидкістю підйому температури! в різних температурних інтервалах. Останнє особливо важливо, так як впливає на пірогенні процеси, що протікають у завантаженні, і ряд інших явищ (наприклад, міграція сполучного).

Максимальна температура виробів, що випалюються в залежності від місця знаходження в печі змінюється в межах 800...1000°C.

Швидкості підйому температури в різних температурних інтервалах коливаються значно. Нижче наводяться відповідні дані:

Таблиця 2.2 - Швидкості підйому температури в різних температурних інтервалах

А. Тривалість підйому температури 72ч. (рис. 2.1)			
Тривалість підйому температури	Крива 1	Крива 2	Крива 3
От 200 до 800°C, ч	40	33	25
От 300 до 500°C, ч	13	12	8
Максимально досягнута температура, °C	1360	1100	820
Б. Тривалість підвищення температури 420 ч. (рис. 2.2)			
Тривалість підвищення температури	Кривая 1	Кривая 2	Кривая 3
От 200 до 800°C	77	206	230
От 300 до 500°C	92	96	68
До 250°C	120	216	264
Максимально досягнута температура, °C	1400	1140	820

Максимально досягнута температура в випалюються, виробках зменшується від верху камери до низу її. Це закономірно і пояснюється тим, що при русі газового потоку зверху вниз гарячі гази протягом усього свого шляху охолоджуються і нижні горизонти камери отримують меншу кількість тепла, ніж верхні.

Аналізуючи отримані результати температурних режимів при балансових випробуваннях, що різко відрізняються один від іншого тривалістю, приходимо до наступних висновків:

1) максимальна температура, досягнута в завантаженні, пропорційна максимальній температурі в газовому середовищі і не залежить від тривалості підйому температури;

2) зміщення у часі однакових температур, досягнутих у об'ємі камери і газовому середовищі, тим більше, чим повільніше режим випалу;

3) різниця максимально досягнутих температур в завантаженні становить 250-300°C, а різниця між максимальною температурою газового простору і температурами у завантаженні становить 300...500°C;

4) швидкість підйому температури в різних ділянках камери неоднакова і різко відрізняється від швидкості підйому температури в газовому просторі, причому встановити закономірності співвідношення швидкостей підйому температури в різних ділянках камери не представляється можливим.

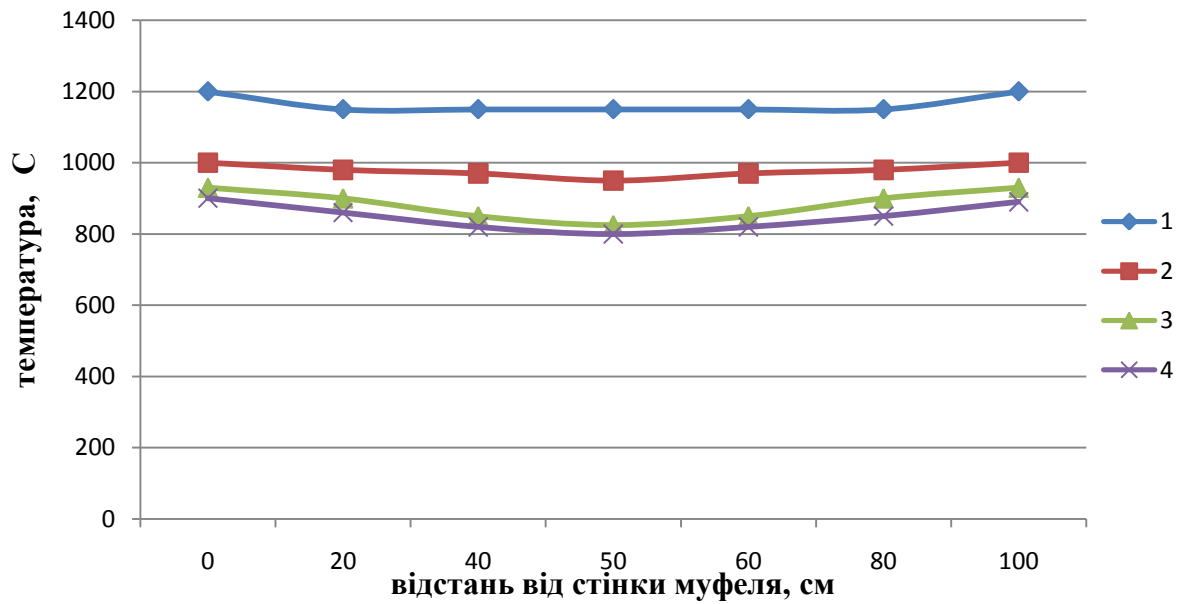
Констатуючи характерний розподіл температурних полів у випалювальної камері, слід зазначити, що воно закономірно для цієї конструкції випалювальної печі і технологічними засобами неможливо як зменшити перепад температур в камері, так і змінити співвідношення швидкостей підйому температур в завантаженні камери.

Слід відзначити також, що неможливо вказати крапку в камері печі, вимірювання температури в якій дозволило б отримувати точну інформацію про процеси, що протікають в обсязі всієї камери. Тому спостереження за режимом по термопарі, вміщеній в підсклепінному газовому просторі (так

само як і в іншій точці камери), можна виробляти, але реєстрації тільки однієї температури для режиму випалу зовсім недостатньо.

Безсумнівний інтерес представляє поширення температур по перетину муфеля. У електродної промисловості використовуються муфелі різних перетинів, найбільше число печей мають муфелі шириною 960 мм. На рис. 2.3 наводиться розподіл температур по перетину для різних горизонтів по висоті муфеля. Для верхніх горизонтів різниця між центром і периферією становить близько 50°C , для нижніх - ця різниця зростає і досягає 100°C .

Необхідно зробити деякі зауваження щодо характеру температурної кривої. По-перше, характерним є надзвичайно повільний підйом температури при низьких температурах (до 250°C) і різке прискорення підйому температур вище $300\text{...}350^{\circ}\text{C}$. Причому оператор дуже обмежений у своїх можливостях впливати як на прискорення підйому температури (при низьких температурах), так і на швидкість при більш високих температурах, як це вимагають технологічні та економічні міркування. Особливо шкідливий вплив оказується надзвичайно тривалий час знаходження випалюються, електродів до 250°C , тому що при цих температурах найбільш активно протікають процеси міграції сполучних, що призводить до погіршення якості продукції. По-друге, характерним є різкий перепад температури по висоті камери, в середньому $80\text{...}100^{\circ}\text{C}$ на один погонний метр висоти. З технологічної точки зору бажано мати найменше падіння температури по висоті муфеля.



1 - 0,5 м від верху; 2 - 1,5 м від верху;
3 - 2,0 м від верху; 4 - 0,6 м від подини.

Рисунок 2.3 - Розподіл температур по перетину муфеля

Звичайно, по шляху проходження газів матиме місце зниження температури, так як частина тепла віддається на нагрів стінок муфеля. Але зниження температури слід віднести до конструктивних недоліків печі. Як вже зазначалося вище, піч постійно відчуває недолік теплоносія, що й обумовлює настільки різке падіння температури по висоті муфеля. Можна довести, що градієнт температури вздовж стінки муфеля залежить від кількості теплоносія і знаходиться в обернено пропорційній залежності від маси теплоносія.

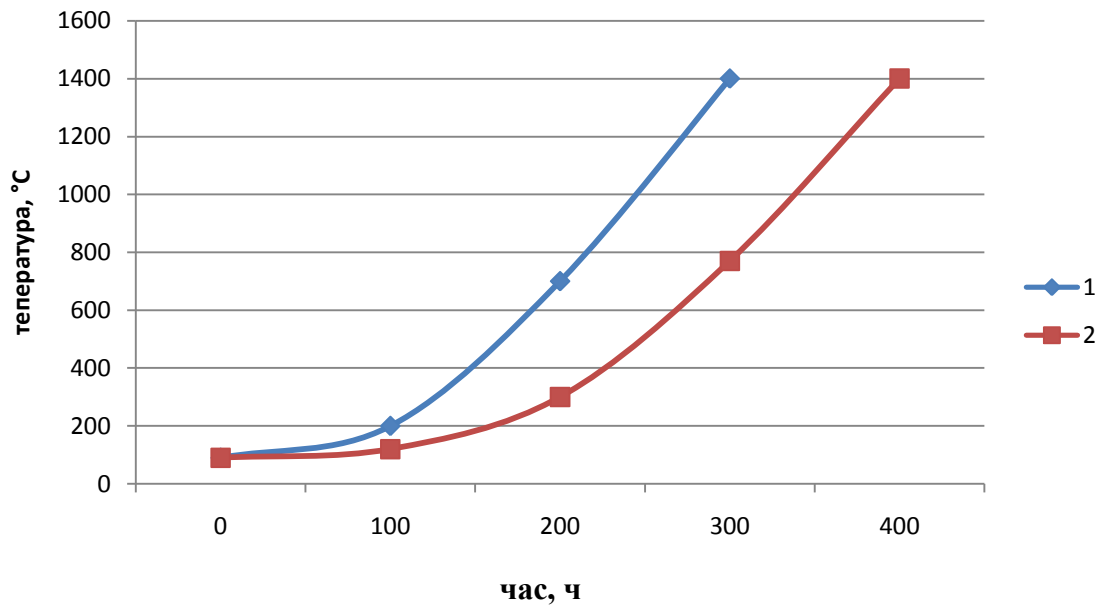
Слід зазначити, що піч володіє рядом конструктивних недоліків, головним з яких є відсутність засобів регулювання примусової подачі повітря для спалювання газу.

Режим випалу електродних матеріалів у печах з газовим опаленням залежить від ряду причин, обумовлених температурним режимом, тяговими зусиллями, кількістю теплоносія, технічним станом печі, а для

багатокамерних печей - числом камер, що знаходяться в системі випалу, і регламентом відключення і підключення камер.

Характер температурного режиму уточнюється під час попередніх них випробувань. Однак накопичений досвід дозволяє за допомогою розрахунків встановлювати температурні режими випалу того чи іншого виду виробів.

На рис. 2.4 наведено характерні режими випалу електродів. В основному на тривалість режиму впливають розміри випалюються, електродів. Для дрібних застосовують найбільш короткі режими (близько 200 год), а для великих - уповільнені режими (більше 400 год). На рис. 2.4 показана тільки частина кривої (нагрівання і випал) - керована частина. Частина кривої, відповідна охолодженню обпалених електродів - не відображено. При вивантаженні з печі відбувається природне охолодження електродів. При низьких температурах випалу залежність описується пологішою кривою, при високих температурах - крутіший. У даному випадку позначається на характері кривої вплив конструкції печі. На рис. 2.4 показано зміну температур в газовому просторі печі, оскільки виключена можливість вимірювання температури в випалюються, виробих. Розбіжності між швидкостями підйому температури, а також між максимальними температурами газового середовища і обпалюють виробами досягають великих величин і залежать від розмірів і конструкції печі.



1 - швидкий режим; 2 – повільний режим.

Рисунок 2.4 -Характерні температурні режими випалу електродів

Отже, вироби, що знаходяться в різних ділянках печі, обпікаються в різних умовах, головним чином, при неоднакових швидкостях підйому температури і мають різні кінцеві температури.

У печах періодичної дії і при невеликих розмірах робочого об'єму легше дотримувати заданий температурний режим, тоді як у багатокамерних печах, як правило, цього зробити не вдається.

Максимальна температура, до якої повинні обпалюватися вироби, залежить від розміру і типу їх. При випалюванні заготовок, які піддаються графітуванню, температура може бути знижена до 800°C. При випалюванні всіх інших виробів, для яких ця операція є заключною, температура повинна бути вище. Однак вище 1100°C температуру піднімати не доцільно, так як властивості електродів помітно не змінюються. Якщо температура в печі вимірюється в газовому просторі, то слід ввести відповідну поправку.

Максимально допустима температура залежить також від конструкції печі і якості вогнетривів, з яких вона складена. У камерних печах, складених

з шамотового вогнетриву, температура визначається якістю шамоту і може досягати 1450°C. Для збільшення терміну служби вогнетривів температура робочого простору печі звичайно підтримується не вище 1350°C.

Максимальна температура, відповідна заданому режиму, повинна бути досягнута не тільки на поверхні виробу, але і в його внутрішніх шарах. Вирівнювання температури, що відбувається завдяки теплопровідності, займає певний час (витримка при максимальній температурі), яке тим більше, чим більше розміри випалюваних виробів.

Тривалість випалу пропорційна розмірам і щільності виробів, що випалюються. Однак вона не може бути коротшим, ніж це визначається теоретичними міркуваннями. У практиці випал виробів середнього розміру триває близько 15 діб, а тривалість випалу електродів великих розмірів може досягати 30 діб. Для деяких виробів дрібних розмірів тривалість випалу скорочується до 100 ч.

Завантажені вироби нагріваються через стінку муфеля. Гарячі газы, стикаючись з цими стінками, віддають їм частину свого тепла і нагрівають їх. Від швидкості руху газів залежить кількість тепла, що передається через стінку завантаженим виробам. Тому для правильного ведення режиму випалу температурна крива повинна бути доповнена даними тягових умов (розріджень) по камерах, що визначає швидкість руху газів.

На швидкість руху і використання гарячих газів в печі впливає число камер, включених в систему вогню, а також регламент підключення і відключення камер. Всі ці операції повинні відбуватися таким чином, щоб забезпечити постійну і максимальну віддачу тепла від газів до обпикає виробам. Технічний стан печі (щільність кладки, установка склепінь і ін. впливає на підсосі холодного повітря в піч, що несприятливо позначається на ефективності використання тепла.

У процесі випалу спресовані заготівлі поступово нагрівають до 800...1100°C, а потім поступово охолоджують.

При нагріванні заготовок до 200...250°C відбувається розм'якшення пеку, заготовки стають неміцними. Збільшується обсяг заготовок, причому зменшення маси не відбувається. При цих температурах пек в порах електрода перерозподіляється, що викликається капілярними силами. Одночасно починаються міграційні процеси зв'язуючого. При подальшому нагріванні розвиток міграційних процесів триває, а також починається помітне виділення летючих речовин. Воно тісно пов'язане з хімічним розкладанням сполучного, так як випаровуються речовини, не тільки знаходилися раніше у електродній масі, а й знову утворюються в результаті термічного розкладання. Причому майже 20% від загальної кількості летючих виділяється при 300°C.

Внаслідок випаровування летючих речовин зменшується обсяг елементів структури заготовки. Це призводить до усадки під дією стягаючих молекулярних сил. Характер усадочного стиснення електродних сумішей сильно залежить від їх дисперсної структури. Якщо між твердими зернами є прошарок, то стиснення пропорційно обсягу випарованої рідини. Коли ж між твердими зернами встановлюється жорсткий контакт, стиснення набуває інший характер: воно перестає бути пропорційним обсягу випаровування речовини і відстає від нього. Із збільшенням жорсткості стиск зменшується. Тому відбувається збільшення пористості електрода. При температурі близько 400°C спостерігаються перші ознаки цементації виробів, однак механічна міцність їх дуже низька. Склеюча здатність пеку знижується. При більш високих температурах (500...600°C) вже без праці стає видиме затвердіння, відзначається збільшення механічної міцності. Основна маса летючих речовин, що утворюється в результаті піролізу пеку, виділяється до 600...650°C. При подальшому нагріванні видалення летючих речовин незначне. Різко зростає електропровідність. Чорний колір поверхні заготовки переходить в однорідний сірий.

З інших істотних для випалу закономірностей треба відзначити наступні. Зі зменшенням швидкості нагрівання вихід летючих речовин

зменшується, а його максимум зміщується в бік низьких температур. Вище 600°C зміна властивостей випалюваної заготовки сповільнюється, відбувається перетворення напівкоксу в кокс. Хімічні процеси поступово загасають. Зовнішня і внутрішня усадка поступово зменшується, а справжня щільність, пористість, а також міцність, твердість і електропровідність збільшуються.

Після закінчення випалу виробу охолоджують. При охолодженні спостерігаються такі явища. Після відключення камери охолодження електрода починається з периферії. На початку процесу охолодження у внутрішніх частинах електрода ще триває підвищення температури та супроводжується усадкою, а в зовнішніх частинах електрода усадка вже припинилася. Це посилює внутрішню напругу, яка вже була в результаті неоднакових об'ємних змін у різних ділянках електрода. По мірі охолодження зовнішні частини заготовок починають стискатися, що призводить до зменшення внутрішньої напруги заготовки. Але далі охолодження зовнішніх частин випереджає охолодження внутрішніх, що знову посилює внутрішню напругу. Виникають внутрішні напруження, які можуть призвести до руйнування електрода (утворюються тріщини); ця обставина викликає уповільнення процесу охолодження.

Вище було викладено спрощене, схематичне уявлення про процеси, що протікають при випалюванні, виходячи з припущення, що весь обсяг заготівлі нагрівається одночасно до певної температури. Насправді ж у випалювальної печі процеси протікають значно складніше, тому що нагрівання як однієї заготовки, так і всієї маси виробів, завантажених у камеру, відбувається нерівномірно.

Більш детально, вплив температури, якій буде підвергнутий електрод буде показано нижче. Тут же слід сказати, що в залежності від досягнутих температур і швидкості підйому температури створюються умови для одночасного протікання різних фізико-хімічних процесів в обсязі одного електрода.

У камері випалювальної печі поряд з основними процесами коксування печі (зв'язуючого) протікають вторинні процеси - розкладання вуглеводневих газів на розпечених поверхнях випалювальних заготовок. Ці гази виділяються з випалювальних виробів і заповнюють весь вільний об'єм камери. Вуглеводневі гази розкладаються з утворенням твердого вуглецю, який у вигляді твердого шару відкладається в порах і на поверхні випалювальних заготовок. У результаті вихід коксу підвищується, відбувається блокування пор і підвищення міцності виробів.

На перебіг описаних процесів впливають і деякі технологічні умови і властивості засипочних матеріалів, тягові умови і навіть технічний стан печі.

Швидкість нагрівання - досить істотний фактор, який впливає на процеси при випалюванні. Швидкість нагрівання визначає поширення температури у виробі, а також у всьому об'ємі завантаження. Різні температури в об'ємі виробу викликають одночасне протікання в ньому різних процесів. Це визиває нерівномірність усадки в об'ємі виробу і створює небезпечні внутрішні напруження, які при низьких температурах можуть призвести до пластичних деформацій. При більш високих температурах при утворенні твердого зв'язку виріб стає крихким - це призводить до розтріскування. Швидкість нагрівання робить великий вплив на кількість коксу, що утворюється з зв'язуючого. Зі зменшенням швидкості підйому температури вихід коксу завжди зростає. Доведено, що із збільшенням виходу коксу при випалюванні міцнісні характеристики виробів зростають. Але уповільнення режиму випалу викликає зниження продуктивності печі. Тому режим випалу повинен бути оптимальним, який забезпечить вимоги технологічних факторів і одночасно задовольнить вимогам економіки процесу

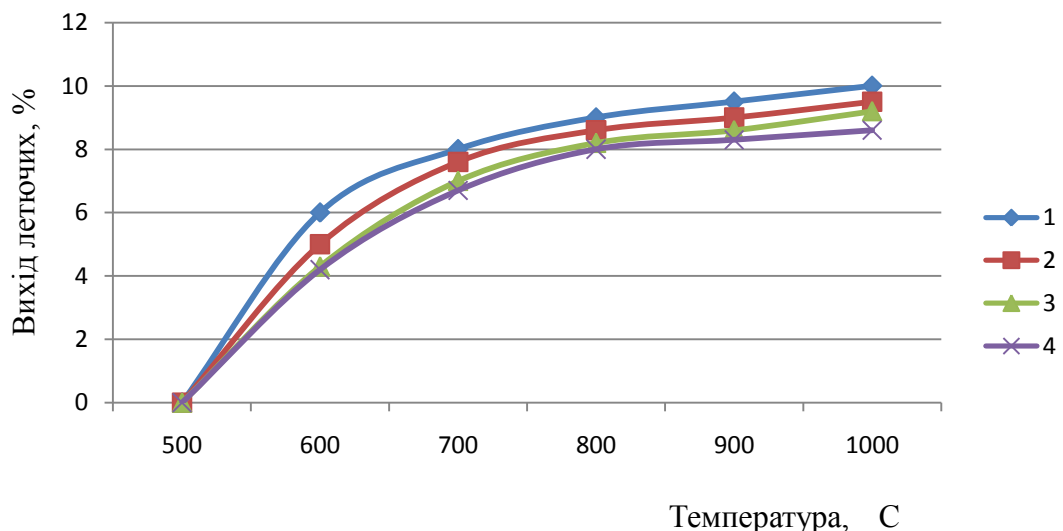
Довготривала практика і дослідження говорять про те, що не для всіх інтервалів температур це положення справедливо.

Повільний підйом температури повинен здійснюватися тільки в тих межах, при яких в основному протікають глибокі пірогенеті-етичні зміни

сполучних речовин, що сприяють утворенню коксу. Можна тільки вказати, що такою межею є 450...500°C, тобто температури утворення напівкоксу.

Дослідження напівкоксів, отриманих з кам'яновугільних пеків різних коксохімічних заводів, вказало, що вихід летких речовин при коксуванні будь-якого напівкоксу залежить тільки від температури, при якій він отриманий.

На рис. 2.5 наведені криві виділення летючих речовин з напівкоксів різного походження (отриманих при 500°C) при прокалюванні їх до 1000°C. Всі криві розташовуються близько одна до іншої, майже збігаються. Характер газовиділення також ідентичний. Але головне полягає в тому, що умови нагрівання Напівкокс не роблять впливу на кількість виділилися летючих речовин. Експериментально було доведено, що виходи летких речовин при температурі 500...1000°C і різних швидкостях нагрівання напівкоксу (0,5 і 20°C/год) близькі за значенням. Виділення летких речовин однаково, якщо проводити прожарювання напівкокс у вакуумі і при атмосферному тиску.



1, 2, 3, 4 - пеки з різною температурою розм'якшення: 67, 51, 75 і 90°C відповідно, з яких отримано напівкокс

Рисунок 2.5 - Вихід летючих з напівкоксу різного походження при нагріванні їх до 1000°C

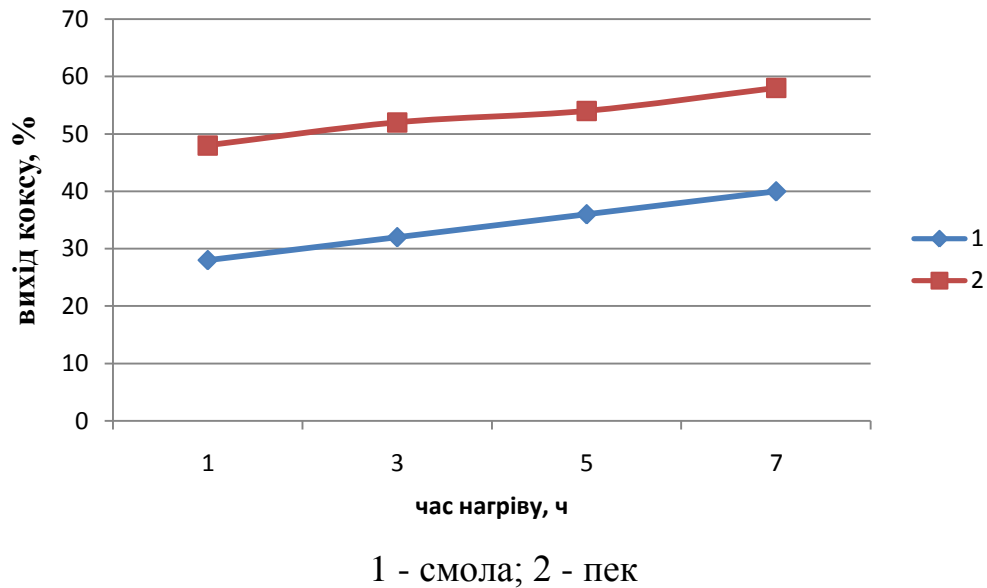


Рисунок 2.6 - Залежність виходу коксу від швидкості нагрівання:

Елементарний склад Напівкокс при 500°C коливався в межах допустимих похибок близько середніх значень 93,85% С і 3,35% Н.

З усього сказаного впливає зробити два важливих висновки: по-перше, процес перетворення (вірніше, механізм процесу) будь-якого напівкоксу в кокс протікає однаковим шляхом і не залежить від природи вихідних сировинних матеріалів, з яких він отриманий, по-друге, швидкості підйому температури, за яких він піддається термічній обробці, не роблять впливу на кількість утворюється коксу.

Зовсім по-іншому на вихід коксу з сполучного впливає швидкість підйому температури до 500°C . З таблиці 2.3 видно, що з пониженням швидкості підйому температури при випалюванні виробів зменшується вихід летких речовин і відповідно збільшується вихід коксу з зв'язуючого. Аналогічна залежність від швидкості підйому температури спостерігається при коксуванні кам'яновугільної смоли та пеку. Механізм цієї залежності полягає в тому, що при повільному нагріві ненасичені молекули встигають вступати в реакцію асоціації. При швидкому нагріванні вони випаровуються, що досить добре проілюстровано даними табл. 2.3, де показано, що зі

збільшенням швидкості нагрівання збільшується вміст конденсату в видалюються продуктах.

Таблиця 2.3 - Загальний вихід летючих речовин залежно від швидкості підйому температури при випалюванні, %

Температура, °С	Речовини	Вуглевий електрод	Нефтяна заготівля
200	Конденсат	11,8	12,5
	Гази	2,1	3,0
	Усього	13,9	15,5
100	Конденсат	8,0	8,8
	Гази	3,5	4,9
	Усього	11,5	13,7
70	Конденсат	6,0	7,2
	Гази	4,1	6,0
	усього	10,1	13,2

Однак інтервал температур 0...500°C сам по собі досить великий. Ймовірно, і в цьому інтервалі є більш вузький інтервал, в якому найбільш активно протікають процеси коксоутворення. Точне знання цих параметрів необхідно при побудові і найбільш ефективних режимів випалу електродних матеріалів.

Теоретично визначити цей інтервал температур неможливо. Тому слід звернутися до допомоги експериментальних даних (табл.2.4).

На підставі цих даних при температурах 300...425°C процеси асоціації протікають більш ефективно і зі значно більшими швидкостями, ніж при більш низьких температурах. Занадто швидкий перехід температурного кордону в 425°C викликає дистиляцію продуктів, здатних взяти участь у процесах коксоутворення.

Таблиця 2.4 - Вихід коксу з пеку залежно від режиму термічної обробки

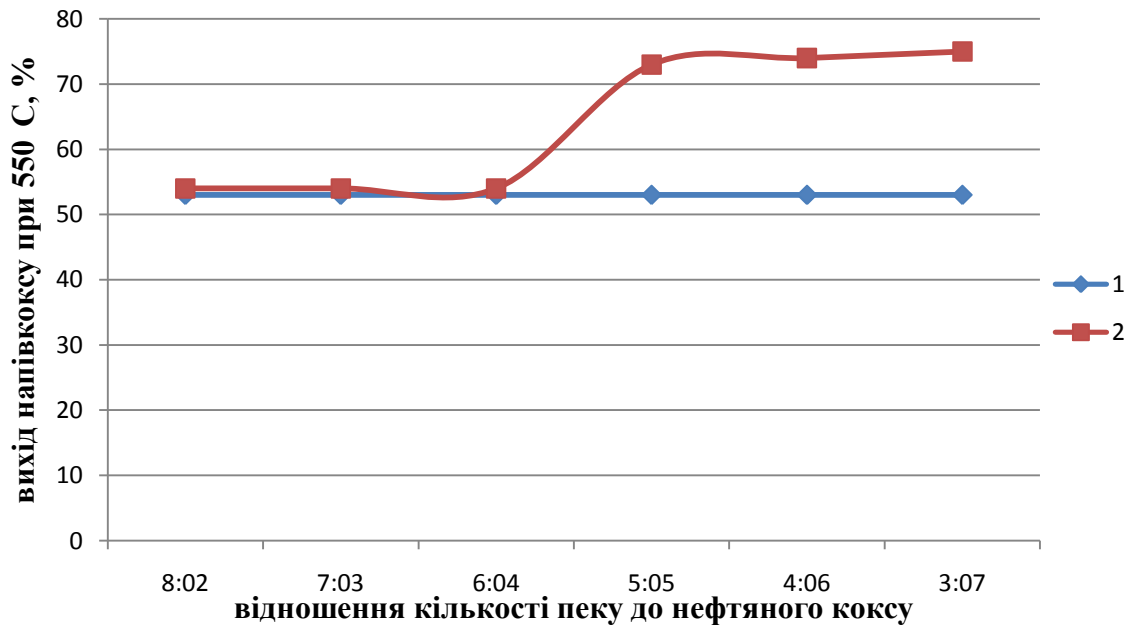
Температурний режим, °С	Коксовий залишок при 500°С, %	Напівкокс, %		Коксовий залишок після прокалювання при 1000°С, %
		С	Н	
1	2	3	4	5
Опити з рівномірним нагрівом				
До 300°С 1 ч, від 300 до 500°С – за 120ч	70,2	93,89	3,30	67,4
До 300°С 1 ч, від 300 до 500°С – за 200ч	71,2	94,27	3,38	68,5
Опити з витримкою температури				
До 200°С 3 ч, при 200°С – 46ч, при 200...500°С – за 3 ч	61,6	93,59	3,31	58,9
До 300°С 3ч, при 300°С – 46ч, при 300...500°С за 3ч	63,8	93,88	3,32	60,8
До 370°С 3ч, при 370°С – 46ч, при 370...500°С за 3ч	65,3	93,76	3,32	62,6
До 400°С 3ч, при 400°С – 46ч, при 400...500°С за3ч	71,3	93,75	3,33	66,2
До 425°С 3ч, при 400°С – 46ч, при 425...500°С за 3ч	69,2	-	-	64,2
До 450°С 3ч, при 450°С – 46ч, при 450...500°С за 3ч	64,0	93,74	3,36	60,1

Належного ефекту (максимального виходу коксу) можна добитися і при більш низьких температурах, але для цього необхідно затратити дуже багато часу. Наприклад, витримка пеку при температурі близько 170°С протягом 120 г дозволила збільшити вихід коксу приблизно на 5%. Для

побудови температурного графіка випалу, при якому забезпечувався б максимальний вихід коксу, необхідно щоб в інтервалі 375...425°C температура піднімалася дуже повільно, приблизно 50...60°C/ч. Можна, як зазначалося вище, досягти хороших виходів коксу при тривалій витримці при більш низьких температурах, наприклад 300...350°C, але в цьому випадку треба було б дуже тривалий час, близько 200...250 ч.

На вплив витримки при постійній температурі вказується в роботі Джіроламі [11]. Витримка при постійній температурі близько 300°C справила позитивний вплив на збільшення виходу коксу. На рис. 2.7 наведені дані, що ілюструють це явище, причому автор проводив свої роботи не так на чистому пеку, а на суміші з нафтовим коксом, що також зазначено на рис. 2.7. Швидке підвищення цієї температури не дозволила виявити змін у виході коксу (пунктирна лінія). Зростання виходу коксу з підвищенням вмісту порошку спостерігався тільки у матеріалу з активною поверхнею. На скляному порошок, за даними Джіроламі, ефект збільшення виходу коксу не спостерігалось.

Швидкість підйому температури до 350°C і після 450°C помітного на впливу вихід коксу з сполучного не надає. Однак було б неправильним при організації режиму випалу керуватися тільки міркуваннями отримання максимального коксового залишку. Не менш відповідально, як зазначалося вище, отримання однорідних, щільних, без зовнішніх і внутрішніх дефектів виробів. Ці вимоги істотно впливають на швидкість підйому температур до 350 і після 425°C



1 - з попереднім нагріванням до 300°C; 2 - без попереднього нагрівання.

Рисунок 2.7 - Вихід напівкоксу залежно від співвідношення пеку і коксу і вплив витримки при температурі 300 °C

2.3 Дослідження температурних полів при випалюванні електродів

Вище було показано, що в різних ділянках камери випалювальної печі має місце значне розходження температур і швидкості підйому температур. Але треба звернути увагу ще на одне надзвичайно важлива обставина. Не була зафіксована відтворюваність режимів випалу навіть для сусідніх камер. Інакше кажучи, від однієї кампанії до іншої повторення температурних режимів не спостерігається (маючи на увазі однаково задані графіки випалу). На доказ чого в табл. 2.5 наводяться дані трьох послідовних циклів випалу для сусідніх камер при одному і тому ж заданому режимі випалу.

Таблиця 2.5 - Характеристика зафіксованих температурних режимів для трьох сусідніх камер (I, II, III) послідовно виконаних процесів випалу (400 год)

Час від початку компанії, ч	Температура під сводом, °С			Температура у тілі заготовки, °С					
				верх			низ		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
75	370	355	400	80	96	117	56	72	85
99	420	410	434	115	132	170	78	90	114
123	450	440	445	162	172	223	100	105	150
147	475	465	486	202	218	269	125	132	183
171	495	515	500	242	255	311	155	165	213
195	530	525	555	285	288	345	192	190	235
219	550	565	570	328	318	383	228	208	259
243	578	590	605	367	349	415	258	236	281
267	534	632	635	406	381	454	294	259	312
281	650	675	700	428	405	578	319	280	330
315	768	800	880	482	465	592	369	331	380

Всі три циклу випалу відрізняються один від одного як за досягнутими температурами так і за швидкістю підйому температури в підсклепінному просторі і тую завантаженні. Швидкості підйому температури в різних точках завантаження муфеля також відрізняються для кожного циклу.

Ці відомості розширюють наші уявлення про температурні режими в одній печі, для одного і того ж режиму випалу, але в різних камерах.

Ми ж задалися метою розкрити не тільки розподіл температур по зрізу муфеля, а й поширення фронту постійних температур по зрізу виробів, що випалюються. Це видається дуже важливим, оскільки допоможе висказати рекомендації з конструювання, якщо не всієї печі, то окремої камери.

Були проведені спеціальні дослідження випалу електродів в

промислової печі, але в даному випадку цікавило не тільки розподіл температури в обсязі муфеля, а й ретельні розрахунки за швидкостями підйому температури в обсязі муфеля, а також визначення градієнта температур як по висоті, так і по перетину муфеля.

Для характеристики розподілу температури по перетину муфеля в табл. 2.6 і 2.7 наведені результати вимірювань в трьох горизонтах (500, 1600 і 2500 мм від подини) на відстані від зовнішньої стінки 100, 530, 960 мм при тривалості випалу 350 ч.

У верхній зоні на початку процесу нагрівання здійснювалося повільніше, ніж у нижньому горизонті. У даному випадку вплинув тепловий потік від подини муфеля. Аналізуючи зміну швидкостей росту температури в різних точках горизонтів, слід зазначити величезна відмінність швидкостей у простінку між муфелем і біля зовнішньої стінки камери. Однак з підвищенням температури ця різниця в швидкостях підйому температури згладжується.

Подібне явище намагалися пояснити різкою зміною потоку нагрітих газів між муфельними каналами не наводячи будь-яких доказів.

Таблиця 2.6 - Температура ($^{\circ}\text{C}$) у дев'яти точках муфеля і під склепінням камери при тривалості випалення 350ч

Під сводом	верх			середина			низ		
	100	530	900	100	530	900	100	530	900
100	52	40	35	72	42	30	35	38	32
200	55	60	81	65	65	69	62	65	75
300	40	110	158	73	121	148	69	130	-
395	52	130	225	102	170	202	95	175	290
500	113	233	329	158	238	295	147	256	329
600	170	320	400	212	312	262	200	342	400
700	288	397	468	285	375	425	280	400	460
800	450	468	543	382	492	492	-	457	527
900	618	582	625	468	490	563	517	512	591
1000	660	632	708	530	552	632	608	570	600
1100	760	727	798	618	638	720	650	642	740
1200	815	788	855	682	702	772	795	700	795

Примітка: 1. Вгору, середина, низ - відстань від поду муфеля: 2500, 1600, 500 мм. 2. 100, 530, 900 - відстань від зовнішньої стінки, мм.

Таблиця 2.7 - Швидкість підйому температури під склепінням камери в різних ділянках в обсязі муфеля, $^{\circ}\text{C}/\text{год}$

Час від початку компанії, ч	Під сводом	верх			Низ		
		100	530	900	100	530	900
1	2	3	4	5	6	7	8
70	3,0	0,4	1,3	2,1	0,2	1,7	2,3
107	3,0	0,3	0,6	2,1	0,8	1,4	1,8
138	3,1	1,8	3,1	3,1	1,7	2,4	2,8

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4	5	6	7	8
172	3,1	1,7	1,7	2,0	1,6	2,6	2,3
204	4,0	4,7	3,1	2,9	3,2	2,3	2,4
229	5,5	9,1	3,9	4,0	8,3	3,1	3,6
247	6,6	11,2	4,2	5,4	0,3	3,6	4,6
262	11,0	4,5	9,0	7,5	6,2	3,4	6,0
337	7,6	7,6	7,4	6,9	3,2	5,5	6,1

Зазвичай технологи підприємств пояснюють це явище більш високими втратами тепла через наружню стінку.

Ми не можемо погодитися з таким поясненням. По-перше, через наружню стінку не губиться тепло в навколишнє середовище, оскільки піч на всю висоту заглиблена в ґрунт. Отже, втрати тепла можуть бути тільки на акумулювання тепла кладкою і прилеглим ґрунтом. Це значно менше, ніж втрати в навколишній простір, тому що зберігається частина акумульованого тепла від попередньої кампанії.

По-друге, протилежна (зовнішня) стінка муфеля обігриває два сусідніх муфеля. Так, всі стінки муфеля мають однаковий перетин каналів, через які протікають обігривають газу; отже, через муфелі біля зовнішньої стінки і через муфелі простінок протікає однакову кількість теплоносія. Як муфельний простінок, так і муфельні канали, розташовані у зовнішній стінки, ділять: у першому випадку на дві рівні частини між двома муфелем, а в другому випадку - між муфелем і кладкою печі. Неважко показати, що втрати тепла через кладку печі не вище витрати тепла через простінок в сусідній муфель.

Більш глибокий аналіз дозволив зробити інший висновок, більш відповідний дійсному стану речей. Змінний свод неможливо встановити герметично над камерою. Отже, по всьому периметру камери відбувається

підсмоктування холодного повітря. Чим далі камера знаходиться від камери вогню, тим розрідження в ній вище, тим більше засмоктується холодного повітря. Це холодне повітря поступає у камеру, попрямує в найближчий муфельний канал, розташований біля наружної стінки, який різко знижує температуру обігрівальних газів, розбавляючи продукти спалювання опалювального газу, які надійшли до цього місця.

Крім того, холодне повітря, потрапляючи в нагріту атмосферу, швидко розширюється у своєму обсязі, створюючи умови, при яких в муфельні канали буде надходити менша кількість гарячих газів.

З підвищенням температури в камері, а це можливо тільки при наближенні до вогневої камери, розрідження в ній знижується і підсос повітря відповідно зменшуються. Крім того, в цих камерах запалюються додаткові пальники для підтримки температурного режиму, живлення яких проводиться холодним повітрям. Все це призводить до різкого разубоживання нагрітих газів холодним повітрям, внаслідок чого відбувається вирівнювання температурних умов по всьому перетину камери і зрештою до вирівнювання швидкостей підйому температури у всіх муфельних каналах незалежно від їх місцезнаходження.

Однак це вирівнювання відбувається при настільки високих температурах, коли міграційні процеси сполучних припиняються, а також закінчилися процеси коксоутворення з сполучних. При більш низьких температурах зберігається різке відмінність швидкостей підйому температури біля протилежних стінок муфеля, створюється градієнт температур, що сприяє переміщенню зв'язующої в горизонтальному напрямку.

Порівнюючи температурні режими (див. табл. 2.6 і 2.7), слід зробити висновок - встановити закономірність зміни температури нагрівання для камери або для будь-якої точки в муфелі не представляється можливим. Ні напрямок, ні величина градієнта температур не залишаються постійними для однаково заданих умов випалу як по завантаженню, так і по температурному

режиму. Однак можна відзначити загальне явище - у верхніх горизонтах градієнт температур вище, ніж у нижніх. Температурні градієнти по вертикалі різні на різних відстанях від гріючої стінки.

Температурний градієнт по вертикалі в початковий період кампанії не перевищує $0,45^{\circ}\text{C}/\text{см}$; надалі він досить різко зростає і досягає $1,0 - 1,3^{\circ}\text{C}/\text{см}$. При цьому в нижніх ділянках муфеля температурний градієнт по висоті змінюється рівномірно і не перевищує $0,6^{\circ}\text{C}/\text{см}$, у той час як у верхніх зонах, особливо біля зовнішньої стінки, спостерігаються різкі його зміни.

Зміна температурного градієнта в горизонтальних площинах відрізняється як за величиною, так і за характером. Градієнт температури в бік зовнішньої стінки різко зростає і при температурі $\sim 300^{\circ}\text{C}$ в середніх зонах досягає $2,3-3,5^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Різниця температур по діаметру заготовок електродів 300-500 мм досягає $60-100^{\circ}\text{C}$ для електродів, розташованих біля внутрішньої стінки, і $100 - 170^{\circ}\text{C}$ для заготовок, розташованих біля зовнішньої стінки (при температурах у центрі муфеля 300°C).

Підводячи підсумки проведених експериментів, слід ще раз підкреслити, що температурні градієнти по висоті муфеля досягають $3,5^{\circ}\text{C}/\text{см}$, а по ширині муфеля даже $6^{\circ}\text{C}/\text{см}$.

У практиці електродної промисловості прийнято вважати, що збільшення тривалості циклу випалу сприяє поліпшенню якості продукції (в даному випадку виключаємо питання тріщино-утворення). Температурні режими

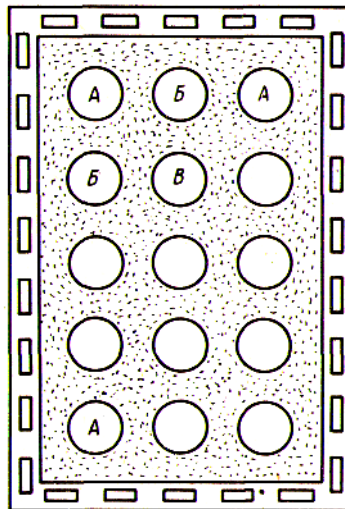
чином, щоб область найбільш активних перетворень пеку в кокс була максимально розтягнутою за часом. Однак, як видно з викладеного, витримати заданий графік (в обсязі завантаження) не представляється можливим. Збільшення загальної тривалості призводить до невиправдано довгому підйому температури до 250°C , коли найбільш інтенсивно протікають процеси переміщення пов'язує. І замість надії на поліпшення якості випальної продукції ми стикаємося з зворотним явищем - якісні характеристики знижуються (мається на увазі ступінь неоднорідності в обсязі

вироби). Повторюємо, в умовах багатоканерних сводових печей не можна раціонально реалізувати гідності подовжених режимів випалу. На якісні характеристики електродів будуть чинити величезний вплив питання рецептурного порядку.

3 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ РЕЖИМІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗАГОТОВОК

3.1 Дослідження способів обігріву електродних заготовок

При дослідженні повного завантаження камери, була встановлена важлива залежність властивостей і виходу придатних обпалених електродних матеріалів від місця знаходження в муфелі (рис. 3.1). Всі завантажені електроди за напрямом теплового потоку в муфелі слід розділити на три типи: 1 - кутові електроди, помічені індексом А, обігріваються з двох сторін; 2 - зовнішні електроди - Б - обігріваються з одного боку, 3 - електроди, які в центрі муфеля - В, мають круговельній оборот. Характер обігріву кожного типу завантаження електрода визначив свійства і виходу придатних виробів. Найгіршими показниками мали вироби завантаження А і Б та найкращими В.



А - обігрів з двох сторін; Б - обігрів з одного боку; В - круговий обігрів

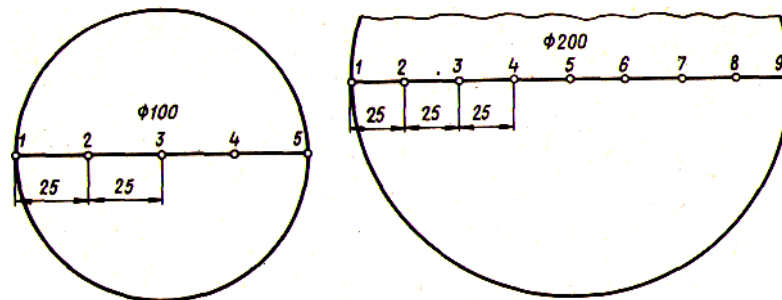
Рисунок 3.1 - Схема розташованих електродів у муфелі

У лабораторних умовах було досліджено характер розподілу температурних полів в електродних заготовках при односторонньому,

двосторонньому та круговому способам підведення тепла.

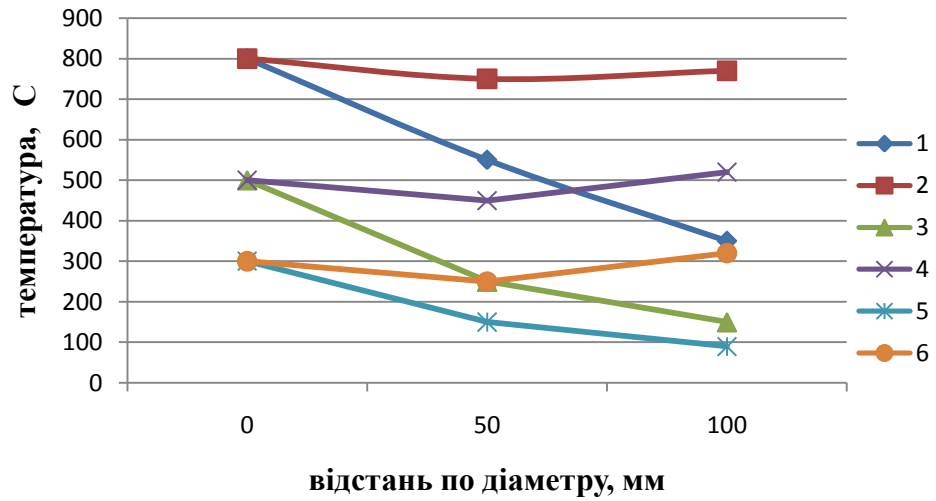
У тигельну прямокутну піч з нагрівачами, розташованими на протилежних стінках, містився випробуваний зразок. В якості предметів дослідження були взяті промислові електроди відповідних розмірів діаметром 50, 100 і 200 мм. Зразки засипали річковим піском. Відстань від нагрівача до зразка у всіх серіях дослідів залишалася постійним. За діаметру зразка на відстані 25 мм одна від іншої, починаючи від поверхні, розміщалися термопари. Реєстрація температур проводилася за допомогою многоточечного автоматичного електронного потенціометра ЕПП-09.

Дослідження кругового обігріву проводилося в циліндричній печі, причому всі умови - відстань до гріючого електрода, засипки та ін - збереглися однаковими з одно- і двостороннім підведенням тепла. Схема розташування термопар показана на рис. 3.2. Дослідження проводилися з різною швидкістю підйому температури - 2, 3 і 4°C/хв. Результати вимірювань температури наведені на рис. 3.3 і 3.4.

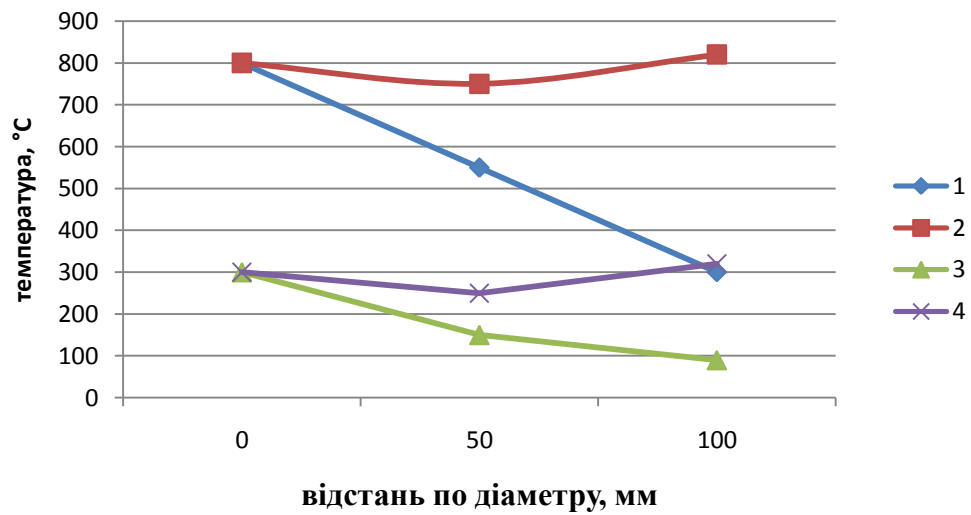


Відстань по діаметру, мм

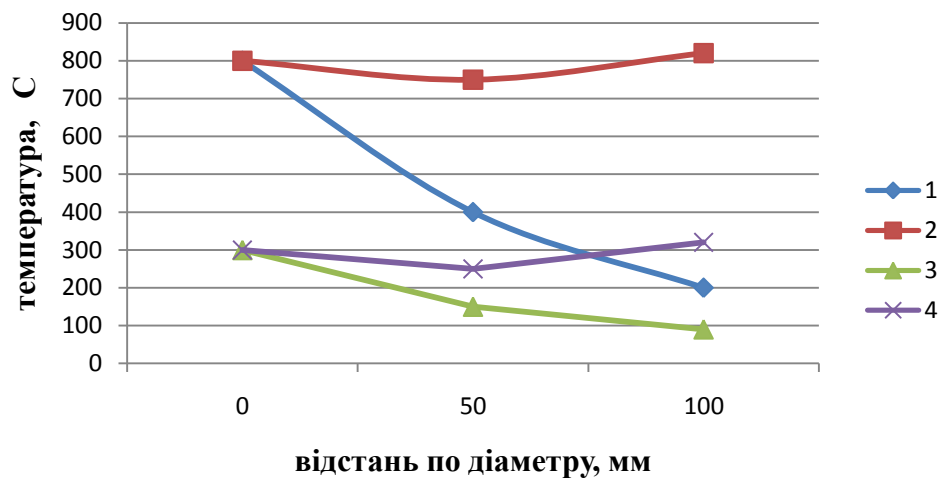
Рисунок 3.2 - Схема розташування термопар в досліджуваних електродах



а

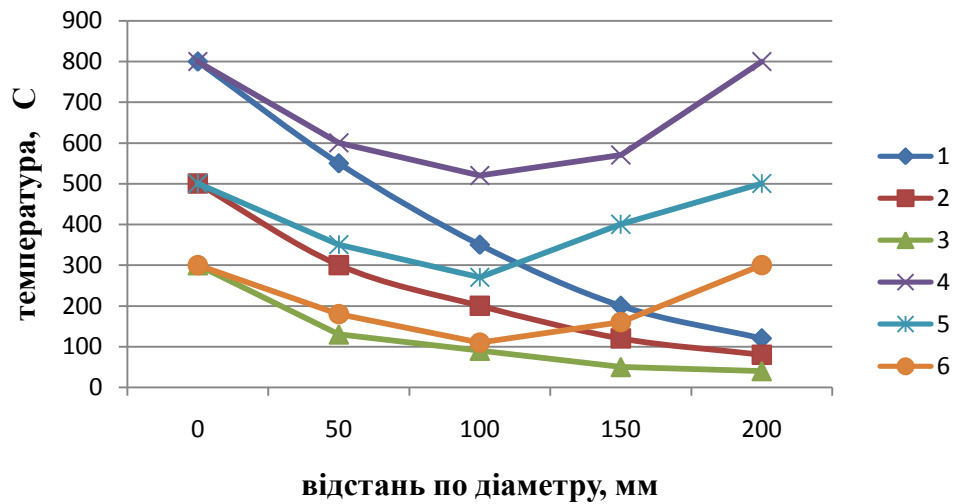


б

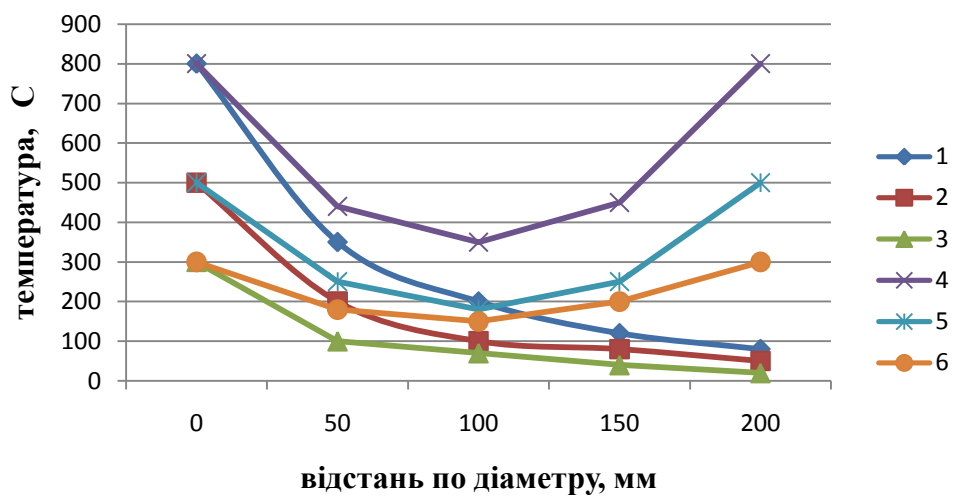


в

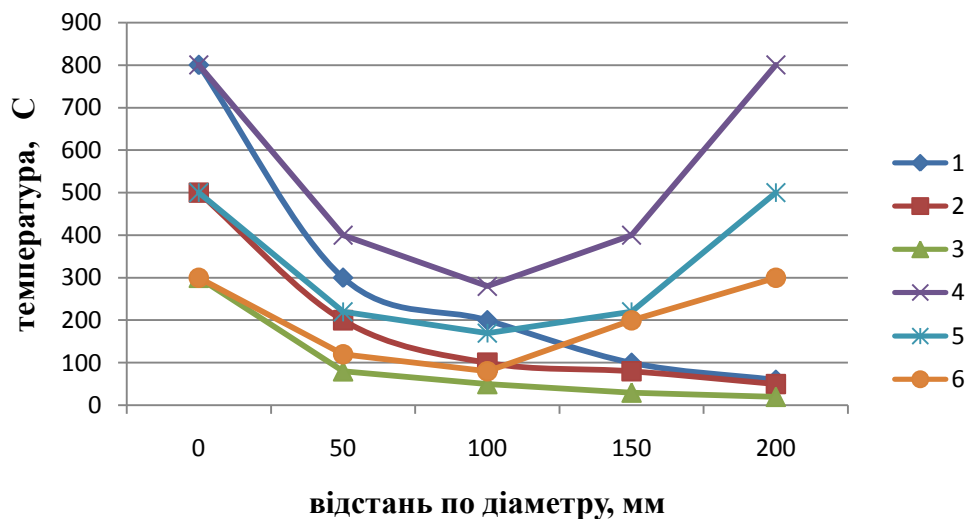
Рисунок 3.3 - Розподіл температур по перетину електрода діаметром 100 мм при односторонньому (1,3,5) і круговому (2,4,6) підводі тепла при швидкості підйому температури. °C/хв: а-2, б-3; в-4



а



б



в

Рисунок 3.4 - Розподіл температур по перетину електрода діаметром 200 мм при односторонньому (1,2,3) круговому (4,5,6) підводі тепла при швидкості підйому температури $^{\circ}\text{C} / \text{хв.}$; а - 2; б - 3; в - 4

Аналізуючи отримані дані, слід передусім відзначити, що характер підведення тепла до обпалювати зразком має величезне значення. Так, наприклад, для зразка діаметром 100 мм при температурі поверхні 400°C і швидкості підйому температури 3 С / хв центральна точка мала температуру 160°C при односторонньому підводі тепла, при двосторонньому 272°C і при круговому обігріві 325°C. Аналогічні дані для всіх експериментів, причому із збільшенням розмірів зразків і швидкості нагрівання різниця температур між периферією і центром зростає при порівнянні одностороннього обігріву з іншими методами підвода тепла.

Процеси, що визначають і супутні формуванню структури електрода, протікають в певних температурних інтервалах. В основному вони закінчуються до 450-500°C, а найбільш-відповідальні протікають при 150-250 і 350-425°C (нижче це буде доведено). У зв'язку з цим становить інтерес простежити просування фронту постійних температур в обсязі електродів до 500 С. У табл. 3.1 наведені дані, з яких видно, який потрібен час для просування фронту постійних температур 100, 200, 300, 400 і 500°C, які поширилися б від поверхні в глиб зразка при різних способах і швидкостях нагрівання.

Таблиця 3.1 - Час досягнення температур в окремих точках зразків при різних способах та інтенсивності нагрівання

Швидкість нагріву, °С/хв	Спосіб нагрівання	Відстань від поверхні, мм	Час досягнення температур, °С/хв.				
			100	200	300	400	500
1	2	3	4	5	6	7	8
Діаметр образця 50 мм							
2	Односторонній	25	20,0	34,2	41,2	43,7	46,2
	Двосторонній	25	7,5	13,4	15,2	16,7	16,0

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
	Круговий	25	5,0	6,2	6,7	6,5	7,0
3	Односторонній	25	18,2	26,0	32,4	33,7	37,4
	Двосторонній	25	7,2	12,5	13,5	14,5	14,2
	Круговий	25	4,0	5,2	6,2	6,5	6,5
3	Односторонній	25	14,0	21,8	26,2	27,5	30,2
	Двосторонній	25	7,0	10,0	12,0	13,7	13,5
	Круговий	25	2,8	4,0	5,0	5,0	6,0
2	односторонній	50	44,2	65,0	84,0	89,5	93,5
3	-//-	50	37,0	47,0	50,0	63,7	67,5
4	-//-	50	30,0	40,2	47,6	51,5	52,5
Діаметр образця 100 мм							
2	Односторонній	25	37,0	56,6	66,0	72,8	71,2
	Двосторонній	25	22,8	26,6	29,0	32,0	32,0
	Круговий	25	16,5	20,6	22,2	23,2	24,1
3	Односторонній	25	26,2	44,4	54,2	60,0	62,0
	Двосторонній	25	17,2	24,4	27,4	28,0	23,7
	Круговий	25	10,2	16,0	16,2	20,5	20,8
2	Односторонній	50	78,3	108,0	128,4	135,0	135,6
	Двосторонній	50	35,6	44,0	47,3	50,9	50,6
	Круговий	50	21,0	25,3	27,2	28,3	29,7
3	Односторонній	50	68,0	90,5	106,2	112,0	114,0
	Двосторонній	50	30,8	40,0	44,1	46,0	45,6
	Круговий	50	16,2	22,2	24,9	26,3	27,1
4	Односторонній	50	52,8	81,2	96,0	102,0	-
	Двосторонній	50	28,0	38,0	41,4	45,0	-
	Круговий	50	14,2	20,4	21,0	25,7	-
2	Односторонній	100	136,4	208,6	230,0	-	-
	-//-	100	104,0	104,0	155,4	-	-

Порівняння швидкостей просування фронту постійних температур показує, що в даному випадку характер підведення тепла має вирішальне значення. Більш інтенсивне просування фронту постійних температур найбільш характерно для кругового підведення тепла. Наприклад, фронт 300°C при односторонньому нагріванні електрода діаметром 100

ммпросувається до центру зі швидкістю 0,40 мм/хв, а при круговому обігріві 5,22 мм/хв (у 13 разів швидше). Отже, при круговому обігріві створюються найбільш сприятливі умови для одночасного протікання однотипних пірогенних процесів у всьому обсязі випалювального електрода. Створення подібних умов призводить до того, що усадочні явища протікають в рівній мірі однаково у всьому обсязі, що не викликає внутрішніх напружень в обпалювати виробі, отже, виключаються причини, що призводять до тріщин. При круговому обігріві значно менше температурний градієнт, значно швидше проходять температури до 300°C, що різко гальмує протікання міграційних процесів. Отже, можна очікувати виходу виробів з більш однорідними властивостями і меншими дефектами.

Звідси можна зробити важливий для промислової практики висновок. Електроди повинні обпалюватися в таких муфелем, які забезпечують круговий обігрів випалюються, електродів. Особливо це важливо для виробів великих розмірів, діаметром вище 400 мм. Технологи можуть заперечити, що в цьому випадку знизиться корисний об'єм камери за рахунок будівництва додаткових обігрівальних стінок. Але при круговому обігріві створюються умови для більш форсованих режимів випалу, тому будуть компенсовані втрати, викликані зниженням корисної ємності камер. Але загальна ефективність зросте ще більше в результаті поліпшення якості та зниження шлюбу електродів.

У промисловій практиці відомий спосіб випалу відповідальних видів виробів в центрі муфеля (див. рис. 3.1). Цей спосіб завантаження визначається терміном-екранування менш відповідальними виробами, які розташовуються ближче до нагрівальних стінок муфеля. У даному випадку "захисні" вироби не являють тепловим екраном. Подібна завантаження, як вже зазначалося вище, створює різні умови підведення тепла до обпикає виробам. При внутрішній завантаженні забезпечується кругової обігрів. У першому розділі мова йшла про контейнерном випалюванні, при якому завжди і для всіх електродів забезпечується кругової обігрів. Ця обставина

допускає більш форсовані режими випалу в порівнянні з багатоканальними печами. При цьому зберігаються високий вихід і висока якість електродів.

3.2 Усадка виробів при випалюванні

У процесі випалу змінюються зовнішні розміри виробу. Зазвичай вони зменшуються, тобто відбувається усадка. Однак в дуже рідкісних випадках можна спостерігати збільшення цих розмірів.

Усадка визначається по відношенню до розмірів спресованого виробу. Вона має велике практичне значення, так як впливає на якісні характеристики і структуру виробів. Неоднорідна усадка в обсязі виробу завжди призводить до утворення внутрішніх і зовнішніх дефектів аж до утворення тріщин.

Усадка залежить від багатьох факторів, які систематично не вивчені. Найважливіші з них - ступінь ущільнення при пресуванні, спосіб пресування, якість і кількість сполучного, ступінь прожарювання вуглецевих матеріалів, температура випалу і швидкість нагрівання, а також умови, в яких протікає випал. Ці фактори пов'язані між собою і зазвичай проявляються в складних поєднаннях, тому роздільне вивчення кожного з них окремо пов'язане з великими труднощами.

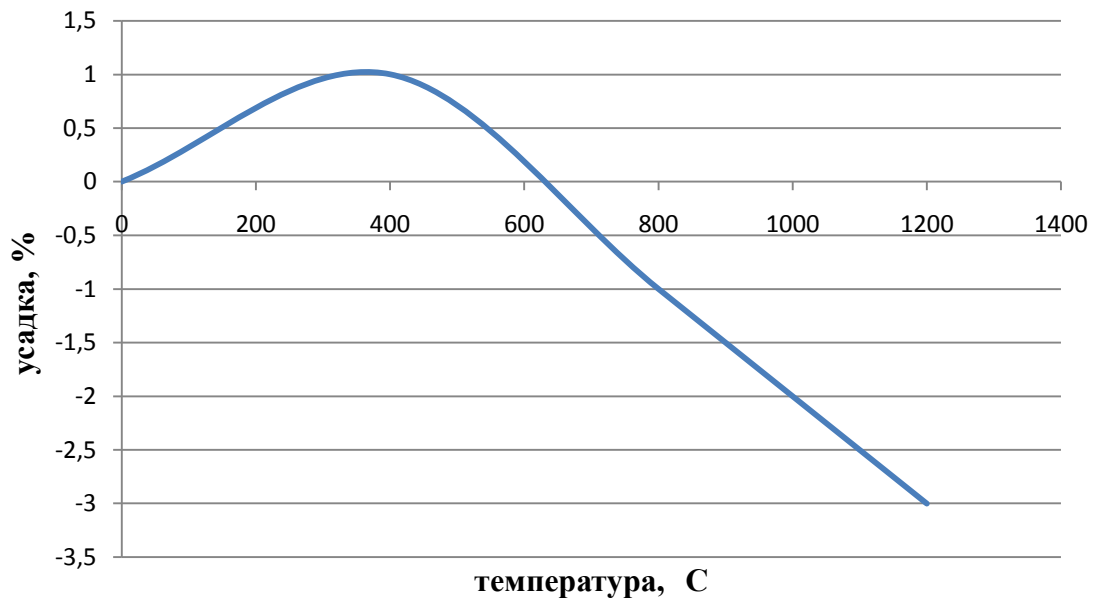


Рисунок 3.5 - Усадка виробів при випалюванні

Усадка розвивається поступово у міру підвищення температури; величина її залежить від кінцевої температури.

При постійній швидкості нагрівання усадка розвивається нерівномірно при різних температурах - при одних вона менша, при інших більше. На рис. 3.5 видно, що на початку нагрівання для деяких виробів відбувається помітна усадка. У деяких випадках збільшення розмірів може не спостерігатися. Початок усадки може зрушуватися в бік більш високих температур. Приблизно з 300...400°C починає різко зростати швидкість усадки. Це явище спостерігається майже до 800°C, після чого швидкість усадки різко знижується. При подальшому нагріванні усадка спостерігається, але протікає вона дуже повільно.

Усадка в самому початку нагрівання характерна для виробів, спресованих методом холодного пресування. Для малопористих виробів гарячого пресування при початковому нагріванні усадка не відбувається. Вони при температурі близько 100°C починають збільшувати свій об'єм,

максимум якого сягає близько 400°C. Збільшення лінійних розмірів доходить до 1%. При подальшому нагріванні всі види виробів мають велику усадку.

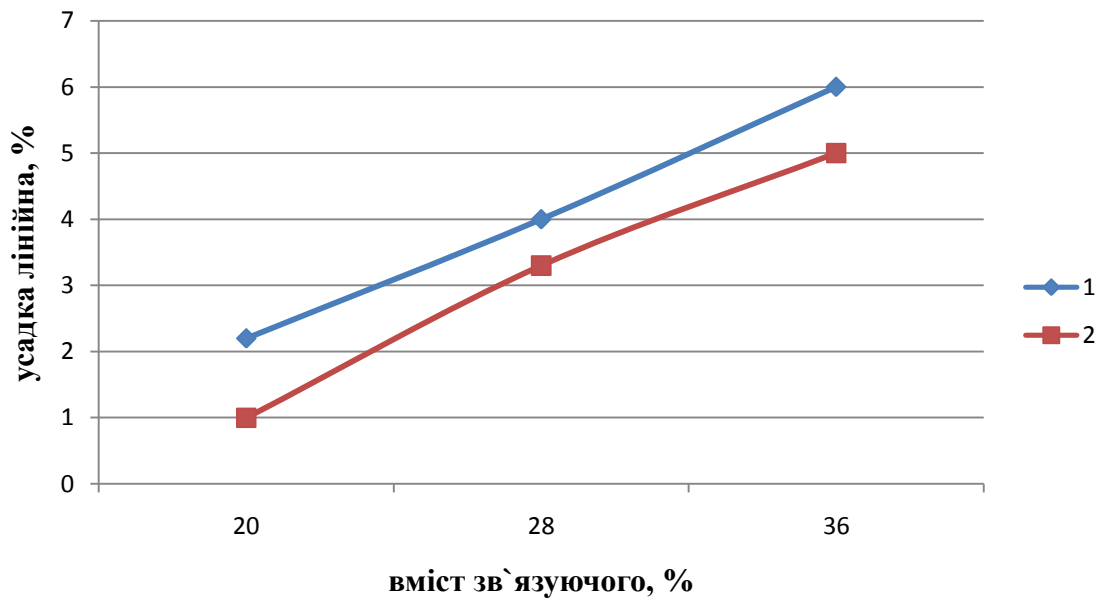
Залежність усадки виробів від ступеня ущільнення при пресуванні показана в табл. 3.2. Досліджувані зразки були виготовлені методом холодного пресування. Усадка тим більше, чим менше щільність спресованих блоків, чим нижче питомий тиск при пресуванні.

Таблиця 3.2 - Залежність усадки виробів від ступеня ущільнення

Тиск при пресуванні, МПа	Об'ємна маса зелених блоків, г/см ³	Об'ємна маса випалених блоків, г/см ³	Середня об'ємна усадка при випалюванні, %
6,4	1,348	1,440	12,3
32	1,425	1,467	11,9
96	1,554	1,536	9,2
127	1,594	1,541	8,0
192	1,633	1,560	7,0
256	1,654	1,564	6,2

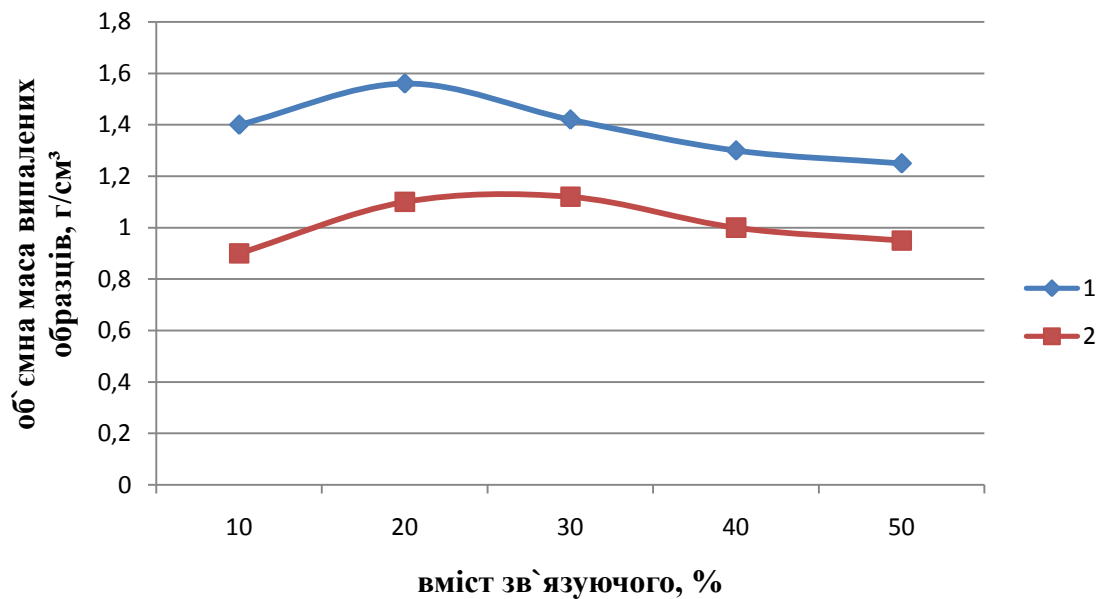
У більш складній залежності перебуває усадка і кількість сполучного, введене в шихту. Зі зміною змісту сполучного змінюється і щільність спресованих виробів. Усадка знаходиться в прямій залежності від кількості зв'язки (рис. 3.6). При дуже великому вмісті сполучного вироби спучуються і розтріскуються.

Природа сполучного також впливає на усадку і знаходиться в залежності від кількості летючих речовин, які вони виділяють при випалюванні. Легкі бітуми дають більший вихід летючих, внаслідок цього вони більше впливають на усадку, ніж важкі. Із збільшенням вмісту нерозчинних речовин в пеку усадка буде зменшуватися, а при утриманні їх близько 50% зовнішні розміри виробу можуть навіть збільшуватися.



1 — по висоті; 2 — по діаметру.

Рисунок 3.6 - Усадка пресування залежно від вмісту сполучного:



1 - маса зразка; 2 - маса коксу з сполучного

Рисунок 3.7 - Зміна об'ємної маси обпалених зразків і коксу з сполучного в залежності від кількості сполучного[30]

Дуже складна залежність усадки від гранулометричного складу. Чим дрібніше гранулометричний склад шихти, тим більше усадка. Це обумовлено

погіршенням ущільненості тонких сумішей і збільшеним вмістом в них пов'язує для додання масі необхідних пластичних властивостей. Додаток до дрібних порошків великих зерен зменшує усадку.

У великій мірі усадка залежить від умов, в яких протікає випал виробів. До них насамперед належать розміри муфелів (касет), в яких обпалюють вироби, і місце розташування їх у муфелі, фізична природа і гранулометричний склад засипки, газова середовище та ін. Це найважливіші причини, що викликають нерівномірне усадку в окремих випалюються, виробках і в різних ділянках одного виробу.

Цікава залежність об'ємної маси обпаленої електрода від кількості сполучного, викликана усадковими явищами. На рис. 3.7 показано зміну об'ємної маси електрода, а також об'ємної маси коксу, утворився з сполучного. Об'ємна маса електрода зростає із збільшенням кількості сполучного до оптимального змісту сполучного (близько 20%), а потім зменшується. Відзначимо наступне - об'ємна маса коксу сполучного (рис. 3.7, крива 2) збільшується до тих пір, поки вміст пеку близько до оптимального (близько 20%), а при подальшому збільшенні сполучного об'ємна маса цього коксу знижується.

Загалом, якщо величина втрати маси електродів при випалюванні більше величини усадки, об'ємна маса електрода завжди буде менше об'ємної маси зеленого електрода. Із збільшенням кількості зв'язків у обпеченому електроді зростає число порожнеч; їх стає більше. Головною причиною зростання обсягу пустот є не збільшення простору між частинками наповнювача, а утворення великих пір в результаті виділення летючих речовин в період пластичного стану пов'язує.

3.3 Вплив температурного поля печі на зміну властивостей по довжині електрода

У промисловій практиці давно відмічено, що проби, відібрані в різних ділянках по довжині обпаленої електрода, значно відрізняються за своїми якісними характеристиками. Однак цьому факту не надавали належного значення; не з'ясовані також причини, що викликають це явище, і не розроблені заходи щодо їх запобігання.

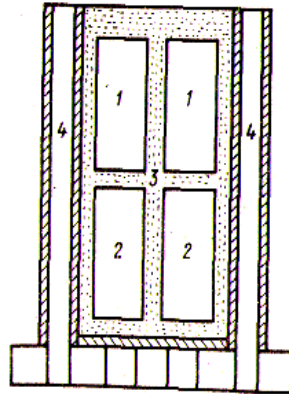
Залишилося не з'ясованим, чи існує яка-небудь залежність в розподіленні властивостей в тілі обпаленої електрода або це випадкове явище, викликане причинами, які важко піддаються обліку, беручи до уваги багато-передільність виробництва електродів.

Нижче наводяться результати експериментальних робіт у цій області, які дозволили отримати цілком певну залежність зміни властивостей по довжині НЕ обпаленої електрода від положення його в муфелі камери. Дослідження проводилися в промисловій печі. Електроди завантажувалися в два яруси. На рис. 3.8 показана завантаження електродів в муфелі. У таблиці 3.3 наводяться дані випробування обпалених електродів.

Таблиця 3.3 - Характеристика властивостей електродів, обпалених в різних зонах випалювальної печі (електроди вугільні, діаметр 300 мм)

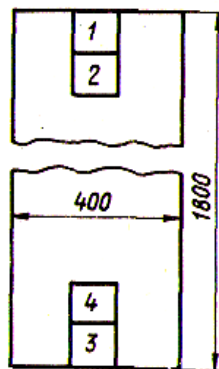
Ряд загрузки	Місце відбору пробу торці	Об`ємна маса, г/см ³	Пористість, %	межа міцності , МПа		
				стиск	вигин	ростяг
Верхній ряд	Верхній	1,509	25	26,0	7,3	2,6
	Нижній	1,535	23	31,4	1,0	3,0
Нижній ряд	Верхній	1,514	24	26,1	8,3	3,0
	нижній	1,542	23	30,8	9,1	3,6

Об'ємна маса та характеристики міцності у всіх випадках вище для нижнього торця, ніж для верхнього. Ця залежність дотримується для обох рядів (ярусів) завантаження електродів. Для нижнього ряду завантаження електродів розкид показників дещо менше, ніж це спостерігається для верхнього ряду



1 - верхній ряд електродів; 2 - нижній ряд електродів;
3 - засипка; 4 - обігрівуючі канали

Рисунок 3.8 - Муфель, завантажений електродами



1, 2 - верхній торець; 3, 4 нижній торець

Рисунок 3.9 - Схема відбору проб.

Властивості по висоті електрода в основному змінюються від одного кінця до іншого рівномірно.

Дослідженню піддавалися вугільні та нафтові заготовки діаметром 300

мм, довжиною 1700 мм. Випал проводився по 420-ч графіком. Нафтові заготовки піддалися графітуванню. З графітірованих електродів від верхніх і нижніх торців були відібрані проби у вигляді дисків товщиною 100...150 мм, з яких виготовлялися зразки для випробувань. Результати випробувань:

Таблиця 3.4 - Результати випробувань

Показник	Верхній торець	Нижній торець
Об'ємна маса, г/см ³	1,582	1,602
Межа міцності, МПа		
На стиск	16,1	18,9
На вигін	8,3	8,9
На розрив	2,6	3,6

З цих даних видно, що неоднорідність властивостей, отримана на випалюванні, зберігається і після графітування, а так як це остання технологічна операція, отже, неоднорідність властивостей збережеться і в готовій продукції.

М.А. Фріш [46] з співробітниками також зафіксував яскраво виражену залежність зміни властивостей обпалених електродів по довжині. Нижні торці завжди були більш міцними і щільними (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 - Характеристика властивостей за довжиною електрода

Манкіровка проб	Місце відбору проб	Об'ємна маса, МПа	Межа міцності за стиском, МПа
1/4	Верхній торець	1,54 – 1,57	30,8 – 34,1
	Нижній торець	1,58 – 1,59	42,2 – 51,9
2/7	Верхній торець	1,57 – 1,58	32,7 – 37,5
	Нижній торець	1,58 – 1,61	45,1 – 55,9
3/3	Верхній торець	1,54	39,7
	Нижній торець	1,57	49,0

Як видно з цих даних, щільність верхнього торця помітно відрізняється від щільності нижнього. Слід важати, що по довжині електрода від верхнього торця до нижнього вона змінюється поступово.

Балансові випробування випалювальних печей також показали аналогічну залежність властивостей по довжині електрода (табл. 3.6) [досліджувався електрод діаметром 400 і довжиною 1800 мм; проби відбиралися за центрами верхнього і нижнього торців]

Таблиця 3.6 - Характеристика свойств за довжиною випаленого електрода

Місце відбору проб (див. рис. 3.9)	Об`ємна маса, г/см ³	Межа міцності за стиском, МПа
Верхній торець (1)	1,60	46,8
Верхній торець (2)	1,59	38,0
Нижній торець (3)	1,61	47,6
Нижній торець (4)	1,63	54,5

Зазначена закономірність зміни властивостей обпаленої електрода по довжині характерна як для електрода верхнього ярусу (перший ряд зверху) завантаження муфеля, так і для електродів нижнього ярусу. Цей висновок зроблено на підставі численних спостережень і спеціально виконаних досліджень. Останні полягали в тому, що два електроди розташовувалися один над одним, у двох сусідніх ярусах (рис. 3.11), причому ці два електроди володіли досить високими однорідними властивостями, оскільки виготовлялися з одного замісу і однієї пресування. Здавалося б, що властивості нижнього торця обпаленої електрода верхнього ярусу повинні бути близькі до властивостей верхнього торця електрода нижнього ярусу. Електроди розташовувалися один над одним на відстані 50 мм, і температурний режим для цієї ділянки, по суті, був однаковий. Насправді ж їх властивості сильно відрізняються (рис. 3.11), наприклад міцність на стиск

нижнього торця електрода верхнього ярусу дорівнює 44 МПа, а верхнього торця сусіднього електрода (нижнього ярусу) 35 МПа. З усього сказаного випливає, що для кожного електрода, незалежно від місця знаходження в муфелі, зберігається зазначена вище закономірність зміни властивостей по довжині обпаленої електрода.

Якщо в камеру печі помістити електрод подвоєною довжини і піддати його дослідженню після випалу, то виявиться, що на сусідніх ділянках по середині довжини електрода властивості їх будуть дуже близькі (див. рис. 3.11). Загальна ж закономірних зміни властивостей електрода по довжині зберігається.

Якщо ж вчинити навпаки, розрізати довгий зелений електрод на три частини і завантажити їх в піч один над одним, то виявиться, що обпалені частини електрода відрізняються за властивостями по довжині в такій же залежності, як це продемонстровано для двох електродів на рис. 3.11.

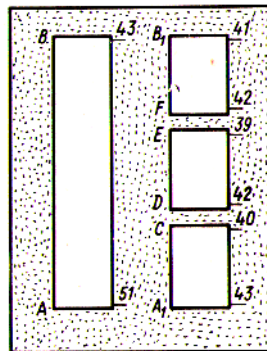


Рисунок 3.10 - Властивості вугільного блоку довжиною 3 м і розрізаного на три частини

При поділі зеленого електрода на частини зміна властивостей по довжині кожної частини електрода підпорядковане загальною встановленою закономірності і залежить від положення в камері і умов, в яких вони проходять термічну обробку (рис. 3.11).

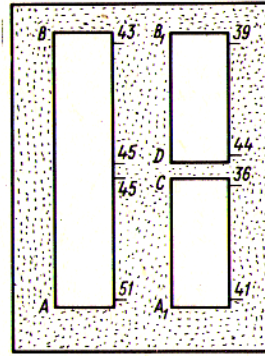
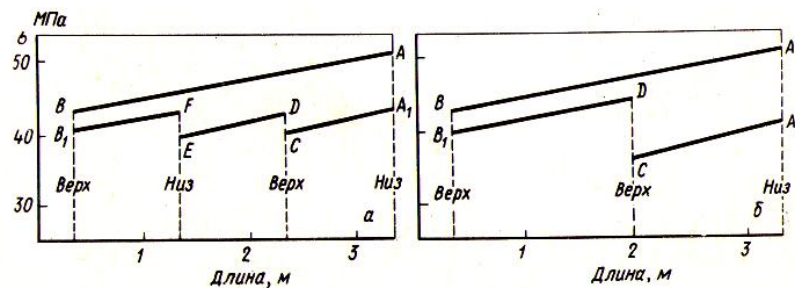


Рисунок 3.11 - Характеристики міцності електродів в залежності від їх положення в муфелі

Як вже зазначалося вище, в процесі випалу помітних змін з твердим наповнювачем не відбувається. Отже, настільки різка зміна властивостей в обсязі випалювального електрода залежить від специфічної поведінки пов'язує.

На закінчення слід сказати кілька слів про такий властивості електродів як електропровідність. це властивість також неоднорідне по довжині обпаленого електрода.



а - електрод, розрізаний на три частини; б - електрод, розрізаний на дві частини

Рисунок 3.12 - Схематичне представлення зміни властивостей по довжині електродів

Однак воно змінюється в протилежній залежності, ніж об'ємна маса і міцність. Верхня частина електрода менш щільна і слід було б очікувати, що

електропровідність її буде гірше, ніж в нижній частині; насправді електропровідність її вище. У даному випадку відіграють роль зовсім інші фактори. Безсумнівно, щільність електрода впливає на електропровідність, але ще більшою мірою впливає гранична температура, впливу якої піддавалася та чи інша частина електрода.

У табл. 3.7 наведені дані дослідження електропровідності по довжині електрода.

З цих даних видно, що верхня частина електрода завжди має більш високу електропровідність, ніж нижня. Максимальна температура, якої зазнавали в процесі випалу верхня і нижня частини електрода, відрізняється майже на 150°C, що відповідає падінню температури від верхнього кінця до нижнього на один градус на погонний сантиметр висоти. У тій же табл. 3.7 приведено дані електропровідності двох протилежних бічних поверхонь електрода. Одна сторона звернена до гріючої стінці, а інша - протилежна до сусіднього електрода. Слід зауважити, що при численних дослідженнях обпалених електродів постійно спостерігався великий розкид показників навіть для сусідніх проб. Можливо, на ці обставини впливала методика вимірювань і виготовлення проб.

Таблиця 3.7 - Питомий електричний опір, окремих частин обпаленої електрода залежно від положення в муфелі. Ом.мм / м

Верх електрода		Низ електрода	
Сторона звернена до гріючої стінці	Сторона звернена до сусіднього електрода	Сторона звернена до гріючої стінці	Сторона звернена до сусіднього електрода
47,5	49,4	49,1	50,2
46,3	47,6	48,1	53,5
49,1	50,0	52,4	56,7
49,4	54,5	51,7	60,0
48,6	48,8	49,0	53

Так, А.І. Аттманскім [47] наводяться дані досліджень, з яких видно, що електропровідність по довжині обпаленої електрода закономірно змінюється від верхнього торця до нижнього, але їм також виявлено, що властивість електропровідності змінюється в тому ж напрямку, що щільність і міцність електрода, тобто у зворотній залежності, ніж було наведено вище.

З усього сказаного одне тільки безперечно, що за цим показником електроди неоднорідні в своєму обсязі і коливання показників досягають досить великих значень 10...15%.

В промисловій практиці зазвичай про якість електродів судять по електропровідності, виміряної для цілого електрода. Передбачається, що електрод володіє однорідної електропровідністю. Виходячи з цих міркувань рекомендовані ГОСТ 4426-71 і ГОСТ 4425-62 величини питомих струмових навантажень при експлуатації електродів. У дійсності, як це було продемонстровано, електрод неоднорідний за електропровідності і коливання цього показника значні. При експлуатації електрода на електропечі електричний струм по всьому перетину електрода протікає однакової сили. Нагрівання ж окремих частин електрода за рахунок джоулевого ефекту буде неоднаково, що може служити причиною, якщо не поломки, то збільшених витрат.

Неоднорідність властивостей в обсязі одного виробу завжди знижує експлуатаційний ефект, навіть у тих випадках, коли, вироби не піддаються струмовим навантаженням. Доменні блоки, довжина яких сягає 3 м, мають ще більшу неоднорідністю властивостей, ніж електроди, що мають менші розміри по довжині. Для цього відповідального виду продукції неоднорідність властивостей може призвести до аварійної ситуації на доменній печі.

3.4 Вплив зовнішніх і внутрішніх обігрівальних стінок

З промислової практики відомо, що властивості обпалених електродних виробів, розташованих у різних обігрівальних стінок муфеля, неоднакові. На рис. 3.13 показана схема розташування обігривають стінок муфелів. Близько половини їх розташовано біля зовнішніх стінок камери, і кожен канал муфеля обігриває з одного боку завантажені електроди, а з іншого - зовнішню стінку. Протилежна обігриваюча стінка розташовується біля сусіднього муфеля і обігриває однією стороною один муфель, а інший - другий муфель.

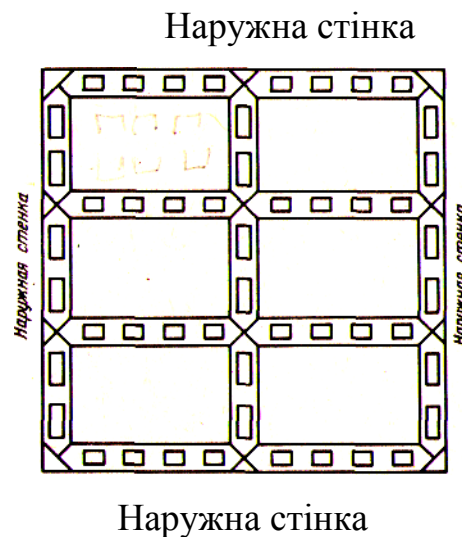


Рисунок 3.13 - Схема розташування обігривають стінок камери

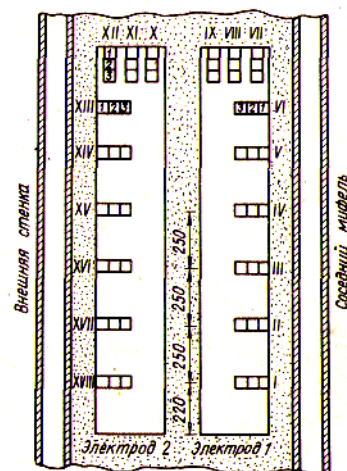


Рисунок 3.14- Схема завантаження електродів та місця відбору проб

Ширина муфеля близько 960 мм, і при завантаженні виробів великих перерізів (діаметром більше 500 мм) вони піддаються нагріванню від двох протилежних обігрівують стінок. Електроди ж менших перетинів однією стороною розполагаються ближче до обігрівуючої стінці, а другий - до сусіднього електроду, обігрівуючому головним чином протилежної обігрівуючої стінкою.

Дослідженню піддалися електродні заготовки діаметром 300 мм і довжиною 1800 мм (однієї партії пресування). Електроди обпікалися у верхньому ряду (ярусі) муфеля при тривалості випалу 360 ч. Дослідженню піддалися два електроду, причому вони завантажувалися в муфель таким чином, щоб один з них був звернений до обігрівуючої стінці біля зовнішньої стінки, а інший - до протилежної обігрівуючої стінці, біля сусіднього муфеля. Схема завантаження та місця відбору проб показані на рис. 3.15.

Здавалося б, що в даному випадку обігрів випалюються, електродів як з одного боку, так і з іншого боку муфеля повинен бути однаковий і, отже, слід очікувати однакових результатів за властивостями обпалених електродів. Однак, як побачимо нижче, отримані дані досліджень не підтверджують ці припущення.

У таблиці 3.8 - наведені результати дослідження відібраних зразків проб (рис. 3.15). Відбирали по три проби з кожної ділянки електрода, в таблиці 3.8 приведені середні величини.

Таблиця 3.8 - Характеристика електродів, обпалених біля зовнішньої внутрішньої стінок муфеля (див. рис. 3.15)

Проби електродів	Об`ємна маса,г/см ³	Пористість, %	Міцність за стиском, МПа
I (XVIII)	1,6(1,58)	22,4(23,3)	47,7(41,4)
II (XVII)	1,59(1,57)	22,7(24,2)	47,6(41,2)
III (XVI)	1,59(1,56)	22,8(24,6)	50,5(41,7)
IV (XV)	1,59(1,57)	22,8(24,6)	45,6(41,7)
V (XIV)	1,58(1,57)	22,4(24,6)	43,6(40,4)
VI (XIII)	1,57(1,57)	23,8(24,0)	42,0(38,8)
VII	1,63	21,0	55,0
VIII	1,6	22,1	54,1
IX	1,55	24,7	33,8
X	1,56	24,9	46,2
XI	1,56	24,1	46,5
XII	1,55	24,0	38,7

Примітка. Без дужок - проби електродів, розташованих біля стінки, зверненої до муфелем; в дужках - проби електродів, розташованих біля стінок, звернених до зовнішньої стінки.

У таблиці 3.8 дані розташовані таким чином: дві сусідні рядки, дані яких укладені в загальну рамку, відповідають показникам властивостей для одного і того ж горизонту, але для електродів, розташованих в різних місцях муфеля. За всіма якісними характеристиками електроди, розташовані біля зовнішньої стінки, мають нижчі показники.

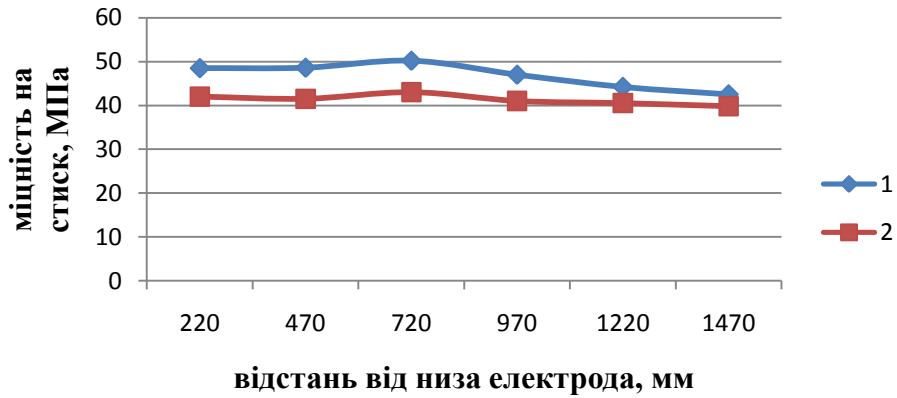
Верхні торці обігріваються не тільки через муфельну стінку, але і від нагрітих газів під склепінням печі (проби VII, VIII, IX і X, XI, XII). У цьому випадку також зберігається та ж залежність, яка відзначена вище, - електрод, розташований ближче до зовнішньої стінки, має знижені показники.

Особливо велика різниця показників для проб VII і XII, характерні участки електродів, звернені безпосередньо до муфельним стінок. Протилежного боку електродів (проби IX і X), що знаходяться в безпосередній близькості один до одного, хоча і відрізняються за якісними характеристиками, але незначно.

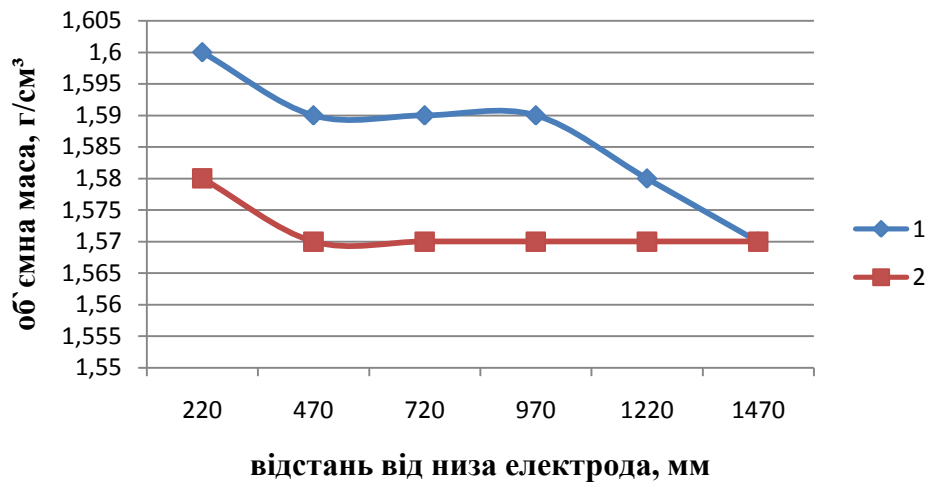
Розглядаючи дані, поміщені в таблиці 3.8, слід зазначити, що знову підтверджується залежність зміни властивостей по довжині електрода. Для електрода, що знаходився при випалюванні біля стінки, зверненої до муфелем, ця залежність виражена більш яскраво. Для електрода, обпалювати біля зовнішньої стінки, ця залежність також виражена, але в меншому ступені. Порівнюючи якісні характеристики двох електродів, слід зазначити, що ці характеристики для електрода, обпаленої біля зовнішньої стінки, нижче. Однак однорідність властивостей цього електрода більш висока, ніж для електрода, обпаленої біля протилежної стінки. Тому з точки зору роботи електрода в сталеплавильної печі електрод, обпалювальний біля зовнішньої стінки, може показати кращі результати.

Для ілюстрації на підставі даних таблиці 3.8 побудована графічна залежність властивостей електродів залежно від розташування їх у муфелі (рис. 3.15). Для "електрода, розташованого біля стінки муфеля, міцність коливається в межах 51,5-41,9 МПа (коливання становить 86 од.), А для електрода, розташованого 1 го біля протилежної стінки, 42,0-39,6 МПа (коливання становить 24 од.).

Маса для першого випадку змінюється в межах 1,60-1,57 г/см³, а в другому 1,58-1,57 г/см³. Досить наочно з'ясовується залежність зміни властивостей по висоті обпаленої електрода, причому підтверджується висловлена раніше залежність зміни властивостей від верхнього торця до нижнього.



а)



б)

- 1 - електрод, розташований у сусіднього муфеля;
 2 - електрод, розташований біля зовнішньої стінки

Рисунок 3.15 - Зміна властивостей електрода в залежності від відстані від гарячої стінки

Результати досліджень дозволяють зробити досить важливий висновок, що обпальвані електроди в сводовій випалювальній печі неоднорідні за своїми властивостями як в обсязі одного електрода, так і в обсязі партії електродів, обпалених в одній камері.

Промислова оцінка якості електродної продукції визначається середньою величиною обумовлених технічними умовами властивостей. Питомий електричний опір знаходимо для цілого електрода, а механічні властивості - для зразків, відібраних в обумовлених містах електродів.

Вище було звернуто увагу головним чином на міцнісні характеристики і об'ємну масу. Електричні властивості також неоднорідні в обсязі електрода. На доказ цих висновків наводимо експериментальні данні. Витягнуті з печі електроди піддавалися вимірюванню на електричну провідність. Потім електроди розрізали на три частини - верх, середину і низ. З кожної частини було відібрано 12 проб. Кожна проба піддалася вимірюванню. Нижче наводяться результати цих експериментів

Таблиця 3.9 - Питомий електричний опір електродів, Ом-мм²/м:

	I	II	III	IV
Цілий електрод	45,2	42,1	48,8	43,9
Для образців	45 – 55	42 - 61	47 - 61	42 - 54

Експлуатаційні властивості електродних матеріалів не повинні визначатися середніми значеннями якісних характеристик. Це було б закономірним тільки в тому випадку, якщо виріб мав однорідні властивості по всьому об'єму.

Неоднорідність властивостей по всьому об'єму виробу знижує його експлуатаційні стійкість; наприклад, якщо виріб знаходиться під механічною або струмовим навантаженням, можливий місцевий перегрів і розтріскування в ослаблених місцях. Різна щільність за обсягом сприяє передчасному зносу виробу при експлуатації.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було проаналізовано технологію обожігу електродних заготовок у випалювальних печах.

Для технологи виробництва електродів характерна багатостадійність. В ряду технологічних операцій «випал заготовок» є дуже важливою операцією і відноситься до найбільш відповідальною, тому що на цьому переділі електродам надаються цінні властивості.

Експериментальні дані показали, що з повільним підйомом температури в печі при випалюванні заготовок, їх механічні властивості покращуються, і зменшується усадка виробу.

При збільшенні швидкості підйому температури, а отже скорочення тривалості процесу випалу призвело до зменшення трудовитрат і зниження якості виробу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Соседов В.П. История развития углеродной промышленности. 1945–1990 гг. – М.: Аспект Пресс, 1999. – 264с.
2. Фиалков А.С. Формирование структуры и свойств углеграфитовых материалов. – М.: Химия, 1965. – 160с.
3. Крылов В.Н. и др. Производство угольных и графитовых электродов. М.: Metallurgizdat, 1967. - 320 с.
4. Чалых Е.Ф. Производство электродов. - М.: Metallurgiya, 1954. - 328с.
5. Степаненко М.А., Брон Я.А., Кулаков Н.К. Производство пекового кокса. - Харьков: Metallurgizdat., 1961.-311с.
6. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. М.: НПО ОБТ, 1996. - 165с.
7. Малчанов В.В., Попов В.К. Свойства каменноугольных пеков. - Кокс и химия, 1985. - 280с.
8. Кондратьев В.А., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. – М.: Наука, 1974. – 558с.
9. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. М.: Metallurgizdat., 1972. - 432 с.
10. Инструкция по режиму работы и безопасному обслуживанию автоклавов. Министерство промышленности строительных материалов, 1990. - 78с.
11. Скачков В.А., Середич В.И., Карпенко В.Д. Технология углеграфитовых материалов – Запорожье: ЗГИА, 2002. -191с.
12. Фиалков, А. С. Углеграфитовые материалы [Текст] / А. С. Фиалков. - М. : Энергия, 1979. - 320 с.
13. Веселовский, В. С. Угольные и графитные конструкционные материалы [Текст] / В. С. Веселовский. - М.: Наука, 1966. - 227 с.

14. Негуторов, Н. В. Влияние температуры коксования связующего на скорость нагрева углеродных заготовок при графитации [Текст] / Н. В. Негуторов, Д. М. Кузнецов // Кокс и химия. -1990. -№10. -С.19—21.

15. Производство электродной продукции [Текст] / [А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др.]. - М.: Metallurgy, 1985. - 129 с.

16. Исследования по жароупорным железобетонным и армокирпичным конструкциям [Текст]. Под ред. акад. Мурашева В.И. – ГИЛ по строительству и строительным материалам. – М.:1959, 132 с.

17. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме [Текст] / Е. С. Платунов - Ленинградское отделение: «Энергия». - 1973, 144 с.

18. Лутков, А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов [Текст] / А. И. Лутков. - М. : Metallurgy, 1990. - 176 с.

19. Бабалов, А. Ф. Промышленная теплозащита в металлургии [Текст] / А. Ф. Бабалов - М.: Metallurgy, 1971. - 359 с.