

## Лекція 4 ВИПАЛЕННЯ ЗАГОТОВОК

### 4.1 Поняття процесу випалення

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.

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.

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. 2.1).

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. 2.1).

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 2.1 – Порівняльна характеристика обпалювальних печей

Характеристика	30-камерна піч, не спеці- лізована	26-камерна піч, спеці- лізована	Печі з викочуванням подини для контейнерного випалення
<i>Випалення великогабаритних заготівель 500-710мм</i>			
Площа подини, м <sup>2</sup>	387	479	140
Коеф. використання, %	93,0	-	-
Подова продуктивність печей по завантаженню, т/(м <sup>2</sup> ·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
<i>Випалення заготівель, просочених пеком</i>			
Подова продуктивність печей по завантаженню, т/(м <sup>2</sup> ·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 згорання).

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 згорання 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.

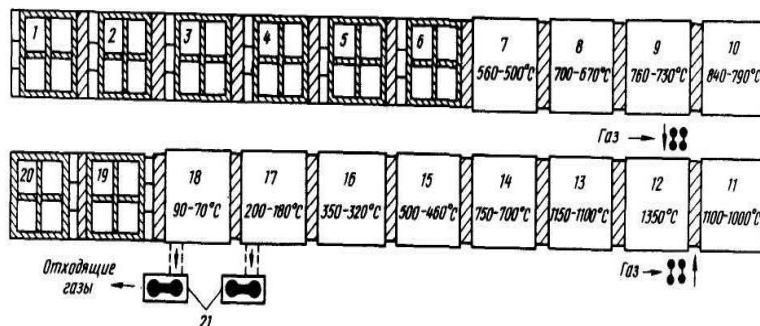
## 2.6.2 Схеми конструкції і принцип роботи печей

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 згорання. 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. 2.7 представлена схема багатокамерної обпалювальної печі.



1-20 - камери; 21 - перекидний патрубок

Рисунок 2.7 – 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 борони. Борон 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. 2.7. 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 виробу. 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 багатокамерних печах використовується тепло продуктів спалювання палива, що відходять, і тепло остигаючих виробів, тому багатокамерні печі є рекуперативними. З описаного вище витікає також, що вироби 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 багатокамерних 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 багатокамерної печі визначається по наступній формулі (для одного вогню) :

$$Q = 24 (q/t), \quad (2.4)$$

де  $Q$  - продуктивність печі, т/доб;

$q$  - завантаження однієї камери, т;

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

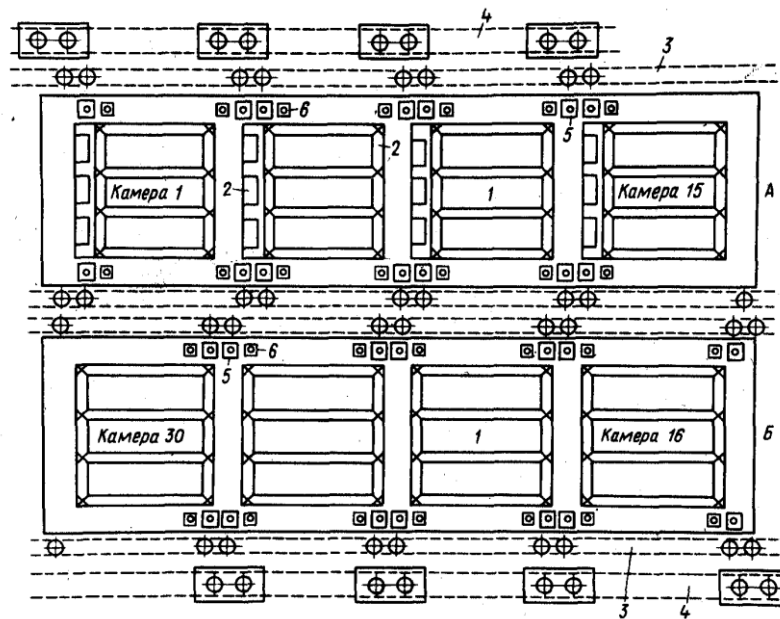
"Темп вогню" визначається діленням тривалості випалення в одній камері (режим випалення), вираженою в годинах, на число камер, що знаходяться на підігріванні і вогні. Цією ж формулою користуються при визначенні продуктивності печі, що працює на двох або трьох вогнях, тільки кінцевий результат множиться 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. 2.8 показаний план обпалювальної печі, в якій умовно приведено дві характерні конструкції камер.



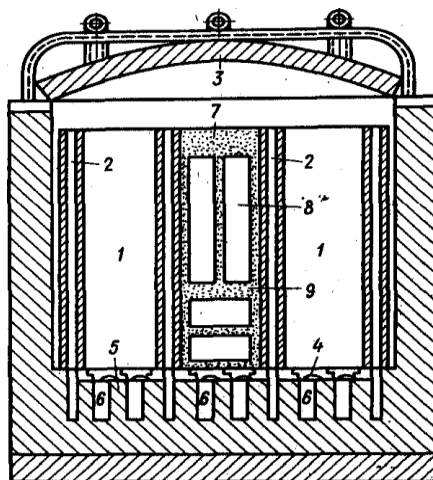
1 - муфель; 2 - вогнева шахта; 3 - газопровід; 4 - димовий боров; 5 - газовий канал; 6 – воздуховід

Рисунок 2.8 – 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. 2.9).



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 2.9 – Подовжній розріз по камері обпалювальної печі

Стінки муфелів викладаються з фасонної шамотної цеглини з каналами 2 усередині, через яких протікають гарячі газы, 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. 2.10 показаний розріз розділового простінка для камер, в яких вогневі шахти винесені в камеру, а на рис. 2.11 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. 2.11) або розташовуються сполучні канали з вогневими шахтами.

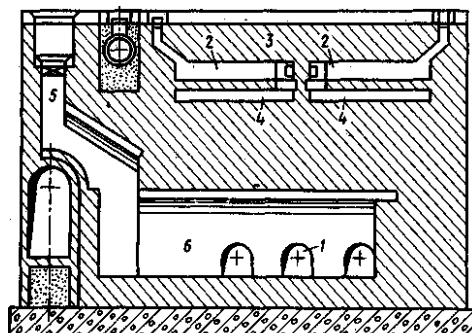
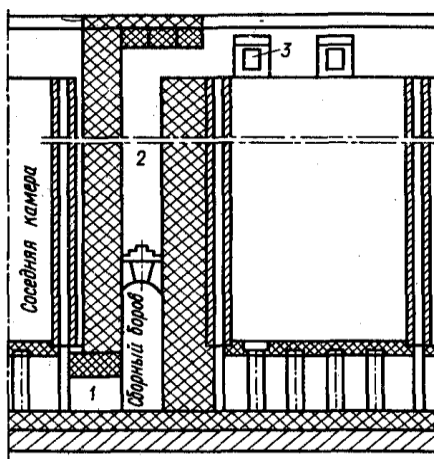


Рисунок 2.10 – Розділюючий простінок камери з вогневою шахтою



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

Рисунок 2.11 – Розділюючий простінок камери без вогневої шахти

У простінку (рис. 2.10) 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 гази 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 гази 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. 2.10. У нім 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 гази, 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 гази, 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 паливневим 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. 2.9). 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 паливневого 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.

### **2.6.3 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 багатокамерних 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. Його 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 250-300мм. 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 грюючих 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'язкопластичного 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. 2.2).

Таблиця 2.2 – Властивості засипного матеріалів

Засипний матеріал	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	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 піролізуються, 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 обпалюваних виробів.

## 2.7 Рідкофазне ущільнення

### 2.7.1 Явища на межі фаз

Просочення вуглецевих матеріалів проводиться з метою забезпечення високої щільності, малої газопроникності і високих фізико - механічних характеристик. Просочення здійснюється через рідку фазу із застосуванням імпрегнатів (пеков або смол) або розплавами металів примусово або за рахунок капілярної взаємодії.

З енергетичної точки зору поверхня вуглецевого матеріалу є термодинамічно нерівноважною гетерогенною системою, на межі якої при просоченні протікають різні фізико-хімічні міжфазні явища:

- 1) міжмолекулярні взаємодії усередині фаз і між фазами (когезія і адгезія);
- 2) поверхневі взаємодії (змочування і розтікання);
- 3) капілярні взаємодії;
- 4) дифузійні взаємодії.

#### *Когезія і адгезія.*

Когезія - це тяжіння атомів і молекул усередині окремої фази обумовлюється міжмолекулярними міжатомними взаємодіями різної природи.

Адгезія забезпечує зв'язок між двома тілами завдяки фізичним або хімічним міжмолекулярним силам.

Тому міжфазна взаємодія або взаємодія між приведеними в контакт поверхнями тіл різної природи називають адгезією.

Кількісними характеристиками когезійної адгезійної взаємодії є робота когезії ( $W_k$ ) і адгезії ( $W_a$ ) відповідно.

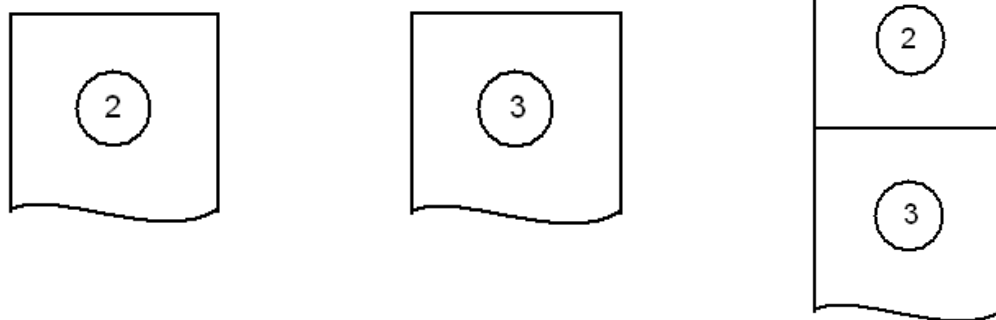
Робота когезії визначається витратою енергії на оборотний розрив тіла по перерізу, рівному одиниці площі. Так при розриві утворюється поверхня в дві одиниці площі, то робота когезії складає:

$$W_k = 2\sigma, \quad (2.5)$$

де  $\sigma$  – поверхневе натягнення тіла на межі з повітрям, Н·м.

Оскільки когезія відбиває міжмолекулярну взаємодію усередині гомогенної фази, то її можуть характеризувати такі параметри, як енергія пароутворення, летючість та ін.

Щоб отримати співвідношення між роботою адгезії і поверхневим натягненням взаємодіючих компонентів, уявимо собі дві фази, що конденсують, 2 і 3, поверхні, що мають, на межі з повітрям 1, рівним одиниці (рис 2.12)



$\sigma_{2,1}$

$\sigma_{3,1}$

$\sigma_{2,3}$

$\sigma_{2,1}$ ,  $\sigma_{3,1}$ ,  $\sigma_{2,3}$  поверхнєве натяжіння на границі фаз 2-1, 3-1, 2-3 відповідно.

Рисунок 2.12 – Схема взаємодії компонентів, що мають різне поверхнєве натяжіння

При поєднанні поверхонь 2 і 3 станеться явище адгезії з міжфазним натягненням рівним  $\sigma_{2,3}$ .

В результаті первинна енергія Гіббса системи зменшиться на величину, рівну роботі адгезії, т.е.

$$\Delta G + W_a = 0 \text{ или } W_a = -\Delta G. \quad (2.6)$$

Запишемо рівняння енергії Гіббса для початкового  $G_{\text{нач}}$  і кінцевого  $G_{\text{кон}}$  станів системи:

$$\begin{aligned} G_{\text{нач}} &= \sigma_{2,1} + \sigma_{3,1}; \\ G_{\text{кон}} &= \sigma_{2,3}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тоді зміна енергії Гіббса системи в процесі адгезії буде рівним:

$$\Delta G = G_{\text{кон}} - G_{\text{нач}} = \sigma_{2,3} - \sigma_{2,1} - \sigma_{3,1} \quad (2.8)$$

чи

$$W_a = \sigma_{2,1} + \sigma_{3,1} - \sigma_{2,3}. \quad (2.9)$$

Це рівняння є рівнянням Дюпре, з якого виходить, що робота адгезії тим більша, чим більше поверхнєве натяжіння початкових компонентів і чим менше кінцеве міжфазне натяжіння.



Міжфазне натяжіння стане рівним нулю, коли зникне міжфазна поверхня, що відбувається при повному розчиненні фаз, тобто коли

$$W_a \geq \sigma_{2,1} + \sigma_{3,1}. \quad (2.10)$$

Змочування - це поверхневе явище, що полягає у взаємодії рідини з твердим або рідким тілом.

При нанесенні краплі на поверхню, що має вищу щільність, ніж щільність речовини краплі можна спостерігати два процеси. Крапля або залишається на поверхні, набувши при цьому певної форми в результаті рівноваги, або крапля розтікатиметься по поверхні.

У зв'язку з тим, що з нанесенням краплі сталося зменшення твердої поверхні, то поверхнева енергія почне зменшуватися, прагнучи розтягнути краплю по поверхні. Величина її дорівнюватиме поверхневому натяжінню твердого тіла на межі з повітрям. Міжфазна енергія на межі твердого тіла з рідиною прагне, навпаки, стискувати краплю.

Кут змочування графіту водою рівний  $55^\circ$ . Різні рідини неоднаково змочують одну і ту ж поверхню. Краще змочує поверхню та рідина, яка ближче по полярності.

Розтікання рідини по твердому тілу характеризується коефіцієнтом розтікання  $K$ , який визначається рівнянням Гаркинса:

$$K = \sigma_{m-2} - (\sigma_{жс-2} \cos \theta + \sigma_{m-жс}) = w_a - w_k = w_a - 2\sigma_{жс-2} > 0. \quad (2.11)$$

Розглянуті закономірності справедливі для ідеально гладких і однорідних поверхонь твердих тіл. Вплив шорсткості може бути врахований за допомогою рівняння Дерягина-Венцеля:

$$\cos \theta_{шор} = K \cdot \cos \theta, \quad (2.12)$$

де  $K$  – коефіцієнт шорсткості.

Переміщення змочуючої рідини може відбуватися двояко: по механізму суцільного меніска і по механізму розтікання.

Принципова відмінність механізму розтікання від механізму суцільного меніска полягає в тому, що в процесі просочення величина  $\Delta S_{ж-г} = 0$  (для механізму розтікання), тоді як  $\Delta S_{ж-г} \neq 0$  для механізму суцільного меніска.

### 2.7.2 Кінетика процесів рідкофазного ущільнення

У класичній теорії просочення, розробленою Б.В.Дерягиним, глибина  $l$  проникнення рідини в капіляри, здійснювана по механізму суцільного меніска, визначається рівнянням:

$$l^2 = 2k \frac{S_o}{P^2} \sigma_{жс-г} \cos \theta \cdot t, \quad (2.13)$$

де  $k$ - коефіцієнт фільтрації, визначуваний з рівняння Дарсі, м/с;  
 $S_o$ -питома поверхня пор, м<sup>2</sup>/г;  
 $P$ - пористість матеріалу, %;  
 $t$ -час, с.

Рівняння справедливе для ламінарної течії рідини в капілярі під дією капілярного тиску і коли течія рідини підкоряється закону Пуазейля, наприклад, при просоченні рідким пеком або рідкими смолами. У разі коли просочення здійснюється під впливом зовнішнього тиску, наприклад в автоклаві, для вирішення завдання просочення використовується рівняння Дарсі:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\Delta P \cdot k \cdot F}{x \cdot \mu}, \quad (2.14)$$

де  $q$  - об'єм імпрегнату, що увійшов до пор, м<sup>3</sup>;  
 $x$  - товщина матеріалу, м;  
 $k$ - коефіцієнт проникності, (см<sup>3</sup>·мм)/(м<sup>2</sup>·с·Па);  
 $F$ - площа пластини, м<sup>2</sup>;  
 $\mu$  - в'язкість імпрегната, Па·с;  
 $\Delta P$  - різниця тисків на межах пластини, Па.

Коефіцієнт проникності визначається по формулі Лейбензона:

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\Delta P \cdot F}, \quad (2.15)$$

де  $Q$  – витрата рідини, м<sup>3</sup>;  
 $L$  – довжина пластини, м.

Вважаючи процес ізотермічним і пористість однакою в усьому об'ємі, різниця тиску на межі пластини визначається у вигляді:

$$\Delta P = P_{\text{нар}} + P_{\text{кап}} + P, \quad (2.16)$$

де  $P_{\text{нар}}$  - зовнішній тиск, Па;  
 $P_{\text{кап}}$  - капілярний тиск, Па;  
 $P$  - протитиск в середині пластини, Па.

Протитиск  $P$  у формулі (2.16) можна визначити із закону Бойля-Маріотта:

$$P = \frac{P_o}{1 - \delta}, \quad (2.17)$$

де  $\delta = x/L$ .

Після підстановки  $\Delta P$  в рівняння Дарсі, його послідовного диференціювання за початкових умов  $t=0$  і  $d=0$ , отримаємо:

$$\left(\frac{1 - \alpha}{2}\right)^2 Z^2 - \alpha(1 - \alpha)[Z + \ln(1 - Z)] = \frac{(P_n + P_k)k}{\mu L^2 \cdot \Pi_o} t, \quad (2.18)$$

де  $\alpha = \frac{P_o}{P_n + P_k}$  - показник вакуумування;  
 $Z$  – відносна міра просочення ( $Z = d/d_k$ );  
 $d_k$  – уявна щільність.

Приймаємо  $Z=0,99$  і дозволяючи рівняння відносно тривалості процесу просочення  $t$ , отримаємо наступне рівняння:

$$t = \frac{\mu \cdot L^2 \cdot \Pi_o}{(P_n + P_k)} \cdot 0,5(1 - \alpha)(1 + 6\alpha). \quad (2.19)$$

На практиці можливо і зворотний рух імпрегната в пластині, якщо зовнішній тиск імпрегната стане нижчий, ніж усередині пластини. Це може статися коли виробляється повторно вакуумування або пониження тиску в автоклаві.

Капілярний тиск розраховуємо по формулі:

$$P_{\text{кан}} = \frac{2\sigma}{(r / \cos \theta)}, \quad (2.20)$$

де  $\sigma$  – поверхневе натягіння, Н/м;  
 $r$  – радіус капіляра,  $1 \cdot 10^{-3}$  м;  
 $\theta$  – крайовий кут змочування, град.

Практично достатнім є проведення 5-6 просочень. Наступні просочення ефекту не дають.

### 2.7.3 Управління операцією просочення

Призначення операції просочення - заповнення вільних пор обпалених заготівель пеком для підвищення фізико-механічних характеристик заготівель при їх подальшій термічній обробці. Просочення заготівель може бути одноразовим і багатократним.

Для просочення використовується пек кам'яновугільний просочувальний, відповідний контрактам і договорам з постачальниками.

Технологічна схема операції просочення обпалених заготівель представлена на рис. 2.13.

Технологічна операція просочення складається з наступних операцій:

- подача пека в мірні ємності і підготовка пека;
- нагрів заготівель в електропечах;
- завантаження кошиків із заготівлями в просочувальну ванну;
- переміщення просочувальної ванни із заготівлями в автоклав і закриття кришок автоклава;
- створення вакууму в автоклаві;
- заповнення просочувальної ванни пеком;

- створення робочого тиску в автоклаві, просочення заготівель під тиском, вичавка пека з просочувальної ванни, і з порожнини автоклава (при необхідності);
- зняття тиску в автоклаві, продування автоклава повітрям;
- розвантаження автоклава, охолодження заготівель;
- розвантаження просочувальної ванни і заготівель з просочувальних кошиків;
- визначення міри просочення заготівель;
- злив відпрацьованого пека.

Технологічні параметри операції просочення обпалених заготівель, які необхідно контролювати в процесі управління процесом приведені в таблиці 2.3.



Рисунок 2.13 - Технологічна схема просочення обпалених заготівель

Таблиця 2.3 - Основні технологічні параметри контрольовані при веденні технологічного процесу

Контрольований технологічний параметр	Розмірність	Нормативні значення технологічних параметрів
1 Пек в робочій місткості: - температура розм'якшення - температура спалаху - в'язкість умовна	°C °C с	не більше 73 не менше 210 не більше 70
2 Температура газового середовища в електропечі при витримці	°C	380±20
3 Температура верхнього ряду завантажуваних заготівель в автоклав (заміряється перед подачею ванни в автоклав)	°C	230±10
4 Температура пека, що заливається в просочувальну ванну з робочих місткостей	°C	190±10
5 Залишковий тиск при вакуумуванні в автоклаві	Па	не більше $5,32 \cdot 10^3$
6 Робочий тиск при просоченні	Па	$10 \cdot 10^3 - 12 \cdot 10^3$

Кількість пека, що заливається в просочувальну ванну визначається по формулі:

$$H = \frac{V_1 - (V_2 + V_k)}{F}, \quad (2.21)$$

де  $H$  - висота стовпа пека в мірній місткості, яку заливають в просочувальну ванну, м;

$V_1$  - місткість просочувальної ванни ( $10\text{м}^3$ ),  $\text{м}^3$ ;

$V_2$  - об'єм завантажуваних заготівель,  $\text{м}^3$ ;

$V_k$  - об'єм кошиків,  $\text{м}^3$ ;

$F$  - площа перерізу мірної місткості (4,19),  $\text{м}^2$ .

Приріст заготівлі визначається по формулі:

$$P_{np} = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \cdot 100\%, \quad (2.22)$$

де  $P_{np}$  - величина приросту, %;

$D_1$  - вага заготівлі до просочення;

$D_2$  - вага заготівлі після просочення.

Приріст графітованих заготівель після першого просочення має бути не менше 12%, після другого просочення - не менше 6%, після третього просочення - не менше 3%.