

## Зміст

	стр.
ВСТУП.....	5
<b>1 ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПЕЧЕЙ</b> .....	<b>7</b>
1.1 Фундаменти і черинь печей.....	7
1.2 Стіни і склепіння печей .....	11
1.3 Металевий каркас печей .....	15
1.4 Димоходи й трубопроводи .....	19
<b>2 ВОГНЕТРИВКІ ТА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ</b> .....	<b>22</b>
2.1 Загальні властивості вогнетривких матеріалів .....	23
2.2 Теплоізоляційні матеріали.....	29
2.3 Будівельні матеріали і метали .....	31
<b>3 ВИДИ НАГРІВУ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ</b> .....	<b>35</b>
3.1 Паливний нагрів .....	35
3.2 Електричний нагрів.....	41
3.2.1 Нагрів в печах опру.....	43
3.2.2 Індукційний нагрів в каналних печах .....	51
3.2.3 Індукційний нагрів в тигельних печах.....	56
3.2.4 Дуговий і плазмовий нагрів.....	60
3.2.5 Електронно-променевий нагрів.....	64
<b>4 КЛАСИФІКАЦІЯ І КОНСТРУКЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ</b> .....	<b>74</b>
4.1 Паливні печі.....	77
4.1.1 Відбивні плавильні печі.....	77
4.1.2 Полум'яні нагрівальні печі.....	96
4.1.3 Шахтні печі.....	104
4.1.4 Трубчасті обертові печі .....	113
4.1.5 Печі киплячого шару.....	116
4.2 Електричні печі .....	124
4.2.1 Печі опору.....	124
4.2.2 Індукційні каналні печі .....	134
4.2.3 Індукційні тигельні печі .....	141
4.2.4 Дугові руднотермічні печі .....	147
4.2.5 Дугові вакуумні печі .....	154
4.2.6 Електронно-променеві печі .....	162
4.3 Агрегати хлорування .....	167
4.4 Апарати ректифікаційного очищення сполук.....	181

4.5 Апарати відновлення .....	187
4.6 Установки одержання монокристалів.....	195
<b>5 ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ</b>	
<b>МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ .....</b>	<b>209</b>
5.1 Теплова потужність .....	209
5.2 Питома витрата тепла .....	211
5.3 Продуктивність .....	213
5.4 Тепловий дефіцит.....	214
5.5 К.К.Д печі .....	215
<b>ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ .....</b>	<b>218</b>
<b>ПРЕДМЕТНИЙ ПОКЖЧИК .....</b>	<b>228</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>230</b>

## ВСТУП

Основним технологічним обладнанням для виробництва кольорових металів і сплавів пірометалургійним способом є високотемпературні металургійні печі різної конструкції. Металургійними печами називають теплове обладнання, яке призначено для здійснення технологічних процесів при нагріванні матеріалів до температури, необхідної для одержання металів і сплавів необхідних властивостей.

Основним видом енергії металургійних печей є тепло, яке передається матеріалам, що нагріваються. Теплотехнічний процес генерації теплоти в печі й передачі її матеріалам складає сутність теплової роботи печі.

Сучасні печі являють собою різноманітні за конструкцією, складні теплові агрегати. Вони складаються із власне печі й допоміжного обладнання. Власне піч містить у собі робочий простір і обладнання для генерації теплоти: пальника, форсунки, фурми в паливних печах і електроди, резистори в електричних печах.

До складу допоміжного устаткування входить обладнання для утилізації теплоти й очищення димових газів, що виходять із печі, вентилятори, димососи, трубопроводи із клапанами та засувками, димарі, контрольно-вимірювальні прилади й обладнання для керування піччю.

В одних випадках технологічний процес може відбуватися в робочому просторі печі одночасно з теплотехнічним (при виплавці металу, випалі вогнетривів, при термообробці виливків), в інших випадках технологічний процес іде за теплотехнічним і відбувається поза піччю (при нагріванні злитків і заготовок перед обробкою тиском: прокаткою, куванням, пресуванням).

Дисципліна «Конструкції металургійних агрегатів у кольоровій металургії» необхідна для написання студентами дипломного проекту. У результаті вивчення даної дисципліни студент повинен: знати класифікацію й властивості сучасних металургій-

них агрегатів і області їх застосування; уміти аналізувати застосування різних металургійних агрегатів у конкретних умовах виробництва кольорових металів; уміти визначити економічну ефективність застосування металургійних агрегатів; уміти здійснити конструктивний розрахунок металургійного агрегату, обладнання.

У даному навчальному посібнику вивчаються основні конструкційні елементи металургійних печей кольорової металургії, їх теплова робота; розглядаються конструкції металургійних агрегатів, застосовуваних у виробництві різних кольорових металів і сплавів.



# 1 ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПЕЧЕЙ

## 1.1 Фундаменти і черинь печей

Фундамент печі є основою, на якій споруджується металургійна піч, і призначений для передачі її маси на ґрунт. Звичайно при проектуванні печей тиск на ґрунт допускається не більш 250 кПа. Щоб уникнути перекосу фундаменту і його розтріскування навантаження повинно бути рівномірним по всьому периметру підшви фундаменту. У якості матеріалу для спорудження фундаментів застосовують бутовий камінь, бетон і будівельну цеглу, шар якої кладеться на бетонну подушку або бутовий камінь. При кладці фундаментів відбивних печей часто застосовують комбінування бетону з рідким жужелем, при цьому нижня частина фундаменту товщиною 0,6...0,9 м робиться з бетону, а поверх нього й між вертикальними стінками заливають рідкий жужіль. Затверділа маса жужелю товщиною 1,2...1,8 м і є основною масою фундаменту.

Глибина закладки фундаменту і його товщина залежать від характеру ґрунту, рівня ґрунтових вод і маси печі. Для великих печей (відбивних і інших) фундаменти закладаються на глибину до 2 м. Якщо спорудження печі ведеться поза опалювальним приміщенням на ґрунті, що промерзає, підшва фундаменту повинна перебувати нижче глибини промерзання ґрунту. На вологих ґрунтах для зниження рівня ґрунтових вод перед закладкою фундаменту на заданій ділянці слід провести дренажні роботи або захищати фундамент від проникнення в нього ґрунтових вод застосуванням гідроізоляційних матеріалів (руберойду й ін.). Якщо деякі елементи печей (регенератори, лежаки) виявляються розташованими нижче рівня ґрунтових вод, їх зводять у спеціальних водонепроникних зварених кесонах з м'якої сталі, які встановлюються на фундаменті. Фундамент слід захищати від

впливу високих температур. Температура на поверхні фундаменту не повинна перевищувати 250 °С.

Черінь (подова плита) печей залежно від конструкції й призначення печі споруджується або безпосередньо на фундаменті без нижнього охолодження, або з повітряним нижнім охолодженням. В останньому випадку він споруджується на сталевих листах, чавунних плитах або в металевих кожухах (для плавильних печей), встановлених на стовпах фундаменту або на поперечних балках, які лежать на фундаменті. Відстань між балками 300...400 мм забезпечує достатню для охолодження череню циркуляцію повітря. На фундаменті або відповідних листах викладається кілька шарів цегли спочатку теплоізоляційної, потім вогнетривкої, на якій встановлюють під.

У плавильних печах черінь – одна із самих відповідальних частин їх конструкції, що вимагає старанності виконання й догляду. Наявність у черені навіть малих щілин може привести до витоку металу з печі й аварії. Для запобігання витоку металу з ванни всю піч до верхнього рівня металу містять у металевий кожух. Розміри й форма череню плавильних печей залежать від призначення і ємності печі. Зазвичай уздовж печі черінь робиться більш низьким у середній частині з підйомом до країв. У поперечному напрямку черінь частіше має форму зворотної арки, що захищає від спливання у важкому металі більш легкої футерівки. Відношення ширини до довжини череню коливається в широких межах і визначається продуктивністю та призначенням печі. Товщина череню може бути від 400 до 1200 мм залежно від ємності печі.

Верхній шар череню робиться або наварюванням або викладається з вогнетривкої цегли. При пристрої наварного череню залежно від складу шихти й характеру жужелів застосовують кварцити або магнезит, динас або магнезито-хроміт. Іноді кладку роблять комбінованою – черінь і нижню частину стіни з кварцитів, а стіну на рівні жужелю з магнезиту. Матеріал для наварного череню повинен мати гарну спікливість, інакше черінь буде ме-

ханічно неміцним, і окремі шматки його можуть спливати на поверхню металу. Здатність добре спікатися мають кварцити, що містять не менш 90 %  $SiO_2$  і не більш 3 %  $Al_2O_3$ . Вміст у набивній масі деякої кількості  $Fe_2O_3$  і  $CaO$  сприяє підвищенню спікливості. При відсутності домішок спікливість кварцитів підвищується при додаванні невеликої кількості вапна або вогнетривкої пластичної глини. Усі матеріали повинні бути розмелені до розмірів зерен 1...3 мм. Перед застосуванням матеріал повинен прожарюватися для повного видалення вологи й органічних домішок.

Черінь наварюють на повну товщину або шарами. У першому випадку розмелений вогнетрив з відповідними добавками в холодній печі щільно втрамбовують пошарово (при товщині шару близько 100 мм) до повної товщини череню. При трамбуванні череню надається необхідна форма. Товщина вогнетривкового набивання 300...700 мм залежно від призначення й розміру печі. По закінченню будівництва печі її повільно й добре просушують, а потім поступово нагрівають до 1400...1500 °С. При цій температурі відбувається спікання верхніх шарів набивання. Черінь наварюють шарами в гарячій печі. У розігріту до 1200...1300 °С піч закидають вогнетривку набивну масу шарами до 100...120 мм товщиною. Після спікання першого шару закидають наступний і так до одержання необхідної товщини. Черінь виходить міцним, але процес наварювання дуже тривалий.

Цегельний черінь викладають із клинової цегли у вигляді зворотного склепіння. Добре викладений цегельний черінь має високу механічну міцність. У порівнянні з наварним черенем цегельний під значно менше усмоктує розплавлений метал, однак наявність швів робить його більш проникним для розплаву. Крім того, виготовлення цегельного череню значно дорожче.

У нагрівальних печах черінь роблять пласким – верхню частину череню виконують із шамоту або талькової цегли, а у високотемпературних печах – із хромомagneзитових цегл або хромітової набивної маси. Товщина череню 230...460 мм. У методичних печах де матеріал, що нагрівається, повинен переміщатися

по череню печі від входу до виходу, необхідні спеціальні обладнання, що полегшують це переміщення. Найпростішим обладнанням є напрямні (глісажні шини) у вигляді чавунних або сталевих прямокутних брусків, розташованих безпосередньо на черені або на спеціальних стовпчиках. Однак такі напрямні можуть застосовуватися тільки при температурах нижче 700 °С. При більш високих температурах у якості напрямних використовуються сталеві труби з водяним охолодженням. Для зменшення зношування труб на них зверху наварюють круглу або прямокутну (20x15 мм) смугу – шину. При розміщенні напрямних на стовпчиках нагрів заготовок відбувається не тільки зверху, але й знизу. Для зменшення теплових втрат з охолодженою водою труби повинні мати теплову ізоляцію.

Для просування злитків по напрямних використовуються спеціальні штовхачі. У невеликих термічних печах при нагріванні дрібних заготовок застосовують спеціальні піддони, у які завантажують заготовки. На виході з печі їх вивантажують, а піддони повертають до вікна завантаження. Для транспортування через піч легких заготовок будь-якої форми зручний конвеєрний черінь. Стрічка конвеєра складається з ланок, виконаних з жароміцних сплавів або для температур вище 900 °С з кераміки.

У термічних печах застосування роликового череню дозволяє здійснити переміщення листового матеріалу, що нагрівається. Усі ролики при цьому є ведучими. Для високотемпературних печей вісь роликового валу роблять із водяним охолодженням, а самі ролики – з жароміцної сталі або з кераміки. Кільцеві печі з рухливим черенем у вигляді плоского кільця застосовують для нагрівання коротких і важких заготовок.

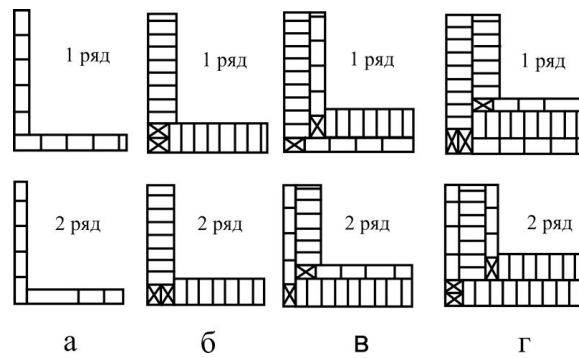
Для термообробки важких злитків широко використовуються печі з висувним черенем. Пересувається черінь за допомогою електроприводу, вивантажується й завантажується краном. Вантажопідйомність такого череню практично необмежена.

## 1.2 Стіни і склепіння печей

Стіни печей кладуть із вогнетривких цегл або монтують із блоків цегл, підготовлених заздалегідь. В окремих випадках застосовують цегли спеціальних форм і розмірів. Найбільш слабе місце вогнетривкої кладки – шви, тому їх слід робити якомога тонше. Залежно від товщини шва розрізняють наступні категорії кладки – особливо ретельна (1 мм), ретельна (2 мм), звичайна (3 мм), бутова (5 мм). Шви заповнюються вогнетривкими розчинами (або мертелями), причому густі розчини використовуються при бутових муруваннях, напівгусті – при звичайних і рідкі – при ретельних. Тому що призначення розчинів при кладці стін металургійних печей полягає тільки в ущільненні швів, а не у зв'язуванні кладки, тому для забезпечення міцності й стійкості всього масиву кладки необхідна перев'язка швів і кріплення металевою арматурою. Поперечні вертикальні шви перев'язують зсувом цегл верхнього ряду на  $\frac{1}{2}$  або  $\frac{1}{4}$  цегли стосовно нижнього. Перев'язка поздовжніх вертикальних швів досягається чергуванням по висоті кладки вертикальних і горизонтальних рядів (рис. 1.1). Стіни в одну цеглу кладуть тільки вертикальними рядами. У кутах стін для одержання правильної перев'язки застосовують неповномірні цегли, рівні по довжині  $\frac{3}{4}$  і  $\frac{1}{2}$  цілої цегли.

Товщина стін визначається в основному тепловим розрахунками печі і її розмірами. При невеликій товщині стін втрата тепла буде більшою й будівельна міцність печі мала, однак при великій товщині сильно зростає її вартість і маса кладки. Останнє особливо небажане для печей періодичної дії, коли витрата тепла на розігрів печі визначається її масою.

Стіни нагрівальних печей робляться вертикальними, стіни плавильних печей – вертикальними тільки зовні, а усередині похилими зі стовщенням у нижній частині ( для збільшення міцності й терміну служби).



а) у півцегли; б) в одну цеглу; в) у півтори цегли; г) у дві цегли

Рисунок 1.1 – Кладка стін з перев'язкою кутів при різній товщині стін [2]

Лицьова сторона стіни, звернена до робочого простору, повинна викладатися тільки цілою цеглою, тому що жужелестійкість цілої поверхні цегли вище, ніж у зламі. Для захисту від дії жужелів, золи й газів вогнетривкий матеріал покривають вогнетривкою обмазкою, яка не тільки збільшує термін служби кладки, але й надає їй більшу механічну міцність і газонепроникність. Іноді обмазку наносять і на зовнішню поверхню стін.

Для компенсації розширення стін при нагріванні в кладці роблять температурні шви. Середня сумарна величина температурних швів на 1 пог. м кладки повинна бути для шамоту 5...6 мм, для динасу 10...12 мм, для магнезиту 8...10 мм. Щоб уникнути підсмоктування повітря й витoku газу температурні шви звичайно заповнюються злегка зволоженою вогнетривкою масою.

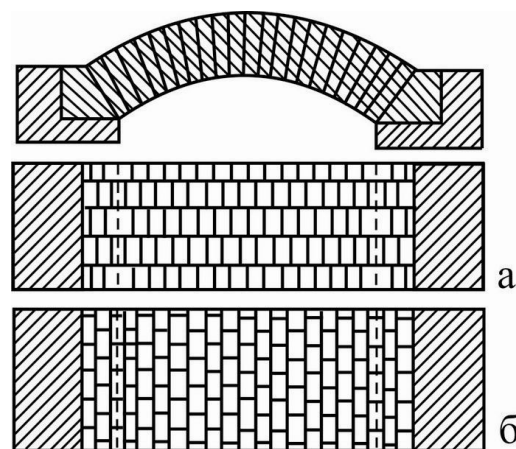
Звичайно кладку стін нагрівальних печей роблять із шамоту. Для плавильних печей, крім шамотної цегли, застосовують динасову, магнезитову й хромомагнезитову.

У стінах печей завжди робляться отвори – робочі й оглядові вікна, отвори для горілок і форсунок та ін. Їх слід робити так, щоб не послабити кладку й не порушити герметичність. Для цього прорізи вікон перекриваються аркою або спеціальними брусами, а металеві рами вікон і заслінки кріпляться до каркаса печі.

Склепіння металургійних печей виконують головним чином у вигляді арок – аркові склепіння, або у вигляді горизонтальних перекриттів – плоскі підвісні склепіння. Аркове склепіння роблять у невеликих печей шириною не більш 4 м, тому що під дією власної ваги й високої температури аркове склепіння дає великий розпір (горизонтальну складову зусилля на опору). Розпір тим більше, чим більш полого арка. При проектуванні звичайно задаються підйомом склепіння, тобто відношенням стріли склепіння до ширини печі, рівним  $1/10 \dots 1/12$ .

Товщина склепіння залежить від довжини прольоту й температури печі. Для малих печей шириною до 1 м товщина кладки склепіння з теплоізоляцією 230...380 мм, для великих печей шириною більш 3,5 м товщина кладки 450...500 мм.

Склепіння кладуть з клинової цегли або з комбінації клинової цегли із прямим. Кладку можна вести двома способами – окремими кільцями або перев'язом (рис.1.2). При першому способі цегли укладаються рядами поперек печі. Це дає можливість окремим кільцям розширюватися незалежно й дозволяє здійснювати більш швидкий ремонт склепіння. При другому способі всі цегли склепіння перев'язуються. Конструкція такого склепіння більш міцна, але ремонт стає складнішим.



а) кладка кільцями; б) кладка перев'язом

Рисунок 1.2 – Способи кладки аркового склепіння [2]

Для кладки аркового склепіння зводиться опалубка, яка встановлюється на черінь. Опорні частини склепіння, його п'яти, опираються або безпосередньо на поздовжні стіни печі, або на швелери (підп'ятні балки), покладені на стіни. П'яти можуть бути виготовлені з нормальної цегли або викладені зі спеціальної фасонної цегли. Кладка склепіння повинна правильно, по радіусу арки, примикати до п'ят. Застосування швелерів для опори склепіння звільняє стіни від розпірного навантаження, при цьому розпірне зусилля передається на каркас печі. Крім того, застосування швелерів дозволяє запобігти випинання склепіння при нагріванні печі, тому що, відпускаючи болти каркаса в момент нагрівання, можна забезпечити склепінню можливість вільно розширюватися в поперечному напрямку. Опора склепіння на швелери використовується головним чином у плавильних печах. Для забезпечення термічного розширення склепіння в поздовжньому напрямку його викладають із окремих секцій довжини 3...7,5 м із зазорами 40...60 мм між ними.

Іноді в конструкціях печей роблять знімне аркове склепіння з однієї або двох секцій. У цьому випадку п'яти склепіння опираються на тверду литу або зварену раму. Знімним сферичним склепінням перекриваються, наприклад, дугові печі для відновлення нікелю із закису. Така конструкція склепіння дозволяє швидко міняти його у випадку прогорання. Для створення більшої герметичності іноді використовують пісочний затвор, усередину якого при опусканні склепіння входять спеціальні виступи, зроблені у п'ят.

Для нагрівальних і плавильних печей із шириною прольоту більш 4 м значне поширення одержали плоскі підвісні склепіння. У підвісному склепіння цегли або набрані із цегли секції за допомогою сталевих анкерів і тримачів підвішуються до поперечних балок каркаса печі. Основні переваги підвісного склепіння наступні: 1) стіни печі не несуть навантаження склепіння; 2) для обладнання склепіння не потрібно опалубки; 3) ремонт склепіння може бути здійснений без зупинки печі; 4) ширина печі або ве-



личина прольоту може бути значною; 5) для обладнання склепіння не потрібно висококваліфікованих мулярів. Однак на обладнання підвісного склепіння витрачається багато металу.

У плавильних печах для одержання більшої герметичності влаштовується комбінований розпірно-підвісне склепіння. У цьому випадку склепіння набирається з підвісних блоків так, що вони утворюють арку. Розпір, що частково зберігається, сприяє ущільненню швів між блоками. Блоки зібрані з окремих цегл на сталевих пластинах.

Матеріалами для склепіння печей можуть бути шамот, ди-нас, магнезит, хромомagneзит. Шамот застосовують тільки при температурі в печі не вище 1300 °С, тому що при більш високій температурі значно знижується його механічна міцність. Магнезит має малу термічну стійкість і високу теплопровідність, тому щоб уникнути розтріскування цегл від нерівномірного нагрівання й більших теплових втрат магнезитове склепіння зовні слід покривати теплоізоляцією. При виборі матеріалу для склепіння слід ураховувати не тільки температурний режим печі, але й хімічний склад жужелів, а також пилу й золи (при застосуванні пилуватого палива).

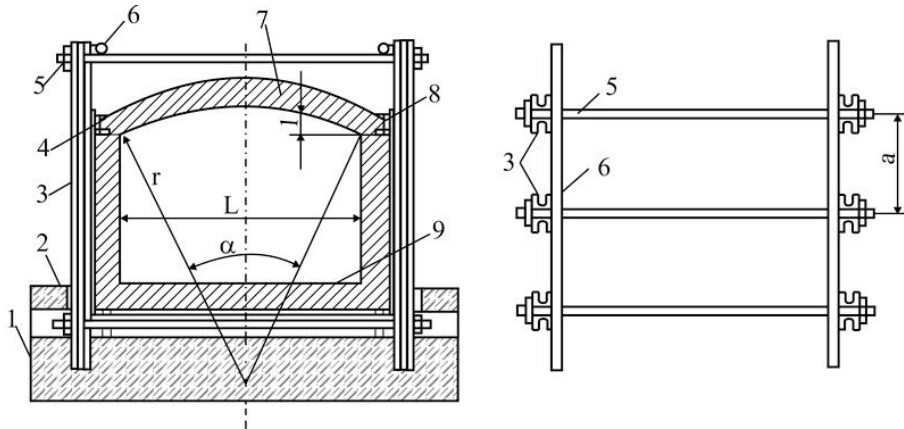
### **1.3 Металевий каркас печей**

Металевий каркас у конструкції печей, скріплюючи кладку, збільшує міцність стін, сприймає на себе зусилля, що виникають у кладці при нагріванні, і зусилля розпіру склепіння. Крім цього, каркас є основою, на якій кріпляться рами робочих вікон, заслінки, завантажувальні й інші обладнання металургійних печей.

Каркаси монтують на фундаменті печі. Звичайно каркас складається з вертикальних стійок, горизонтальних зв'язків і балок. Стійки каркаса роблять із одного, двох або трьох швелерів, двотаврові балок або балок інших профілів і розташовують їх з

боків і торців печі. У печах невеликих розмірів функції каркаса іноді виконують металеві кожухи, в які вони вкладені.

Каркаси можуть бути трьох типів – рухливі, жорсткі й комбіновані. У рухливих (рис. 1.3) каркасів стійки протилежних сторін попарно зв'язуються за допомогою сталевих болтів зв'язків круглого перетину.



1) фундамент; 2) нижній зв'язок; 3) стійка; 4) під'ятна балка; 5) верхній зв'язок; 6) поздовжній зв'язок; 7) склепіння; 8) п'ятова цегла; 9) черинь

Рисунок 1.3 – Обладнання рухливого каркасу печі [2]

Накладка, що з'єднує швелера стійки, служить опорою для шайби болтового з'єднання зв'язки. При розігріві печі ці болтові з'єднання поступово відпускають, що дасть можливість кладці вільно розширюватися. При охолодженні печі натяг зв'язків відновлюють. Застосування пружин або дерев'яних прокладок, поміщених під шайби, дозволяє в не значній мірі відпускати болтові з'єднання, і при охолодженні печі вони залишаються досить натягнутими.

Знизу, на рівні фундаменту, стійки рухливого каркаса також стягаються зв'язками. Так як ці зв'язки, якщо вони пропущені через кладку, можуть нагріватися, а при тривалім нагріванні сталь міняє свою структуру й стає тендітною, слід передбачати повітряне охолодження зв'язків.

Застосування рухливого каркасу дозволяє для невеликих печей не робити температурних швів у кладці, однак необхідність регулювання натягу зв'язків сильно ускладнює обслуговування печей. Тому в теперішній час застосовують в основному жорсткі (рис. 1.4, а) каркаси й рідко комбіновані (рухливий зв'язок тільки вгорі) (рис. 1.4, б). При твердому каркасі в кладці повинні бути температурні шви для компенсації температурного розширення. Стійки каркаса в цьому випадку з'єднуються нерухомо поперечними балками, нижні кінці стійок зашпаровуються в кладку фундаменту або в спеціальні черевики. До поздовжніх швелерів каркаса або до чавунних плит, що притискаються до кладки печі вертикальними стійками, кріпляться рами робочих і оглядових вікон.

Вікна закриваються заслінками або дверцятами, які також кріпляться на каркасі. Заслінки повинні щільно закривати вікна, бути по можливості теплоізоляційними й мати достатню стійкість до впливу високих температур. Звичайно заслінка (рис. 1.5) складається із чавунного корпусу, усередину якого закладається вогнетривка цегла або вогнетривка маса.

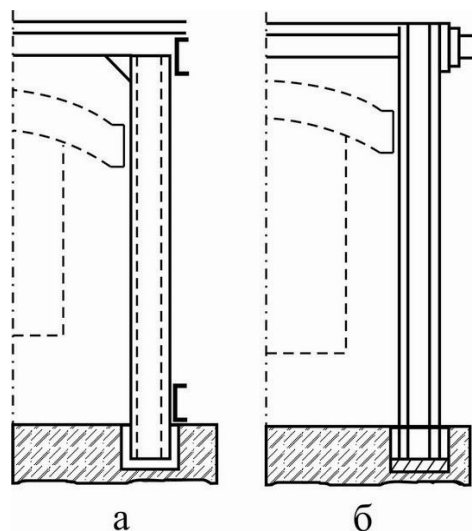
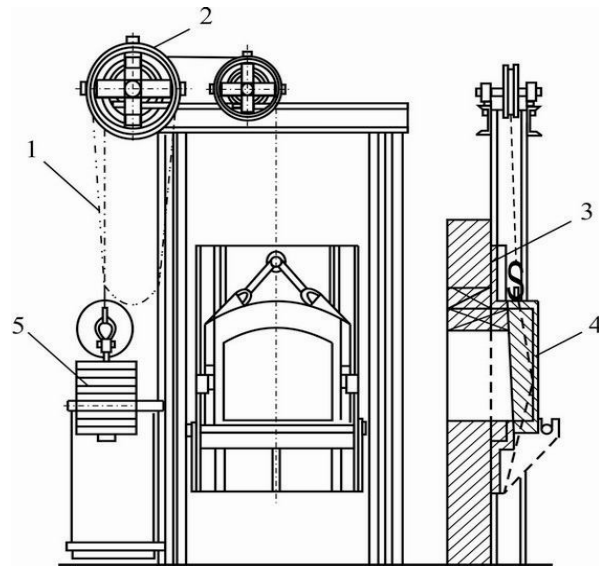


Рисунок 1.4 – Схема обладнання жорсткого (а) і комбінованого (б) каркасів



1) ланцюг; 2) ланцюгове колесо; 3) рама; 4) заслінка; 5) противага

Рисунок 1.5 – Заслінка з ланцюговим механізмом для підйому [2]

Заслінки для печей з робочою температурою до 1000 °С можна робити із трепельної цегли. При застосуванні вогнетривкої цегли кладку роблять у чверть цегли із зовнішнім ізоляційним шаром. Для великих вікон (наприклад, у нагрівальних печах) і у високотемпературних печах заслінки й рами вікон робляться з водяним охолодженням.

Заслінки підвішуються на сталевих тросах або ланцюгах і піднімаються за допомогою блоків і роликів ручною або електричною лебідкою, а на великих печах – електричними або пневматичними приводами. При відкриванні й закриванні заслінка сковзає по направляючій рами вікна, укріпленої на каркасі печі. Для зменшення зусиль при підйомі заслінку врівноважують противагою. Дверцята на петлях застосовуються лише на невеликих печах.

## 1.4 Димоходи й трубопроводи

Продукти горіння відводяться з робочого простору печі в лежак, що з'єднують піч з димарем. У нагрівальних печах димові гази виводяться через отвір у черені печі, у плавильних – через задню торцеву стінку або через склепіння. Відвід через торцеву стінку, крім кращого використання тепла, має конструктивну перевагу – не послабляє кладку склепіння.

Звичайно швидкість руху продуктів горіння в лежаках при нормальних умовах приймається рівним 1,5...3 м/с (верхнє значення при температурі газу 300...400 °С, нижнє – при температурі 600...800 °С). Перетин лежаків повинний бути не менше 500x600 мм, що забезпечує можливість людині проводити його чищення. Лежак укладають у землю, причому товщина шару землі над лежаком повинна бути не менш 300 мм.

У вологих ґрунтах лежаки розташовують у водонепроникний кожух. Вибір матеріалу для футерівки лежаків визначається температурою продуктів горіння. Зазвичай для цього використовують шамотну цеглу. Зовнішній шар роблять із червоної цегли. Склепіння лежаків часто викладають у вигляді півкола (півциркульне склепіння) для зменшення зусилля розпіру.

Перетин газопроводів і повітропроводів визначають також по прийнятих швидкостях руху газу або повітря, які залежать від ступеня очищення газу, а для повітря – від його температури. Для чистого газу швидкість ухвалюється рівною 8...10, для неочищеного 1...3 м/с. Для холодного повітря швидкість руху по трубах рекомендується ухвалювати 8...12 м/с, для нагрітого – залежно від температури 3...6 м/с. При розрахунках трубопроводів високого тиску допускаються більші швидкості.

Для холодних газів і повітря трубопроводами служать металеві труби, для гарячих – труби, які футерують вогнетривкими матеріалами. При невисокій температурі газу й повітря, безпечній для матеріалу трубопроводу, він ізолюється тільки зовні теп-

лоізоляційними матеріалами. При проектуванні трубопроводів слід враховувати необхідність їх герметизації.

Для регулювання тиску в пічному просторі й тяги в лежаках служать димові шибери, встановлені в лежаках. При температурах газів, що відходять, до 600 °С шибери виготовляють литими із сірого чавуну. При температурах вище 600 °С застосовують шибери, які футерують вогнетривкими матеріалами або з водяним охолодженням. Для більш щільного перекриття шибери в лежаках встановлюються з нахилом убік димової труби.

У газопроводах для відключення газу також використовують клапани й заслінки різних типів. Для регулювання витрати газу користуються дросельними клапанами. Димарі служать для створення тяги при видаленні з печі продуктів горіння. Труби бувають трьох типів – цегельні, залізобетонні й металеві. Чим вище труба, тим сильніше тяга, однак зі збільшенням висоти різко зростає вартість їх спорудження.

Цегельні труби найдорожчі. Залізобетонні труби трохи дешевше цегельних, причому різниця у вартості збільшується з висотою. Тому високі труби (до 180 м) виготовляють із залізобетону, якщо температура димових газів не перевищує 500 °С. Металеві димарі будуються висотою до 100 м. Спорудження їх приблизно в півтора рази дешевше цегельних, але термін служби їх майже у два рази менше.

У середині димарі футерують вогнетривкою цеглою. Футерівка викладається уступами, що забезпечує її вільне розширення при нагріванні. Нижня циліндрична частина димової труби називається цоколем, верхня – голівкою.

### **Питання для самоконтролю**

- 1) Назвіть основні конструктивні елементи металургійних агрегатів.
- 2) Що таке черінь печі?

- 3) Які функції виконує фундамент печі?
- 4) Яким буває черінь у печі?
- 5) З яких матеріалів виготовляють стіни й склепіння печі?
- 6) Призначення металевого каркаса печі.
- 7) Призначення й функції димоходу печі?
- 8) З яких матеріалів виготовляють трубопроводи й димоходи печі?

## 2 ВОГНЕТРИВКІ ТА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

При спорудженні металургійних печей поряд зі звичайними будівельними матеріалами – залізобетоном, бетоном, будівельною цеглою – широко використовуються матеріали спеціального призначення – вогнетривкі, теплоізоляційні, жароміцні метали. З них найбільше значення в металургії мають вогнетриви, тому що метали й сплави в більшості випадків одержують при високій температурі, і продуктивність печей багато в чому залежить від якості застосовуваних вогнетривів.

Вогнетривами називаються будівельні матеріали, що деформуються при температурі не нижче 1580 °С і здатні протистояти тривалому впливу високих температур без зміни своїх фізико-механічних властивостей.

За хіміко-мінеральним складом вогнетриви поділяються на наступні групи:

- Кремнеземисті – динасові (не менш 92 %  $SiO_2$ ), що виготовляються із кварцитових матеріалів (головним чином із кварциту).
- Алюмосилікатні, що виготовляються з вогнетривких глин і каолінів, до яких відноситься шамот (до 45 %  $Al_2O_3$ ) і високоглиноземисті вогнетриви (понад 45 %  $Al_2O_3$ ).
- Магнезіальні, що виготовляються з мінералів, які містять магнезит, з різними сполучними добавками. До цієї групи входять магнезитові (не менш 85 %  $MgO$ ), доломітові (не менш 35 %  $MgO$  і 40 %  $CaO$ ), форстеритові (від 35 до 55 %  $MgO$  і  $Cr_2O_3$ ), шпинельні ( $MgO$  і  $Al_2O_3$  у молекулярному співвідношенні) вогнетриви.
- Хромисті, до яких відносять хромітові (близько 30 %  $Cr_2O_3$ ) і хромомагнезитові (10...30 %  $Cr_2O_3$  і 30...70 %  $MgO$ ) вироби.
- Вуглецеві, до складу яких входить вуглець: графітові (30...60 %  $C$ ), коксові (70...90 %  $C$ ).
- Цирконисті: цирконієві, що виготовляються з  $ZrO_2$  і цирконіві, що виготовляються з мінералу  $Zr_2O_3 \cdot SiO_2$ .



- Окисні – вироби з окислу берилію, окислу торію й окисли церію.

- Карбідні та нітридні, до яких відносять карборундові (30...90 %  $SiC$ ) вогнетриви й вогнетриви з нітридів, карбідів і сульфідів.

За ступенем вогнетривкості матеріали поділяються на три групи:

- 1) вогнетривкі (1580...1750 °C);
- 2) високовогнетривкі (1770...2000 °C);
- 3) вищої вогнетривкості (>2000 °C).

За термічною обробкою вогнетривкі вироби діляться на випалювальні (обпалені після формування), безвипалювальні й литі виплавлені.

За способом виготовлення вогнетривки діляться на:

- формовані – форма надається при виготовленні (вироби вогнетривкий і теплоізоляційні);
- неформовані – форма здобувається в процесі застосування (вогнетривкі бетони, набивні маси, обмазки);
- вогнетривкі розчини – наповнювачі швів вогнетривкої кладки.

За складністю форми й розмірам штучні вогнетривкі вироби діляться на наступні види: нормальна цегла, фасонний виріб, великі блоки й спеціальні вироби (тиглі, трубки й т.п.).

## **2.1 Загальні властивості вогнетривких матеріалів**

Придатність тих або інших вогнетривів у кожному окремому випадку оцінюється залежно від їхніх основних фізичних і робочих властивостей. Робочими називають властивості вогнетривів, що задовольняють вимоги, які висуваються у даному конкретному випадку. Основними властивостями вогнетривів є вогнетривкість, термічна стійкість, хімічна стійкість, деформація під навантаженням при високій температурі і сталість форми й

об'єму, пористість, газопроникність, теплопровідність, електропровідність.

*Вогнетривкість.* Вогнетривкістю називається здатність матеріалів витримувати високі температури, не деформуючись під дією власної ваги. При нагріванні вогнетривкий матеріал спочатку розм'якшується внаслідок плавлення його легкоплавкої складової. При подальшому нагріванні починає плавитися основна маса, і в'язкість матеріалу поступово зменшується. Процес плавлення вогнетривів виражається в поступовому переході із твердого стану в рідкий причому температурний інтервал від початку розм'якшення до розплавлення іноді досягає кількох сотень градусів.

*Деформація під навантаженням при високих температурах.* У кладці печі вогнетриви зазнають в основному стискальне зусилля, що збільшується при нагріванні печі. Для оцінки механічної міцності вогнетривів звичайно визначають залежність зміни величини деформації від температури при постійному навантаженні.

Випробування проводять на циліндричному зразку висотою 50 і діаметром 36 мм при постійному навантаженні  $1,96 \cdot 10^5$  Па. Результати випробування представляють у вигляді графіка залежності зміни висоти зразка від температури. Для характеристики деформації відзначають температуру початку розм'якшення, коли висота зразка зменшується на 4 %, температуру, відповідну до зміни висоти на 40 %, і температурний інтервал розм'якшення, що представляє різницю цих двох температур.

*Сталість форми й об'єму.* При нагріванні вогнетривів у печах відбувається зміна їх об'єму під впливом двох факторів – термічного розширення й зіступу (або росту). Термічне розширення більшості вогнетривів невелике. Набагато значніше зміна об'єму вогнетриву при високих температурах за рахунок відбуваючих перетворень. Так, шамотні вироби дають зіступ в результаті утворення деякої кількості рідкої фази й ущільнення черепка. Звичайно це зменшення об'єму буває більше, ніж його тер-

мічне розширення, і приводить до збільшення швів. Динасові виробу збільшують об'єм при нагріванні внаслідок додаткових процесів перекристалізації. Ріст об'єму виробу в процесі служби сприяє ущільненню швів кладки. Зміну об'єму вогнетривів оцінюють при нагріванні точно обмірюваних зразків у печі.

*Термічна стійкість.* Термічною стійкістю називається здатність вогнетривів не руйнуватися при різких змінах температури. Це особливо важливо для вогнетривів, що працюють у печах періодичної дії. Термічна стійкість вогнетривів тим вища, чим більший коефіцієнт теплопровідності матеріалу, його пористість і розмір зерен і чим менше температурний коефіцієнт лінійного розширення, щільність розміру виробу й зміни об'єму при алотропічних перетвореннях.

Для визначення термічної стійкості використовують зразок у формі цегли. Зразок нагрівають 40 хв при 850 °С, потім охолоджують 8...15 хв. Цикл нагрівання й охолодження називається тепломіною. Охолодження може бути тільки на повітрі (повітряні тепломіни) або спочатку у воді 3 хв, потім на повітрі 5...10 хв (водяні тепломіни). Нагрівання й охолодження проводяться доти, поки втрата маси зразка (через відколювання шматків) не досягне 20 %. Термічна стійкість оцінюється кількістю витриманих тепломінів.

*Хімічна стійкість.* Під хімічною стійкістю вогнетривких матеріалів розуміється здатність протистояти руйнуванню від хімічного й фізичного впливу продуктів, що утворюються в печі, – металу, жужелів, пилу, золи, пару і газів. Найбільшу дію на вогнетриви в плавильних печах виявляють жужелі. Стосовно дії жужелів вогнетриви можуть бути розділені на три групи – кислі, основні й нейтральні.

Кислі вогнетриви стійкі до кислих жужелів, що містять велику кількість  $SiO_2$ , але роз'їдаються основними жужелями. Кислим вогнетривом є динас. Динас стійкий до дії окисних і відновлюючих газів. Основні вогнетриви стійкі до дії основних жужелів, але роз'їдаються кислими. До них відносять вогнетриви, що

містять вапно, магнезію й лужні окисли (доломіт, магнезит і ін.). Нейтральні (проміжні) вогнетриви, до складу яких входять аморфні окисли, реагують як з кислими, так і з основними жужелями, але в значно меншому ступені, ніж кислі й основні. До них відноситься хромистий залізняк, що містить у якості основний складової  $FeO \cdot Cr_2O_3$ .

*Жужелестійкість* вогнетривів залежить від швидкості хімічних реакцій вогнетриву із жужелем й від в'язкості жужелю. При грузлих жужелях і малої швидкості реакцій вогнетривки виріб може працювати добре. З підвищенням температури швидкість хімічних реакцій збільшується, а в'язкість жужелів зменшується, тому навіть невелике підвищення температури (на 25...30 °С) приводить до істотного збільшення корозії вогнетривів. Пористі вироби з відкритими порами менш жужелестійкий, чим більш щільні. Зовнішня гладка поверхня кірки цегли краще пручається дії жужелю, ніж шорсткувата поверхня зламів. Тріщини у виробі також знижують його жужелестійкість.

Для визначення жужелестійкості застосовують два методи – статичний і динамічний. При статичному методі у вогнетривкому виробі висвердлюють циліндричний отвір, у який насипають тонкоподрібнений жужіль. Виріб нагрівають у печі до його робочої температури (але не нижче 1450 °С) і витримують при цій температурі 3...4 години. Про жужелестійкість судять якісно за ступенем розчинення виробу в жужелях і глибині його проникнення у виріб. При динамічному методі на випробувану вогнетривку цеглу, встановлену у печі вертикально, при температурі 1450 °С протягом 1 години подають порошкоподібний жужелі (1 кг). Розплавляючись і стікаючи по поверхні цегли, жужіль проїдає в ньому борозни. Роз'їдання жужелю визначається за втраченою об'ємом (у кубічних сантиметрах) з урахуванням додаткової усадки цегли.

*Теплопровідність.* Залежно від цілей, для яких використовується вогнетрив, теплопровідність його повинна бути високої або низькою. Так, матеріали, призначені для футерівки печей,

повинні мати низьку теплопровідність для зменшення теплових втрат у навколишній простір і підвищення к.к.д. печі. Однак матеріали для виготовлення тиглів і муфелів повинні мати високу теплопровідність, що зменшує перепад температури в їхніх стінках.

При підвищенні температури теплопровідність більшості вогнетривів зростає. Виключення становлять магнезитові і карборундові вироби, теплопровідність яких при цьому зменшується. Теплопровідність усіх вогнетривів зменшується зі збільшенням пористості. Однак при високій температурі (вище 800...900 °С) збільшення пористості мало впливає на теплопровідність. Здобувають вплив конфігурація й розмір пор, що визначають конвекційну теплопередачу усередині пор. Збільшення вмісту кристалічної фази в матеріалі приводить до збільшення теплопровідності.

*Електропровідність.* Електропровідність є визначальним параметром вогнетривів, які застосовують для футерівки електричних печей. При нормальних температурах звичайно всі вогнетривкі матеріали є гарними діелектриками. При підвищенні температури електропровідність швидко зростає, і вони стають провідниками. Електропровідність матеріалів з великою пористістю при високих температурах зменшується.

*Теплоємність* вогнетривів визначає швидкість нагрівання й охолодження футерівки та витрати тепла на нагрівання. Це має особливо важливе значення при роботі печей періодичної дії. Теплоємність залежить від хіміко-мінерального складу вогнетривів. Визначається вона калориметричним методом. Теплоємність звичайно незначно росте зі збільшенням температури. Середнє її значення лежить у межах 0,8...1,5 кДж / (кг· К).

*Пористість.* Усі вогнетривкі вироби пористі. Розмір пор, їх структура й кількість досить різноманітна. Окремі пори або з'єднані між собою й з атмосферою, або являють собою замкнені простори усередині виробу. Звідси розрізняють пористість відкриту, або гадану, при якій пори сполучені з атмосферою, пори-

стість закрити, коли пори не мають виходу назовні, і пористість дійсну, або загальну, тобто сумарну. Відкрити пористість обчислюють на основі даних виміру водопоглинання й об'ємної маси вогнетривких виробів.

*Газопроникність.* Газопроникність залежить від природи вогнетриву, величини відкритої пористості, однорідності структури виробу, температури й тиску газу. З підвищенням температури газопроникність вогнетривів знижується, тому що об'єм газу при цьому зростає й збільшується його в'язкість. Вогнетриви повинні мати можливо меншу газопроникність, особливо ті, які застосовуються для виготовлення реторт, муфелів, тиглів. Найбільша газопроникність у шамотних виробів, найменша в динасу.

*Щільність і об'ємна маса.* Щільність матеріалу – це відношення маси зразка до займаного їм об'ємом за винятком об'єму пор. Об'ємна маса – це відношення маси висушеного при 105 °С зразка до займаного їм об'ємом, включаючи об'єм пор.

*Зовнішній вигляд і структура.* Усі вогнетривкі вироби поділяються на сорти відповідно до розроблених стандартів. Сорт вогнетривких виробів установлюють за величиною відхилення від установлених розмірів, кривизні, відбитості кутів, притупленості ребер, наявності окремих виплавок, зажужелювання і тріщинам. Відхилення в розмірах допускаються в межах норм, зазначених у відповідних стандартах залежно від сортності. Кривизна виробів визначається стрілою прогину. Очевидно, що чим більше буде кривизна, тим менш щільною виявиться кладка. Відбитість кутів і притупленість ребер також негативно впливають на якість кладки.

Виплавка являє собою місцеве оплавлення поверхні вогнетриву з утворенням «каверни». Причиною виплавок є недостатньо гарне перемішування шихти при виготовленні вогнетриву. У місцях виплавок відбувається швидке руйнування жужелями навіть при порівняно низькій температурі, тому число виплавок на поверхні виробу строго обмежується.

Зажужлення утворюється на поверхні виробу у вигляді наростів як результат забруднення її при випалі піском, глиною тощо. Наявність зажужлення на поверхні виробів також обмежується.

Просічення (розриви шириною до 0,5 мм) і тріщини (розриви шириною більше 0,5 мм) на поверхні вогнетривких виробів збільшують корозію жужелями й зменшують їхню механічну міцність. Вони утворюються в процесі випалу при необережному нагріванні або охолодження виробу.

Вогнетривкий матеріал гарної якості повинен мати в зламі однорідну будову без порожнеч і розшарувань. Зерна різних фракцій повинні рівномірно розподілятися по поверхні зламу, не випадаючи й легко не фарбуючись.

При виборі того або іншого матеріалу необхідно керуватися основними вимогами до нього в кожному конкретному випадку. Так, матеріал для стінок і склепіння плавильної печі повинен насамперед мати високу механічну міцність. Для укосів печі слід застосовувати вогнетрив, більш стійкий до дії жужелів, що утворюються при даному металургійному процесі.

## **2.2 Теплоізоляційні матеріали**

Застосування теплоізоляційних матеріалів у конструкціях печей дозволяє зменшити теплові втрати через стіни й тим самим збільшити тепловий к.к.д. і продуктивність печей. При будівництві печей знаходять застосування два типи теплоізоляційних матеріалів – легковажні вогнетриви й природні теплоізоляційні матеріали.

Легковажні вогнетриви за хіміко-мінеральним складом не відрізняються від звичайних вогнетривів, але мають більшу пористість і, отже, малу об'ємну масу, теплопровідність, механічну міцність, термостійкість і жужелестійкість. Висока вогнетривкість легковажних вогнетривів допускає їхнє застосування для

внутрішньої кладки печей, але за умови покриття їх вогнетривкою обмазкою. Не слід допускати прямого їхнього зіткнення з розплавленими металом і жужелями. Печі, викладенні зсередини легковагими вогнетривами, швидко розігріваються й мають порівняно менші втрати тепла на нагрівання кладки, що важливо для періодично діючих печей.

Існують три способи виробництва легковажних вогнетривів – спосіб вигораючих добавок, піноутворювальний та хімічний. При виготовленні способом вигораючих добавок у вогнетривку масу вводять тирсу, деревне вугілля й інші вуглецеві речовини в кількості 25...35 % (за масою). При випалі відформованих виробів ці добавки вигорають, створюючи пори. Режими сушіння й випалу легковажних вогнетривів не відрізняються від режимів для звичайних вогнетривів даного типу.

При піноутворювальному способі у вологу масу вогнетриву (шлікеру) вводять емульсію каніфольного мила або мильного кореня, здатну утворювати піну. У якості стабілізатора піни застосовують столярний клен. Спінену масу розливають у форми, сушать і обпалюють.

При хімічному способі до вогнетривких мас додають газотвірні речовини, такі як вапняк або доломіт, і розчин сірчаної кислоти. Утворення пористої структури відбувається як наслідок виділення пухирців  $CO_2$  у результаті протікаючої хімічної реакції. Для стабілізації об'єму сирцю в процесі його видування газом, що виділяється, у шихту вводять високоглиноземистий цемент або гіпс. Отриману видуту масу розливають у форми, сушать і обпалюють. Після випалу легковажні вогнетривкі вироби піддають механічній обробці, тому що в процесі випалу відбувається їхнє значне жолоблення.

Легковагі вогнетриви, отримані способом вигораючих добавок, мають об'ємну масу 1000...1300 кг/м<sup>3</sup> і теплопровідність 0,3...0,5 Вт/(м·К). Пінолегковажні вогнетриви відрізняються від них в основному меншою об'ємною масою (400...800 кг/м<sup>3</sup>) і ме-



ншою теплопровідністю ( $0,1 \dots 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), тобто більш високими теплоізоляційними властивостями.

Природні теплоізоляційні матеріали застосовуються головним чином для зовнішньої ізоляції печей. Використовуються вони у вигляді формованих виробів, вати, засипання, обмазки, які наносять на поверхню, що нагрівається. Із природних теплоізоляційних матеріалів найбільше поширення одержали азбест, діатоміт і трепел, зоноліт і обпалений вермикуліт.

Азбест – мінерал волокнистої будови, здатний розщеплюватися на тонкі, гнучкі й міцні волокна. Температура плавлення азбесту  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , але при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  азбест втрачає конституційну вологу й розсипається в порошок, його теплоізоляційні властивості знижуються, тому використовується він при температурі до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Промисловістю випускаються вироби з азбесту різної форми й розмірів, але в основному він застосовується у вигляді картону, шнура, вати і як наповнювач багатьох теплоізоляційних обмазок.

Діатоміт і трепел – осадові породи, які складаються переважно з аморфного кремнезему. Вони відрізняються великою пористістю, пластичністю, нерозчинністю у воді й кислотостійкістю. Температура розм'якшення їх близько  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Застосовуються в сирому і обпаленому стані у вигляді засипання й готових виробів при температурі до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Діатомітові вироби випускаються трьох класів за об'ємною масою:  $500, 600$  і  $700 \text{ кг/м}^3$ .

Зоноліт і обпалений вермикуліт застосовують для теплоізоляції високотемпературних печей у вигляді засипання. Їх гранична робоча температура  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### **2.3 Будівельні матеріали і метали**

При спорудженні печей, крім спеціальних будівельних матеріалів (вогнетривких і теплоізоляційних) широко застосовую-

ться й звичайні: будівельна цегла, бутовий камінь, бетон, пісок, гравій, щебені, розчини.

Будівельна цегла (червона) виготовляється з легкоплавких глин, вогнестійкість яких нижче  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і використовується в тих місцях кладки, де температура не перевищує  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Середній коефіцієнт теплопровідності цієї цегли близько  $0,8\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Области застосування будівельної цегли – зовнішні шари кладки стін, лежаків, стовбурів, труб, фундаментів печей та ін. Розміри будівельної цегли такі ж, як у вогнетривкої нормальної цегли.

Бутовим каменем називаються великі неправильної форми шматки гірських порід – піщанику, вапняку або граніту. У будівництві печей знаходять застосування пісковикові бутові або гранітні камені, що витримують більш високі температури (до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ніж вапнякові камені. З бутового каменю кладуть фундаменти печей, підпірні стіни та ін.

Будівельний бетон – водяна суміш цементу, що твердіє на повітрі. Наповнювачами є пісок, щебені й гравій. Щебінь – дроблені відходи будівельної цегли або природних каменів; гравій – продукт руйнування гірських порід. Щебінь й гравій служать грубозернистим, пісок – дрібнозернистим наповнювачами в бетонах. Із цементів для виготовлення будівельних бетонів при будівництві печей найбільш широко використовують портландцемент і швидко твердіючий глиноземистий цемент.

Будівельні розчини, у яких в якості в'язкого компонента використовуються вапно й цемент, а наповнювачем є пісок служать для заповнення швів у кладках з будівельної цегли й бутового каменю. Додавання глини в розчини збільшує їхню щільність.

У конструкції металургійних печей використовуються як звичайні сталі й чавуни, так і спеціальні жароміцні й циндростійкі сталі, сплави й чавуни.

Звичайні сталі й чавуни можуть задовільно використовуватися при температурах, що не перевищують  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При більш високих температурах знижується їхня механічна міцність, а в чавунах починаються процеси розпаду карбідів, прискорюються

процеси окислення металу. Тому вони застосовуються тільки для тих елементів конструкції, робоча температура яких нижче граничної для цих металів. Це каркаси печей, кожуха, робочі майданчики, рами вікон, корпуси заслінок, глісажні труби та ін. При цьому широко використовується сталевий лист, сортовий прокат, сталеве й чавунне лиття.

Елементи печей з робочою температурою, що перевищує  $400^{\circ}\text{C}$ , виконуються з циндростійких і жароміцних сталей і сплавів. Циндростійкі (жароміцні) сталі й сплави застосовують при виготовленні ненавантажених конструкцій, що працюють при температурі вище  $400^{\circ}\text{C}$  (металеві рекуператори, муфелі термічних печей та інші елементи).

Циндростійкими називаються сталі й сплави, стійкі до газової корозії поверхні при високих температурах. Метод підвищення корозійної стійкості – легування сталі металами, що легко окислюються, такими як хром, кремній, алюміній та ін. Плівка окислів цих металів на поверхні сталі надійно захищає її від корозії. Найкращі результати виходять при легуванні одночасно декількома елементами.

Сплави з підвищеним вмістом нікелю (більш 15%) не стійкі до впливу сірчистих сполук, тому у випадку присутності  $\text{SO}_2$  у димових газах застосовувати такі сплави не рекомендується. Збільшення хрому й алюмінію підвищує стійкість сталі до  $\text{SO}_2$ . До циндростійких сталей відносять сталі марок X25T, X28, X23N13 та ін., що працюють до температури  $900\text{...}1100^{\circ}\text{C}$ .

Жароміцними називаються сталі, що володіють механічною міцністю в умовах високих робочих температур і при цьому стійкі до хімічної корозії. Це сталі із великим вмістом хрому й нікелю, леговані ще молібденом і ванадієм. Застосовують їх для виготовлення механічно навантажених деталей печей, що працюють при високих температурах (рамы, піддони, опори подових труб і т.п.). До них відносять сталі марок X14Г14Н3Т, X18Н10Т та ін., що працюють до температури  $800^{\circ}\text{C}$ , і 3X13Н7С2 і подібні їй, здатні працювати до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Жаростійкі кременисті чавуни утримуючі до 6 % *Si*, застосовують для виготовлення голчастих рекуператорів. Жаростійкий чавун марки ХЧС-5.5, що містить менш 5,5% *Si*, застосовують при температурі до 850 °С. Для роботи при температурах до 1000° С використовують чавун марки ЖЧСШ-5.5-0,1, що містить понад 5,5% *Si* і модифікований магнієм.

### Питання для самоконтролю

- 1) На які групи діляться вогнетривкі матеріали?
- 2) Які матеріали відносять до вогнетривких?
- 3) На які групи діляться вогнетривкі матеріали за ступенем вогнетривкості?
- 4) На які групи діляться вогнетривкі матеріали за способом виготовлення?
- 5) Назвіть основні властивості вогнетривких матеріалів?
- 6) Що розуміють під поняттям «вогнетривкість»?
- 7) Від якого параметру будують залежність деформації вогнетривкого матеріалу при навантаженні?
- 8) Що розуміють під поняттям «термічна стійкість»?
- 9) На які групи поділяють вогнетривкі матеріали стосовно дії жужелів?
- 10) Які методи застосовують для визначення жужелестійкості вогнетривких матеріалів?
- 11) Чим необхідно керуватися при виборі вогнетривкого матеріалу?
- 12) З якою метою застосовують теплоізоляційні матеріали?
- 13) Назвіть два види теплоізоляційних матеріалів.
- 14) Перелічіть природні теплоізоляційні матеріали.
- 15) Які будівельні матеріали, крім спеціальних, застосовують при будівництві металургійних агрегатів?
- 16) Які сталі називають циндростійкими?
- 17) Які сталі називають жароміцними?

## 3 ВИДИ НАГРІВУ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

### 3.1 Паливний нагрів

Паливо – група речовин в основному органічного походження, при спалюванні яких виділяється теплова енергія для промислових і інших господарських цілей.

Основним елементом усякого палива є вуглець. Самий прадавній вид палива – дрова й викопні вугілля. Нафта була відома давно, але в якості палива стала застосовуватися тільки в другій половині ХІХ в. Широке використання природного газу поряд з використанням газоподібних продуктів переробки нафти й вугілля характерно для ХХ в. Доля вуглецевого палива в цей час багато вище долі інших використовуваних джерел енергії. Звідси економічна міць країни певною мірою визначається кількістю природних запасів палива.

Значною перевагою рідкого й газоподібного палива є можливість їх транспортування по трубопроводах.

Бурхливий розвиток нафтової й газової промисловості привів до корінної зміни структури енергетичного балансу в кольоровій металургії убік збільшення в ньому долі нафти й газу як найбільш дешевих і ефективних видів палива.

Класифікують паливо в основному за агрегатним станом й походженням. За агрегатним станом паливо ділиться на тверде, рідке й газоподібне. За походженням паливо може бути природне, використовуване в тому виді, у якому перебуває в природі, і штучне, отримане шляхом переробки природних матеріалів. Загальна класифікація палива дана в табл. 3.1 [2]. Основними характеристиками палива є хімічний склад і теплота згорання.

Хімічний склад палива. До складу твердого й рідкого палива у вигляді різних складних з'єднань входять наступні елементи: вуглець, водень, азот, кисень, сірка. Крім того, у кожному паливі втримується волога, а також ряд мінеральних речовин, які після згорання палива утворюють золу.

Таблиця 3.1 - Загальна класифікація палива

Агрегатний стан	Походження	
	природне	штучне
Тверде	Дрова, торф, кам'яне вугілля, горючі сланці	Деревне вугілля, кокс, вугільний пил
Рідке	Нафта	Бензин, мазут, кам'яновугільна смола
Газоподібне	Природний газ	Генераторний, коксувальний, доменний газ

Вуглець – найбільш важлива й основна складова палива. Тому що при горінні вуглецю виділяється велика кількість тепла, про якість палива судять за вмістом в ньому вуглецю. При повному згоранні вуглецю утворюється двоокис вуглецю  $CO_2$  або окис вуглецю  $CO$  – при неповному його згоранні.

Водень – другий, досить важливий елемент, що входить до складу палива. Теплота згорання водню вище, чим теплота згорання вуглецю, однак у паливі він присутній у значно меншій кількості.

Азот – міститься у твердому і рідкому паливі в незначній кількості (0,05...2 %). Азот є баластом палива, тому що при горінні палива у звичайних умовах він не окислиться, а переходить у димові газу у вигляді вільного азоту  $N_2$ .

Кисень утримується у твердому і рідкому паливі у зв'язаному стані й, отже, не може підтримувати горіння. Підвищений вміст кисню є ознакою часткового окислення палива, його неповноцінності.

Сірка в паливі може бути у вигляді з'єднань із металами, (головним чином із залізом), різних органічних сполук (органічна сірка) і з'єднань із киснем – солей сірчаної кислоти (сульфатна сірка).

У солях сірчаної кислоти сірка перебуває вже в окисленому стані й, отже, горіти не може. Перші ж дві форми сірки при го-

рінні палива утворюють сірчистий газ  $SO_2$ . Сірку, що перебуває в паливі у вигляді сірчистих і органічних сполук, прийнято називати летучою сіркою.

Зола – твердий залишок, що утворюється після повного згорання палива як результат наявності в ньому мінеральних домішок. Іноді в золі зустрічаються рідкі елементи – ванадій, германій та ін. Зола є баластом палива, що знижують його ефективність. У розрахунках золу позначають індексом А.

Вода є також баластом палива. Вона не тільки не бере участь у процесі горіння, але й вимагає певної кількості тепла для випару, високий вміст вологи в паливі сильно знижує його якість.

У твердому паливі розрізняють зовнішню й внутрішню, або гігроскопічну, вологу. Зовнішня волога втримується на поверхні шматків палива й може бути вилучена при сушінні палива без його підігріву (повітряне сушіння), гігроскопічна волога втримується усередині шматків палива й може бути вилучена тільки при їхньому нагріванні. Вміст гігроскопічної вологи в паливі залежить від його властивостей, а також від вологості навколишнього повітря. Незначна кількість гігроскопічної вологи в паливі корисна, тому що вона виявляє каталітичну дію, прискорюючи процес горіння.

Для визначення складу твердого й рідкого палива та оцінки його якості проводяться *елементарний* і *технічний аналізи*. При *елементарному аналізі* палива визначають вміст вуглецю, водню, азоту, сірки, мінеральних домішок, що утворюють золу, і вологи окремо, % (мас.). Такий аналіз не дозволяє визначити ті складні з'єднання, у яких окремі елементи входять до складу палива, однак значення процентного вмісту складових цілком достатньо для характеристики палива й розрахунків горіння. У такому складі паливо носить назву робочого палива.

Попередньо висушене при температурі 103...105 °С тверде паливо зветься сухою (безвологою) масою. Суха безпопільна

частина палива називається горючою масою. Безпопільну, безвологу й безсірчану частину палива називають органічною масою.

При прийомі палива звичайно проводиться його *технічний аналіз* на вміст вологи, золи й летучих з'єднань, а також оцінка зовнішнього вигляду твердого залишку після проведеної в процесі аналізу сухої перегонки палива.

Сухою перегонкою називається нагрівання палива без доступу повітря, у результаті якого паливо розкладається на летучі й твердий залишок – кокс. До складу летучих входять гази, пари води й смоли, а також ряд органічних сполук. Кокс складається в основному з вуглецю з незначною кількістю інших елементів органічної маси. Крім того, у ньому втримується частина сірки й уся зола палива. Кокс залежно від роду палива виходить у вигляді сплавлених шматочків або в порошкоподібному стані. Вугілля, котре дає порошкоподібний кокс, називають некоксівним. Технічний аналіз порівняно нескладний і може бути зроблений у будь-якій лабораторії.

Газоподібне паливо являє собою суміш різних порівняно нескладних газоподібних з'єднань, найголовніші з яких наступні: окис вуглецю  $CO$ , водень  $H_2$ , метан  $CH_4$ , етилен  $C_2H_4$ , важкі вуглеводи  $C_mH_n$ , сірководень  $H_2S$ , що утворюють групу горючих з'єднань, і двоокис вуглецю  $CO_2$ , пари води  $H_2O$  – негорючі складові.

При аналізі газоподібного палива визначаються з'єднання, що входять до складу палива, в об'ємних відсотках, причому вміст азоту розраховують за різницею.

Аналіз виконується шляхом послідовного поглинання окремих складових різними реактивами. Отримані результати характеризують сухе паливо. Вміст вологи в газоподібному паливі визначається окремо й виражається в грамах на кубічний метр сухого газу.

Теплота згорання палива. Під теплою згорання палива  $Q$  розуміють кількість тепла, що виділяється при повному згоранні одиниці даного палива. Теплота згорання виражається в кіло-



джоулях на кілограм для твердого й рідкого палива й у кілоджоулях на кубічний метр для газоподібного.

У процесі спалювання робочого палива водяна пара, що утворюється при згоранні водню й при випарі вологи палива, може або конденсуватися, або залишатися в пароподібному стані. У зв'язку із цим розрізняють вищу теплоту згорання  $Q_B$ , коли пара конденсується в рідину з виділенням теплоти паротворення, і нижчу  $Q_H$ , коли волога залишається у вигляді пари. При спалюванні палива в промислових установках водяна пара не конденсується внаслідок високої температури газів, що відходять, тому за основу всіх розрахунків беруть нижчу теплоту згорання  $Q_H$ .

Для нагрівання й перетворення в пару 1 кг води потрібно 2516 кДж. Уся волога палива  $W_1$  і вода, що утворюється при горінні водню палива  $W_2$ , утримується в продуктах горіння. При горінні однієї одиниці маси водню утворюється вода в кількості  $(2 + 16) / 2 = 9$  одиниць маси. Якщо в 1 кг робочого палива втримується  $W_1^P$  кг вологи,  $H^P$  кг водню, то в продуктах горіння втримується вологи, кг:

$$W_1^P + W_2^P = (W_1^P + 9C_H^P), \quad (3.1)$$

і різниця між вищої й нижчої теплотами згорання 1 кг палива, кДж, становить:

$$Q_B^P - Q_H^P = 2516(W_1^P + 9C_H^P). \quad (3.2)$$

Якщо  $W_1$  і  $C_H$  виражені у відсотках від кількості робочого палива, то різниця

$$Q_B^P - Q_H^P = 25,16(W_1^P + 9C_H^P). \quad (3.3)$$

Теплота згорання може бути визначена експериментально або обчислена за даними аналізу. Експериментальне визначення

теплоти згорання твердого й рідкого палива проводиться спалюванням навіски в калориметричній бомбі, а газоподібного – у калориметрі проточного типу. Середовищем, що поглинає тепло, служить вода. Визначення теплоти згорання проводиться безпосередньо виміром тепла, переданого воді при спалюванні відомої кількості палива. При експериментальному визначенні отримують вище значення теплоти згорання  $Q_B$ . Значення  $Q_H$  визначається розрахунками при відомих  $W_1^P$  і  $C_H^P$ .

При розрахунках теплоти згорання палива найкращі результати дає формула Д. І. Менделєєва, прийнята для всіх видів твердого й рідкого палива:

$$Q_H^P = 340 \cdot C_C^P + 126 \cdot C_H^P + -109(C_O^P - C_S^P) - 25(W^P + 9C_H^P), \quad (3.4)$$

де  $C_C^P, C_H^P, C_O^P, C_S^P$  і  $W^P$  – зміст вуглецю, водню, кисню, сірки й вологи в робочому паливі, %.

Формула Д. І. Менделєєва (так само як і інші запропоновані формули) не враховує теплоти розкладання органічних сполук палива, тому розрахунки менш точні, ніж експериментальне визначення.

Так як газоподібне паливо є механічною сумішшю сполук, теплові ефекти горіння яких відомі, теплоту згорання газу (кДж/м<sup>3</sup>) можна розрахувати за формулою

$$Q_H^C = 126,4C_{CO} + 108,0C_{H_2} + 358,7C_{CH_4} + 591,0C_{C_2H_4} + 231,7C_{H_2S}, \quad (3.5)$$

де  $C_{CO}, C_{H_2}$ , інші складові взяті в об'ємних відсотках від сухого складу.

Теплота згорання важких вуглеводнів тут прийнята за етиленом ( $C_2H_4$ ). Загальний зміст важких вуглеводнів (етану, пропілену, бутану й ін.) у газі звичайно невелике й одержувана при такому розрахунках помилка незначна, хоча теплота згорання етану ( $C_2H_6$ ) 64940 кДж/м<sup>3</sup>, а пропілену ( $C_3H_6$ ) 86943 кДж/м<sup>3</sup>.

Для порівняння різних видів палива введено поняття «умовне паливо». Під умовним паливом розуміють паливо, теплота згорання якого дорівнює 29,3 МДж/кг (що приблизно відповідає теплоті згорання донецького коксового вугілля). Наприклад, якщо для палива  $Q = 27,0$  МДж/кг, тому воно за своєю теплотою згорання дорівнює  $27,0/29,3 = 0,92$  умовного палива, отже, 1 т його буде за тепловим ефектом відповідати 0,92 т умовного.

Тепловий еквівалент палива – це величина, отримана в результаті розподілу  $Q_H^P$  (МДж/кг) на  $Q$  умовного палива:

$$E_T = \frac{Q_H^P}{29,3}. \quad (3.6)$$

Помноживши тепловий еквівалент будь-якого палива на 29,3, одержують його теплоту згорання в МДж/кг.

### 3.2 Електричний нагрів

У кольоровій металургії усе більш широке застосування електричного нагріву визначається наступними перевагами в порівнянні його з паливним нагрівом:

1) можливість одержання в об'ємі печі необмежено високої температури, тоді як у паливних печах гранична температура становить 1800...2000 °С;

2) простота регулювання, у тому числі й автоматичного, температури в об'ємі печі. Автоматичне керування нагріванням печі дозволяє збільшити витяг металу й значно поліпшити його якість;

3) можливість проведення процесів нагрівання в будь-якому середовищі й у вакуумі, що дозволяє нагрівати й плавити метали, які легко окислюються (у захисному середовищі) і приводить до зменшення випару металу;

4) більш високий к.к.д. печей через відсутність димових газів і втрат тепла з ними;

5) поліпшення умов праці й відсутність забруднення атмосфери димовими газами.

Недоліками електричного нагрівання є:

1) більш висока вартість одиниці теплової енергії в порівнянні з паливними печами, однак малий випар металу й підвищення його якості часто компенсують підвищені витрати на одиницю теплової енергії;

2) менша надійність, довговічність і ремонтпридатність електропечей і залежність їх роботи від подачі електроенергії.

В електричних печах для плавки й нагрівання металу електрична енергія перетворюється в теплову в елементах електричних кіл або в газовому середовищі при проходженні в них електричного струму. Способи перетворення електричної енергії лягли в основу класифікації електропечей.

У металургії використовуються наступні способи перетворення електричної енергії в теплову:

1) нагрівання провідного тіла при проходженні через нього електричного струму (печі опору, індукційні каналні й індукційні тигельні печі);

2) нагрівання газового середовища в електричній дузі й біля її електродів (дугові й плазмові печі);

3) нагрівання тіла при бомбардуванні його потоком електронів з великими швидкостями (електронно-променеві печі).

За способом передачі теплової енергії до металу, що нагрівається, електричні печі діляться на:

- печі прямого нагрівання, коли перетворення електричної енергії в теплову відбувається безпосередньо в тілі, що нагрівається;

- печі непрямого нагрівання, коли перетворення відбувається поза тілом, що нагрівається, а нагрівання його здійснюється теплопередачею в просторі печі;

- печі змішаного нагріву.

### 3.2.1 Нагрів в печах опру

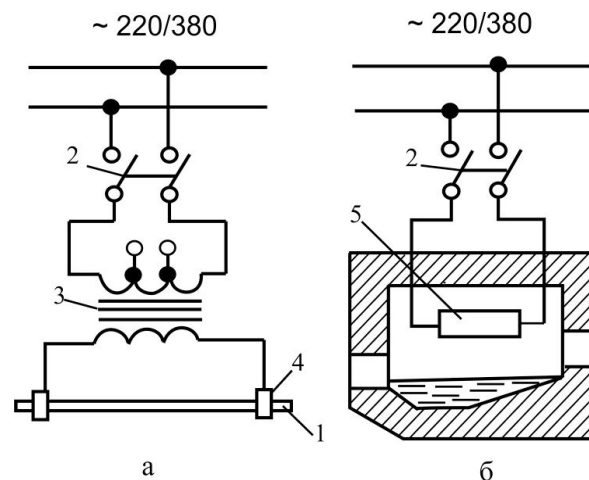
Печі, у яких використовується нагрівання провідників при проходженні через них електричного струму, носять загальну назву печей опору. За законом Джоуля-Ленца кількість тепла (Дж), виділеного в провіднику, визначається як

$$Q = I \cdot U \cdot \tau = I^2 \cdot R \cdot \tau = U^2 \cdot \tau / R, \quad (3.7)$$

де  $I$  – сила струму в провіднику, А;  $R$  – опір провідника, Ом;  $U$  – різниця потенціалів на кінцях провідника, В;  $\tau$  – час, с.

До групи печей опору входять печі контактного (прямого) і непрямого нагрівання.

*Печі прямого (контактного) нагрівання.* Прямий нагрів (рис. 3.1, а), при якому металевий виріб нагрівається безпосередньо електричним струмом, що проходить через нього є найефективнішим методом нагріву.



1) матеріал, що нагрівається; 2) вимикач або магнітний пускач; 3) пічний трансформатор; 4) контактні обладнання; 5) електронагрівальний елемент

Рисунок 3.1 – Схеми електричних печей опору контактного нагріву (а) і непрямого нагріву (б) [2]

У цьому випадку досягається велика швидкість нагріву при достатній рівномірності по перетину. Швидке нагрівання виробів зменшує теплові втрати в навколишнє середовище, збільшує к.к.д. нагрівальної установки, що дозволяє робити їх без теплової ізоляції (футерівки).

Однак для плавки металу такі печі практично не використовуються у зв'язку із труднощами в створенні електричних контактів із металом, який ще не розплавився. Вони застосовуються обмежено для нагрівання металевих виробів з постійним по довжині перетином, таких, як труби, прутки, стрічки й дріт, а також для нагріву солей у соляних ваннах. Недоцільно застосовувати прямий нагрів й при занадто малому опорі виробу, що нагрівається, тому що при цьому значно зростає сила струму й виникають труднощі зі створенням надійного контакту з виробом, що нагрівається.

Печі непрямого нагрівання. При непрямому нагріванні (рис. 3.1, б) у печах опору електричний струм проходить по спеціальних нагрівальних елементах, розташованих усередині печі. Нагрівачі та матеріал, що й нагрівається, перебувають у закритій камері, офутерованій усередині вогнетривким матеріалом. Конструкція камери повинна забезпечувати можливість завантаження й вивантаження печі й кріплення електричних нагрівачів. Тепло від нагрівачів металу передається випромінюванням і конвекцією. При високих температурах (вище 500...600 °С) основну роль у теплопередачі відіграє випромінювання. При більш низьких температурах роль випромінювання падає, і передача тепла відбувається в результаті конвекції. Підвищення температури нагрівачів приводить до зростання кількості тепла, переданого металу. Швидкість нагрівання визначається не тільки потужністю, виділяючої нагрівачами, але й умовами теплопередачі. Тому в конструкції високотемпературних печей між нагрівачами й металом, що нагрівається не повинне бути яких-небудь конструктивних елементів, що екранують, а в низькотемпературних печах для поліпшення конвекційного теплообміну створюють штучну

циркуляцію повітря за допомогою осьових і відцентрових вентиляторів, що приводить до більш рівномірного розподілу температури в печі. Перевагами печей опору непрямого нагрівання є простота регулювання температури й одержання бажаного розподілу температури в печі, високий к.к.д., малий випар і мале насичення газами металу при гарній герметизації печі.

Основні елементи печей непрямого нагрівання – нагрівачі. Матеріал нагрівального елемента відповідно до умов їх роботи повинен мати:

- 1) можливо великий питомий електричний опір;
- 2) можливо менший температурний коефіцієнт опору;
- 3) високу жароміцність;
- 4) стійкість до хімічного впливу атмосфери печі.

Крім того, матеріал повинен бути недефіцитним, дешевим і легко оброблятися.

У практиці будови електричних печей застосовуються дві групи матеріалів – металеві й неметалеві. Застосовуючі матеріали дозволяють створювати печі з різними температурними режимами – від низьких температур порядку 100...150 °С (сушильні печі) до температур вище 3000 °С (печі для одержання карбідів металів).

Матеріалом для металевих нагрівальних елементів можуть служити чисті метали й сплави. Із чистих металів знайшли застосування наступні: залізо (при температурі до 500 °С), платина (до 1350...1400 °С), молібден (до 1700...2000 °С) і вольфрам (до 2000...2500 °С). Однак усі перераховані метали, крім платини, окислюються на повітрі й можуть успішно працювати лише в захисному газовому середовищі або у вакуумі. Крім того, загальними недоліками чистих металів є порівняно малий питомий опір і великі температурні коефіцієнти опору, а платина, молібден і вольфрам до того ж ще дефіцитні й дорогі.

Тому для металевих нагрівачів головним чином застосовуються сплави, що відрізняються великим питомим електричним опором при порівняно малих температурних коефіцієнтах опору.

Основні компоненти цих сплавів – нікель, хром, залізо й алюміній. Збільшення вмісту хрому й нікелю в сплаві підвищує його робочу температуру.

Широке поширення одержав подвійний сплав – ніхром (~20% *Cr* і ~80% *Ni*). Він мало окислюється при високих температурах, тому що на поверхні утворюється тонка й дуже міцна захисна плівка окислу хрому. Сплав застосовується в печах з температурою 1000...1100 °С. Недолік сплаву – висока вартість у зв'язку з великим вмістом нікелю. Потрійний залізохромонікелевий сплав – фехраль, (вміст заліза до 50%) має жароміцність нижче жароміцності ніхрому, однак вартість фехралю менше (менший вміст нікелю). Нагрівачі із цього сплаву застосовуються в печах з температурою до 800 °С.

Більш високі температури (до 200...1300 °С) при порівняно низькій вартості забезпечуються застосуванням залізохромалюмінієвих сплавів різних марок (16...27 % *Cr*, ~4,6...8 % *Al*, решта *Fe*). Недоліки цих сплавів – труднощі обробки й крихкість, що набувається при високій температурі у зв'язку зі швидким ростом кристалів.

Металеві нагрівальні елементи можуть виготовлятися відкритими або укладеними в кожух. Відкриті нагрівальні елементи найчастіше виготовляються у вигляді циліндричних спіралей із дроту або зигзагів зі стрічок. Дротові нагрівачі звичайно виготовляються із дроту діаметром  $d = 2...8$  мм. Середній діаметр спіралей з ніхрому  $D = (5...8)d$ . Для високотемпературних печей діаметр береться менше щоб уникнути деформації спіralи при розігріві й замиканні витків. Діаметр спіралей із залізохромонікелевих сплавів дорівнює  $(4...6)d$  незалежно від температури печі. Крок намотування ( $h$ ) ухвалюється рівним  $(2...4)d$ , тому що при малому кроці відбувається взаємне екранування витків.

Зигзагоподібні нагрівальні елементи виготовляються із стрічок товщиною  $a = 1...2$  мм і шириною  $b = (8...12)a$ . Висота зигзага  $B$  дорівнює 300...500 мм при вертикальному й 100...150 мм при горизонтальному розташуванні нагрівальних елементів у печі.



Довжина дроту або стрічки для виготовлення нагрівача визначається розрахунками по заданій потужності печі, живлячій напрузі, робочій температурі печі.

У печах з температурою до 500 °С знайшли застосування рамкові нагрівальні елементи. Рама (каркас) виконується із профільованої сталі. До неї на шамотних або корундових ізоляторах кріпляться нагрівачі у вигляді спіралей або зигзагів зі стрічок і дроту. Рамкові нагрівачі легко монтують в печах і легко замінюються при виході з ладу. Термін служби їх становить до 20000 год.

Великий термін служби мають литі нагрівальні елементи товщиною 2...2,5 мм. Завдяки великому перетину нагрівачі можуть застосовуватися в печах з низькою напругою живлення або в печах великої потужності. Форма нагрівача (плоский або фасонний зигзаг) забезпечує найменше взаємне екранування витків. У деяких випадках знаходять застосування нагрівачі у вигляді рифленого металевого аркуша, укріпленого на стінці печі. Ці нагрівачі мають велику поверхню випромінювання й великий термін служби.

Для нагрівання водяних, масляних, соляних і металевих ванн використовують закриті трубчасті нагрівальні елементи. Такий нагрівач являє собою спіраль із ніхрому, укладену в сталеву трубку й ізольовану від неї засипкою з обпаленого окислу магнію або кварцового піску. Подібна засипка має гарну теплопровідність і високі електроізоляційні властивості. Кінці спіralи приварені до вивідних стрижнів, розташованих у торцях. Торці залиті герметизуючою жаростійкою склоподібною емаллю. Нагрівачу надається найчастіше U-Образна форма. Нагрівальний елемент у сталевій трубці може застосовуватися при температурах до 300...400 °С. Робочу температуру можна підвищити до 600...700 °С, якщо укласти сталеву трубку в трубку з жароміцного металу. При застосуванні закритих нагрівачів для металевих ванн їх заливають у чавунний чохол. У печі трубчасті нагрівачі встановлюються на стінках так, щоб активна частина нагрівача перебувала нижче дзеркала розплаву. Наявність герметизації до-

зволяє застосовувати в закритих нагрівачах дріт меншого діаметра (до 1 мм) при одночасному збільшенні терміну служби нагрівача. Значна економія ніхрому, великий термін служби, безпека обслуговування, можливість монтажу як у повітрі, так і в рідкому середовищі є значними перевагами нагрівальних елементів цього типу.

Металеві нагрівальні елементи в печах розміщуються на черені, стінках і склепіння. Для кращого теплообміну в печі найбільше доцільно розміщати їх на черені. У тих випадках, коли це неможливо, нагрівальні елементи розміщують на бічних стінках (при високій) і на склепінні (при низькій й широкій печі). Для кріплення нагрівачів застосовуються гачки керамічні й з жароміцних сталей, пази в черені й склепінні, спеціальні полички на бічних стінках і керамічні трубки. Кріплення на поличках і виступах дозволяє легко замінити нагрівачі. Стрічкові нагрівачі, розташовані на поличках, опираючись на неї всією торцевою поверхнею, не отримують деформуючих механічних навантажень. Істотний недолік такого кріплення – значне екранування нагрівача, що зменшує тепловіддачу й викликає його перегрів. Кріплення за допомогою металевих гачків пов'язане з більшою витратою жароміцного металу, але виключає екранування й перегрів нагрівачів. Спіральні нагрівачі доцільно кріпити на керамічних трубках при відстані між осями двох сусідніх трубок у півтора-два діаметри спіралі. У цьому випадку має місце ефективний теплообмін і менше механічне навантаження на витки, що дозволяє збільшити діаметр витка до  $D = 10d$  для ніхрому й до  $D = 8d$  для залізохромоалюмінієвих сплавів. Зовнішній діаметр трубки повинен бути менше діаметра спіралі в 1,1...1,2 рази.

Термін служби металевих нагрівачів залежить від робочих температур, частоти включень, хімічного впливу грубих газів і матеріалу футерівки печі. Для нагрівальних елементів з ніхрому термін служби в середньому рівний 12...20 тис. год.

Підключення до джерела живлення металевих нагрівальних елементів здійснюється за допомогою спеціальних виводів, які

проходять через кладку й міцно, герметично кріпляться в ній. Перетин виводу в 3... 4 рази більше перетину нагрівача, що охороняє його від перегрівання в місці проходження через кладку. Виводи виконуються зі сталі (для низьких) або з жароміцних сплавів (для високих температур) і з'єднуються з нагрівальним елементом зварюванням.

Неметалеві нагрівальні елементи, виготовлені з карборунду, графіту й дисиліциду молібдену, одержали широке поширення в печах з температурою вище 1200 °С. Карборундові нагрівачі застосовують у печах з температурою до 1350...1400 °С. Для підвищення електричного опору їх виготовляють у вигляді трубок. Конструктивно нагрівачі виготовляються двох типів – зі стовщеними контактними кінцями й з лобовими контактами. Кінцеві контактні ділянки виготовляються з матеріалу з меншим опором. Руйнуюча дію на карборунд чинять луги, окисли металів, силікати й з'єднання бору. Пари кислот на стрижні не діють, але руйнують контакти. Термін служби карборундових нагрівачів коливається від 500 до 2000 годин і залежить від температури нагрівача – різкі коливання температури й підвищення її >1500 °С скорочують термін служби й прискорюють старіння.

Недоліки карборундових нагрівачів – мала механічна міцність у нагрітому стані, великий температурний коефіцієнт опору й старіння в процесі роботи, що проявляється в збільшенні опору особливо в перші години роботи (у перші 60...80 годин опір зростає на 15...20 %). Останнє викликає необхідність регулювання напруги живлення зі зміною його в 2...2,5 рази протягом періоду експлуатації печі.

Графітові електронагрівачі, що використовуються в печах з температурою 1400...3000 °С, виготовляються у вигляді стрижнів круглого, квадратного й прямокутного перетинів і труб діаметром до 100...150 і довжиною до 1500 мм. Внутрішня частина труби може бути використана в якості робочого простору печі. У деяких випадках трубчасті нагрівачі для збільшення опору виконуються у вигляді згорнутих у трубку зигзагів, що мають прорізи

по утворюючій циліндра. Недолік графітових нагрівачів – легка окисненість на повітрі при температурі вище 600 °С. Тому вони застосовуються в печах із захисною атмосферою, у вакуумних печах або в печах з гарною герметизацією при температурі не вище 2200 °С.

Нагрівачі з дисиліциду молібдену ( $MoSi_2$ ) призначені для роботи в печах з окисною атмосферою. У перші години роботи нагрівача при температурі вище 1000° С відбувається спікання матеріалу з утворенням на поверхні захисної плівки двоокису кремнію. При роботі в печі з температурою 1700 °С і вище відбувається зменшення поперечного переріза нагрівача, захисна плівка відшаровується, тому застосовувати їх при температурі вище 1600 °С не рекомендується. Опір нагрівача з дисиліциду молібдену, трохи зменшуючись у перші години роботи, надалі залежить від температури печі, зростаючи з її підвищенням. Термін служби нагрівачів визначається умовами роботи й різко скорочується при наявності сірки в атмосфері печі. Нагрівачі з дисиліциду молібдену виготовляються в основному U-образної форми й можуть установлюватися як на склепінні печі, так і на бічних її стінках. Живлення печей з нагрівачами цього типу здійснюється із застосуванням понижуючого східчастого трансформатора.

Електричні печі опору живляться зазвичай від силової мережі змінного струму напругою 380/220 або 500 В. Проектувати печі на напругу вище 500 В не рекомендується у зв'язку зі зростанням електропровідності футерівки при високих температурах і підвищенням небезпеки короткого замикання в печі, а також небезпеки для обслуговуючого персоналу. Печі малої потужності (до 20 кВт) виготовляють однофазними, печі великої потужності (>100 кВт) – трифазними. При великій потужності печі або при окремому нагріванні печі по зонах нагрівачі можна поєднувати в окремі групи із самостійним живленням від мережі. У печах прямого нагріву, а також у печах із графітовими, карбондовими нагрівачами й нагрівачами з дисиліциду молібдену

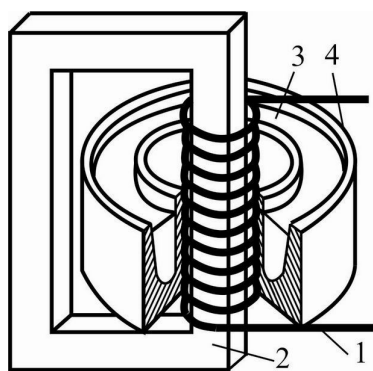
або з металевими литими нагрівачами великого перетину використовуються понижуючі трансформатори.

Останнім часом для живлення печей опору знаходять застосування керовані напівпровідникові вентиля (тиристори). При цьому на піч подається постійний струм, а напруга змінюється безконтактним методом шляхом зміни напруги на керуючому електроді вентиля.

### 3.2.2 Індукційний нагрів в каналних печах

Печі такого типу працюють як силовий понижуючий трансформатор, у якому первинною обмоткою, розміщеною на сталевому магнітопроводі, є багатовиткова циліндрична котушка-індуктор, а вторинною, що охоплює індуктор, - виток розплавленого металу в кільцевому каналі футерівки (рис.3.2).

Прямий нагрів металу електричним струмом і використання принципу трансформації енергії, що дозволяє підводити до печі струм невеликої величини при високій напрузі, забезпечують одержання високих теплового й електричного к.к.д. (малі теплові втрати й малі втрати в проводах, що підводять).



1) індуктор; 2) магнітопровід; 3) метал, що нагрівається; 4) футерівка

Рисунок 3.2 – Схема індукційної каналної печі

Е.д.с., створювана в металі при проходженні змінного струму в індукторі, визначається за рівнянням

$$E = 4,44 \cdot B \cdot S_M \cdot f \cdot 10^{-12}, \quad (3.8)$$

де  $B$  – магнітна індукція матеріалу в магнітопроводі, Тл;  $S_M$  – перетин магнітопроводу, см<sup>2</sup>;  $f$  – частота живильного струму, Гц.

Так як що нагрів металу можливий тільки при наявності замкненого витка у вторинному ланцюгу, частина розплавленого металу повинна постійно залишатися в печі. Цей об'єм металу зветься «болото». Наявність болота ускладнює перехід із плавки одного металу на плавку іншого й вимагає безперервного підігріву залишеного металу. Затвердіння його часто приводить до розриву витка й припиненню роботи печі або розтріскуванню стінок вогнетривкого каналу, тобто виходу печі з ладу. До недоліків таких печей слід віднести також засмічення каналів окислами, коли вони важче рідкого металу.

Наявність розплавленого рідкого металу як вторинного витка в магнітному полі індуктора приводить до виникнення таких електродинамічних ефектів, як стискаючий, моторний і вихровий.

*Стискаючий ефект* виникає в результаті взаємодії між електричним струмом, що протікає в металі, і створюваним ним магнітним полем. Пружні магнітні силові лінії, прагнучи скоротитися, стискають струмонесний провідник, у цьому випадку рідкий метал. Сила, що стискає метал, тим більше, чим більше щільність струму. Підвищення щільності струму понад деяке критичне значення приводить до перетискання металу в каналі й розриву вторинного ланцюга. Силою, що протидіє стиску в рідкому металі, є його статичний тиск, тому в печах з вертикальним закритим каналом стискаючий ефект проявляється менше, ніж у печах з горизонтальним закритим каналом. Наявність такого ефекту накладає обмеження на щільність струму, тобто на потужність печі.

*Відцентровим, або моторним, ефектом* називається явище взаємного відштовхування двох прилеглих паралельних провідників при різних напрямках струмів у них. У цьому випадку це має місце між витками індуктора й витком розплавленого металу. На метал у каналі будуть діяти дві сили (рис. 3.3) – вертикальна сила ваги ( $R$ ) й горизонтальна сила відштовхування ( $H$ ). Під дією цих двох сил рідкий метал відштовхується до зовнішньої стінки каналу. Відбувається рух металу в каналі біля зовнішніх стінок нагору, поблизу внутрішніх стінок униз, що сприяє перемішуванню й прискоренню нагрівання металу в шахті печі.

Вихровий ефект спостерігається в закритих каналах у місцях зміни перетину. Рух металу в цьому випадку викликається зміною щільності струму в цих місцях, а отже, зміною стискаючого зусилля. Цим пояснюється інтенсивна циркуляція металу між каналом і шахтою, що поліпшує також перемішування металу й сприяє вирівнюванню його температури.

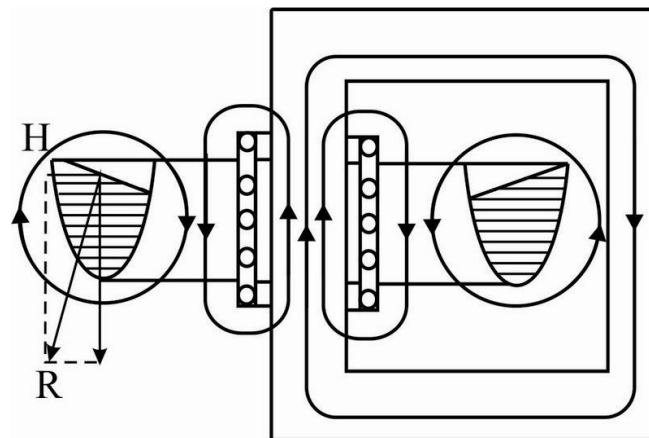


Рисунок 3.3 – Схема дії моторного ефекту в каналі індукційної печі [2]

У печах з горизонтальним закритим каналом тиск металу на стінки каналу менше, ніж у печах з вертикальним каналом. Це дозволяє виготовляти їх великої ємності. Крім того, у цих печах менше можливість ушкодження індуктора металом, що прорвався через стінки каналу, кращі умови охолодження вертикально

розташованих індуктора й сердечника й простіше ремонт футерівки. Недоліком є необхідність залишати більше металу в печі.

У печах великої ємності встановлюють кілька індукційних нагрівальних систем або їх роблять трифазними.

Магнітопровід індукційної нагрівальної системи так само, як і магнітопровід силових трансформаторів, збирається із пластин трансформаторної сталі, ізолюваних один від одного. При ізоляції рідким склом сердечник може витримати нагрів до 350 °С.

Індуктор виготовляється з мідних шин або профільованих труб, намотаних в один або два шари. Шини намотуються на ребро. Труби застосовуються прямокутного перетину. Витки ізолюються один від одного азбестовими прокладками, склотканиною або кіперною стрічкою, просоченою лаком. Для зручності монтажу всі витки щільно скріплюються загальною обмоткою. В індукторах із труб застосовується водяне охолодження. Для охолодження футерівки каналної частини печі встановлюється вентилятор.

Площа поперечного перерізу шини знаходиться як відношення сили струму в індукторі до припустимої в ньому щільності струму. Якщо перетин вийде більше 200 мм<sup>2</sup>, то рекомендується, для зменшення впливу поверхневого ефекту, намотування робити декількома паралельними шинами з перетином не більше 200 мм<sup>2</sup> кожної.

Між індуктором і магнітопроводом установлюється циліндрична прокладка з азбестового картону, просоченого рідким склом. Для захисту індуктора при можливому протіканні через футерівку рідкого металу в отвір футерівки вставляється азбоцементний або нікелевий циліндр, який повинен мати проріз по утворюючій, щоб не бути короткозамкненим витком у магнітному полі індуктора.

Футерівка індукційної системи, що працює в напруженому температурному режимі, повинна бути вогнетривкою, термостійкою, механічно міцною й стійкою до хімічних впливів. Одержали



поширення кварцитова, магнезитова й високоглиноземиста футерівки. У якості сполучного матеріалу застосовуються вогнетривка глина, мелене скло, борна кислота, бура, гексаметафосфат натрію. У футерівці робиться канал для металу, охоплюючий індуктор.

Канал має прямокутний або овальний перетин, причому довга сторона розташовується уздовж осі індуктора. Перетин каналу визначається за припустимою щільністю струму  $j_2:s_2 = I_2:j_2$ . Припустиму щільність струму звичайно ухвалюють рівній 8...10 А/мм<sup>2</sup> для міді, нікелю і їх сплавів з іншими металами й 3,5...5 А/мм<sup>2</sup> для алюмінієвих сплавів.

Футерівку, як правило, виконують набиванням шарами з наступним випалом і спіканням безпосередньо в печі. Для одержання каналу закладається шаблон, що виготовляється або з того ж металу, для плавки якого призначена піч, або розбірним зі сталі. У першому випадку випал футерівки здійснюють поступовим нагріванням шаблону на низькій напрузі. У другому випадку сушіння й розігрів проводять електричним нагрівачем або мазутною горілкою. Термін служби добре виготовленої футерівки при плавці латуні становить 200 плавок і вище, при плавці цинку 2...3 роки. Футерівка каналної частини печі зовні має металевий каркас, що дозволяє з'єднати індукційну систему із шахтою. Каркас виконується литтям із бронзи з обов'язковим розрізом щоб уникнути утворення короткозамкненого витка навколо індуктора. Вітчизняною промисловістю випускаються каналні індукційні печі різного призначення.

Електроживлення індукційних каналних печей здійснюється струмом промислової частоти (50 Гц) по системі індивідуального або групового живлення. При індивідуальній системі кожна піч живиться через східчастий понижувальний трансформатор або автотрансформатор від високовольтної мережі з напругою 6000...10000 В. При груповому живленні піч через автотрансформатор підключається до заводської мережі з напругою 220 і 380 В або до трансформатора, що обслуговує кілька печей.

Індивідуальне живлення для печей великої потужності більш економічно, тому що дозволяє скоротити витрату матеріалу й зменшити втрати в проводах, що підводять. При груповій системі живлення спрощується обслуговування.

Печі виготовляють однофазними або трифазними. Часто в одній печі робиться кілька однофазних однакових індукційних систем, причому якщо число систем кратне трьом, включення такої печі в трифазну мережу дозволяє одержати рівномірне за фазами навантаження. Навантаження буде також рівномірним, якщо в трифазну мережу включити кратне трьом число однофазних печей однакової потужності.

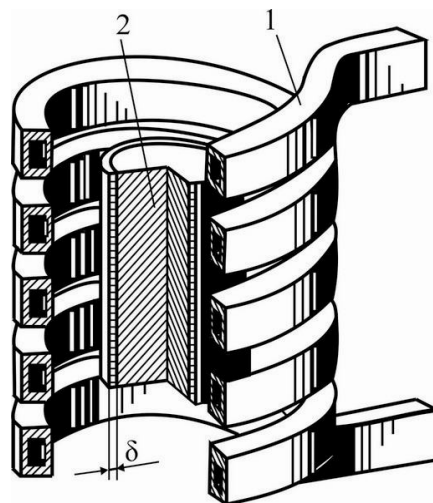
### 3.2.3 Індукційний нагрів в тигельних печах

В індукційних тигельних печах метал, що нагрівається, або металевий виріб поміщають у перемінне магнітне поле усередину індуктора (рис. 3.4). Під дією перемінного поля, що пронизує метал, в ньому виникає е.д.с. індукції, що створює струми вихрового характеру.

Вихрові струми циркулюють у металевому завантаженні в площині, перпендикулярній напрямку магнітного поля, і нагрівають метал. Під дією поверхневого ефекту відбувається витиснення струмів до поверхні завантаження, де вони майже повністю зосереджуються в тонкому шарі  $\delta$ . Тут виділяється 90...95 % енергії, що поглинається металом, нагрів основної маси металу відбувається за рахунок його теплопровідності. Товщина поверхневого шару, см, названа глибиною проникнення струму, визначається як:

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho_t}{\mu_t \cdot f}}, \quad (3.9)$$

де  $\rho_t$  – питомий опір матеріалу завантаження при даній температурі, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $\mu_t$  – магнітна проникність матеріалу при даній температурі, для більшості кольорових металів  $\mu_t = 1$ ;  $f$  – частота струму, Гц. Звідси глибина проникнення струму тим більше, чим більше питомий опір матеріалу й чим менше його магнітна проникність і частота живильного струму.



1) індуктор; 2) метал, що нагрівається

Рисунок 3.4 – Схематичне зображення індукційної тигельної печі [2]

При індукційному нагріві зберігаються всі переваги прямого нагріву металу електричним струмом такі, як велика швидкість нагрівання й малі втрати металу від випару.

До недоліків індукційного нагрівання відносять малу стійкість футерівки при різких коливаннях температури внаслідок малої теплової інерції й можливість аварійного роз'єднання тигля, а також складне й дороге електроустаткування для живлення печей, що включає установку конденсаторної батареї. Через відсутність сталевого магнітопроводу в тигельних індукційних печах має місце великий магнітний потік розсіювання. Індуктивний опір таких печей великий, а коефіцієнт потужності дуже низький ( $\cos \varphi = 0,03 \dots 0,2$ ). Так як споживання енергії з мережі при тако-

му  $\cos\varphi$  неприпустимо, для його підвищення застосовуються конденсатори, що включаються, як правило, паралельно в ланцюг живлення індуктора. При такому включенні в системі індуктор – конденсатор можна одержати резонанс струмів і підняти  $\cos\varphi$  до величини, близької до одиниці. Через те, що в процесі нагрівання металу індуктивний опір печі міняється, конденсаторну батарею роблять багатосекційною.

При великих геометричних розмірах завантаження ( тобто для печей великої ємності) підвищення частоти недоцільно, вони успішно працюють і на частоті 50 Гц. Це особливо важливо, тому що підвищення частоти вимагає дорогого електроустаткування.

Потужність, спожита піччю, складається з потужності, переданої металу, і потужності, що губиться в індукторі, тобто  $P = P_1 + P_2$ .

Електричний к.к.д. печі визначається як відношення потужності, що виділяється у металі, до всієї споживаної потужності:

$$\eta_{el} = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_2}}. \quad (3.10)$$

Потужність  $P_1$ , що губиться в індукторі, і потужність  $P_2$ , виділена в металі, відповідно дорівнюють:

$$P_1 = R_1 \cdot I_1^2; P_2 = R_2 \cdot I_2^2 = R_2 \cdot n^2 \cdot I_1^2, \quad (3.11)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – активний опір індуктора й завантаження, Ом;  $I_1$  і  $I_2$  – сила струму в індукторі й завантаженні, А;  $n$  – коефіцієнт трансформації, дорівнює числу витків індуктора.

Активний опір  $R_1$  і  $R_2$  визначають геометричними розмірами й матеріалом індуктора і завантаження, а також глибиною проникнення струму в матеріал індуктора  $\delta_1$  і завантаження  $\delta_2$ :

$$R_1 = \rho_1 \frac{l_1}{s_1} = \rho_1 \frac{n^2 \cdot \pi \cdot d_1}{\delta_1 \cdot h_1}; \quad (3.12)$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{l_2}{s_2} = \rho_2 \frac{\pi \cdot d_2}{\delta_2 \cdot h_2}, \quad (3.13)$$

де  $\delta_1 = 50,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu_1 \cdot f}}$  й  $\delta_2 = 50,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot f}}$ ;  $d_1, d_2, h_1, h_2$  – діаметри й висоти індуктора і металу відповідно, м.

Потужність  $P_2$  виділяється в металі у вигляді тепла, що нагріває,  $P_n$  і частково випромінюється в навколишній простір  $P_n$  тобто  $P_2 = P_n + P_n$ .

Тепловий к.к.д. печі визначається відношенням потужності, що йде на нагрівання металу, до всієї виділеної в металі потужності:

$$\eta_{мен} = \frac{P_n}{P_n + P_n}. \quad (3.14)$$

Електричний к.к.д. печі збільшується зі зменшенням відношення  $d_1 / d_2$  (тобто зі зменшенням зазору між індуктором і металом), а також зі збільшенням відношення питомих опорів металу, що нагрівається, і матеріалу індуктора. Тому що більшість кольорових металів має малий питомий опір, плавка їх часто проводиться в тиглях із графіту або сталі. У цьому випадку вторинний струм, протікаючи в стінках тигля, нагріває його, нагрів металу відбувається за рахунок тепловіддачі від стінок тигля.

Електричний к.к.д. збільшується також при збільшенні відношення діаметра завантаження до глибини проникнення струму в ній ( $d_2 / \delta_2$ ), досягаючи максимуму при  $d_2 \geq 10\delta_2$ . Однак оскільки тепловий к.к.д. зменшується зі збільшенням відношення  $d_2 / \delta_2$  (зменшується частка прямого нагрівання електричним струмом), необхідно це відношення вибирати з урахуванням одержання максимального загального к.к.д.

Прийнято брати для плавильних печей відношення  $d_2 / \delta_2$  близьким до 7, для нагрівальних – близьким до 3,5. Звідси можна визначити найбільш доцільне (оптимальне) у даних умовах значення частоти живильного струму. Приймаючи  $d_2 = (3,5 \dots 7)\delta_2$ , а  $\delta_2 = 50,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot f}}$ , знаходимо, що

$$f \geq (3,1 \dots 12,4) \cdot 10^4 \cdot \frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot d_2^2}, \quad (3.15)$$

тобто необхідна частота живильного струму залежить від розміру виробу, що нагрівається. Тому великі печі ефективно працюють на частоті 50 Гц.

### 3.2.4 Дуговий і плазмовий нагрів

У дугових і плазмових електропечах джерелом тепла служить електрична дуга, що представляє собою один з видів газового розряду. Необхідна умова виникнення й горіння дуги – часткова іонізація газу в просторі між електродами. Іонізація газу може відбуватися в результаті термоелектронної емісії з поверхні нагрітого до високої температури електрода з негативним потенціалом – катода. Рухаючись під дією електричного поля до позитивного електрода – аноду, електрони вже в безпосередній близькості від катода здобувають кінетичну енергію, достатню для наступної іонізації газу. Іонізація газу виникає й у результаті нагрівання до високої температури (термічна іонізація). Попереднє нагрівання катода до температури, необхідної для термоелектронної емісії, може бути здійснене зближенням електродів до одержання короткого замикання. При короткому замиканні в місці торкання електродів розвивається велика температура, кінці електродів розжарюються, і газ, що оточує електроди, розігрі-

вається. При плавному розведенні електродів між ними виникає дуговий розряд.

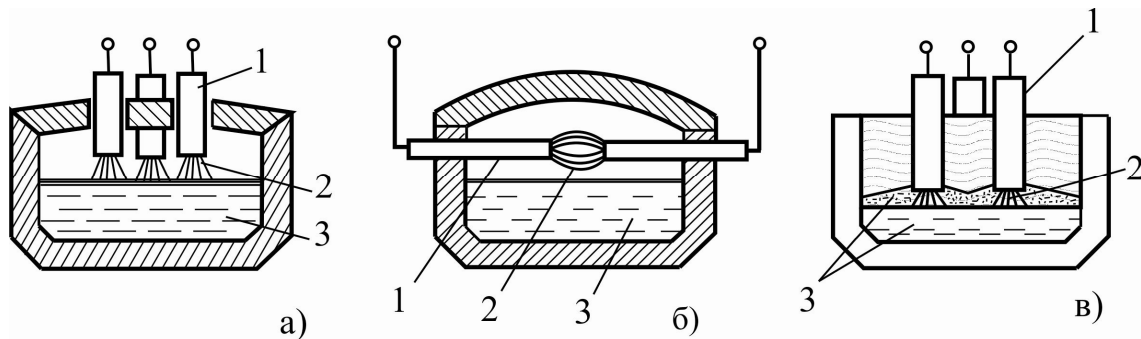
У проміжку між електродами, у зоні дуги, утворюється електропровідне середовище із суміші електронів, нейтральних і іонізованих атомів і молекул газу. Такий стан газу носить назву «плазми», яку вважають четвертим станом речовини. До плазми застосовані закони для ідеальних газів, однак на відміну від ідеальних газів на рух часток у плазмі впливає зовнішнє магнітне поле. Загальний заряд плазми дорівнює нулю, отже, число позитивних і негативних зарядів у плазмі повинне бути приблизно однаковим. Основною характеристикою плазми є ступінь її іонізації, тобто відношення числа заряджених часток до їхнього загального числа. Залежно від ступеня іонізації розрізняють «холодну» (низькотемпературну) плазму із ступенем іонізації близько 1 % і «гарячу» (високотемпературну) плазму зі ступенем іонізації, близької до 100 %. Температура гарячої плазми становить сотні тисяч градусів. У такому стані перебуває речовина в надрах сонця. У дугових печах і для нагрівання використовується холодна плазма з температурою до 50000 К.

У стовпі дуги, що утворюється при дуговому розряді, між електродами протікають складні процеси, пов'язані з рухом заряджених і нейтральних часток і рекомбінацією електронів і іонів з утворенням нейтральних часток. При цьому дотримується локальна термічна рівновага. На частку рухливих електронів доводиться значна частина енергії. Нагрівання газу відбувається в результаті зіткнень електронів. Зі збільшенням щільності струму в стовпі дуги температура плазми зростає. Оскільки електрони, іони й нейтральні молекули мають різну кінетичну енергію, у плазмі розрізняють електронну ( $T_e$ ) іонну ( $T_i$ ) і молекулярну ( $T_m$ ) температури. Як правило,  $T_e > T_i > T_m$ . Зі збільшенням щільності струму температури вирівнюються.

Високий температурний потенціал плазми дозволяє з успіхом використовувати її для створення високотемпературних печей з великою продуктивністю. Залежно від характеру газового

середовища, взаємного розташування електродів і металу розрізняють чотири типи дугових печей – прямого, непрямого, змішаного й плазмового нагріву (рис. 3.5).

У дугових печах непрямого нагріву використовують дугу змінного струму, що горить між двома графітовими електродами й випромінює тепло в грубний простір (рис. 3.5, б). Такі печі обмежено використовуються для перетоплення металу.



1) електроди; 2) дуга; 3) матеріал, що нагрівається

Рисунок 3.5 – Схеми електричних дугових печей: а) прямого нагріву; б) непрямого; в) змішаного; г) плазмового [2]

Широко використовуються для плавки дугові печі прямої дії на змінному струмі, у яких дуга горить між графітовим електродом і металом (рис. 3.5, а) так, що тепло металу частково передається безпосередньо від зіткнення із плазмою, частково в результаті випромінювання стовпа дуги в грубний простір. У вакуумних дугових печах концентрація залишкових газів мала, тому дуга горить у парах металу, що розплавляється, між електродом і ванною металу. Нагрів проводиться прямим контактом металу з дугою.

При змішаному нагріванні дуга створюється між електродами, зануреними в шихту, і поверхнею металу (рис. 3.5, в). У цьому випадку має місце як безпосереднє нагрівання металу дугою, так і передача тепла від розігрітої шихти при частковому проходженні через неї струму між електродами.



У плазмових установках використовують різного типу плазмотрони, у яких газ, що нагрівається, проходить через проміжок між електродами й перетворюється в плазму. Плазма з високою температурою використовується для плавлення металу й для здійснення хімічної реакції (відновлення, окислення). Для цього спеціально обирається газове середовище. Іонізовані частки газу мають велику активність і сприяють прискоренню хімічної реакції.

При живленні дугових печей змінним струмом напруга на електродах буде мінятися в часі за величиною й за знаком. Той самий електрод буде поперемінно то катодом, то анодом. У момент переходу напруги через нуль дуга повинна гаснути. Сила струму дуги змінюється від нуля в момент запалювання дуги до максимуму й знову зменшується до нуля в момент припинення горіння дуги. При струмі, рівному нулю, температура в міжелектродному просторі падає, і відбувається дейонізація газу. Зі зміною полярності електродів усі явища повторюються знову. Таким чином, при наявності в ланцюгу дуги тільки активного опору дуга горить із перервами, періодичність яких дорівнює подвоєній частоті живильного струму.

Електрична дуга як будь-який провідник із струмом створює власне магнітне поле й зазнає вплив зовнішнього магнітного поля. Під дією власного нуля стовп дуги стискується в поперечному напрямку. Зовнішнє магнітне поле може бути спрямоване уздовж осі дуги або перпендикулярно до неї. У першому випадку воно викликає скручування дуги навколо осі, у другому – її відхилення. Наявність феромагнітного матеріалу поблизу дуги викликає також її відхилення. Зовнішнє магнітне поле використовується не тільки для впливу на дугу, але й для інтенсивного перемішування рідкого металу, що особливо важливо при плавці металу в дугових вакуумних печах.

Для горіння дуги й підведення електричної енергії в піч використовують електроди. Основними вимогами, якими повинні задовольняти електроди, є:

1) гарна електропровідність, що забезпечує мінімальні втрати електроенергії при підведенні струму до дуги;

2) висока механічна міцність, що запобігає обриву і ламання їх при роботі печі;

3) висока температура окислення їх на повітрі й мінімальна окисненість при горінні дуги, що дозволяє зменшити витрати електродів на плавку;

4) мала вартість електродів, так як витрати на електроди мають велику питому вагу від вартості плавки.

У практиці будівництва дугових печей знайшли застосування наступні типи електродів: вугільні обпалені, вугільні самоспікливі, графітовані, вольфрамові й з металу, для плавки якого використовується піч (електроди, що витрачаються).

### 3.2.5 Електронно-променевий нагрів

При електронно-променевому нагріванні потужний спрямований пучок електронів, випромінюваних спеціальною електронною гарматою, розігнаний у вакуумі до великих швидкостей, бомбардує метал, що нагрівається. При зіткненні з металом кінетична енергія електронів переходить у теплову.

Електронно-променевий нагрів є порівняно новим видом нагрівання. Забезпечуючи можливість одержання високих температур у високому вакуумі, він усе ширше застосовується для плавки високореакційних, тугоплавких металів. Електронно-променевий нагрів створює також усі умови для одержання дуже чистих металів.

Використання в металургії даного нагріву стало можливим завдяки розвитку електронної техніки, що розв'язала завдання одержання потужних потоків електронів і керування ними, і успіхів вакуумної техніки, що забезпечили одержання глибокого вакууму в великих печах ємністю в сотні тонн металу.

В електронних пушках відбувається формування випромінюваного пучка електронів. Загальна потужність такого пучку:

$$P_{\text{л}} = I_a \cdot U_a, \quad (3.16)$$

де  $I_a$  – сила струму в електронному пучку, А;  $U_a$  – анодна (прискорююча) напруга, В.

Перетином пучка електронів можна керувати за допомогою магнітних і електричних нулів. Це дозволяє одержувати на поверхні металу різну щільність теплової енергії. Питома потужність у пучку малого розміру при високій прискорювальній напрузі досягає тисяч кіловатів на квадратний сантиметр.

В електронно-променевих печах необхідно підтримувати вакуум  $10^{-2}$  Па. Довжина вільного пробігу електронів у цьому випадку велика, і вони практично рухаються без зіткнення між собою й молекулами залишкового газу. Швидкість руху електронів (м/с) при цьому визначається залежністю  $v \approx 600 \cdot \sqrt{U_a}$ . При прискорювальній напрузі 10 кВ швидкість електрона становить  $\sim 60$  км/с.

При влученні на поверхню металу електрони проникають усередину, зазнаючи складні взаємодії з речовиною. Енергія, що віддається атомам і молекулам у кристалічних ґратах речовини, збільшує амплітуду їх коливання, викликаючи місцеве підвищення температури. Придбане тепло поширюється по всьому матеріалу. У результаті взаємодії з речовиною електрони гальмуються в ньому, проникаючи на невелику глибину (кілька мікрометрів). Крім атомів і молекул, електрони на своєму шляху зустрічаються з вільними й зв'язаними електронами з рівною масою, але з меншою енергією. Зіткнення зі зв'язаними електронами можуть привести до їхнього переходу на більш вилучену орбіту з наступним поверненням на колишнє місце й випромінюванням при цьому кванта електромагнітної енергії, частота якої лежить в області рентгенівського випромінювання. Рентгенівське випромінювання металом не поглинається й тому не нагріває його. Од-

нак це випромінювання становить небезпеку для обслуговуючого персоналу. Оскільки інтенсивність його залежить від швидкості електронів пучка, а остання від прискорювальної напруги, рекомендується за правилами техніки безпеки обирати прискорювальну напругу меншу 35 кВ. Втрати енергії на рентгенівське опромінення відносно невеликі й звичайно не перевищують 0,1 % потужності пучка.

Електрони пучка при проходженні у твердому тілі можуть зустрічатися з вільними електронами речовини. При цьому електронам повідомляється енергія, часто достатня для виходу у вакуум і руху з надлишковою енергією. Відбувається вторинна емісія електронів, на що затрачається частина енергії пучка. Якщо сам метал є анодом, то вторинні електрони знову потрапляють на метал, і втрат енергії на вторинну емісію немає. Якщо метал не з'єднаний з позитивним полюсом, то електрони вторинної емісії розсіюються, і їхня енергія губиться. Електрони пучка можуть відбиватися від поверхні металу, віддаючи частину енергії, або пружно відбиватися без віддачі енергії. Потужність усього потоку вторинних і відбитих електронів можна визначити за рівнянням:

$$P_2 = k \cdot r \cdot P_{\text{л}}, \quad (3.17)$$

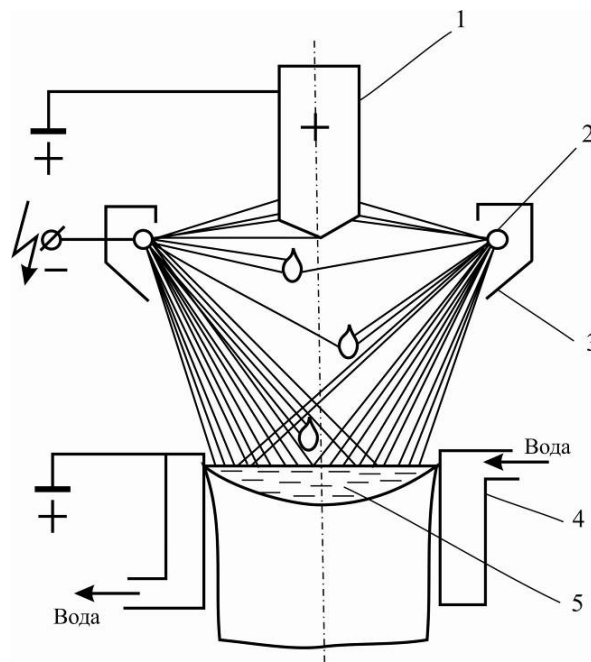
де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує розподіл відбитих електронів за енергіями. При прискорювальній напрузі 10...40 кВ  $k$  змінюється в межах 0,45...0,5;  $r$  – коефіцієнт відображення, що залежить від атомного номера металу, що нагрівається. Для металів з більшим атомним номером (тантал, вольфрам) втрати енергії на відображення електронів можуть досягати 20...25%.

При великому перегріві металу й при високій пружності його пару біля поверхні утворюється шар з підвищеним тиском пару металу. Електрони, проходячи через цей шар, співударяються

з молекулами пари й іонізують їх. На це витрачається частина енергії пучка електронів (звичайно не більш 3...5 %).

За принципом дії електронні пушки діляться на електростатичні й магнетронні. У свою чергу електростатичні пушки по конструктивних особливостях діляться на пушки з кільцевим катодом, радіальні й аксіальні.

На рис. 3.6 показана схема обладнання *кільцевої електронної гармати* в печі для плавлення злитка металу й нагрівання ванни металу перед кристалізацією.



1) злиток, що переплавляється; 2) кільцевий катод; 3) фокусуючий електрод (екран електростатичного фокусування); 4) кристалізатор; 5) ванна рідкого металу на злитку, що виплавляється

Рисунок 3.6 – Схема електронної плавильної установки з кільцевою гарматою [2]

Кільцевий катод, що виготовляється зазвичай із вольфрамового дроту, нагрівається до температури більш 2000 °С від джерела живлення. Анодом служить злиток, що переплавляється, і метал у кристалізаторі. У такий спосіб утворюється діод, у якому

електрони, прискорені різницею потенціалів між катодом і анодом, направляються убік металу. Для зменшення розсіювання електронів використовується фокусуючий електрод, електрично з'єднаний з катодом. Прискорений потік електронів оплавляє кінець злитка й перегріває метал у ванні кристалізатору. Прискорювальна напруга становить 10...15 кВ.

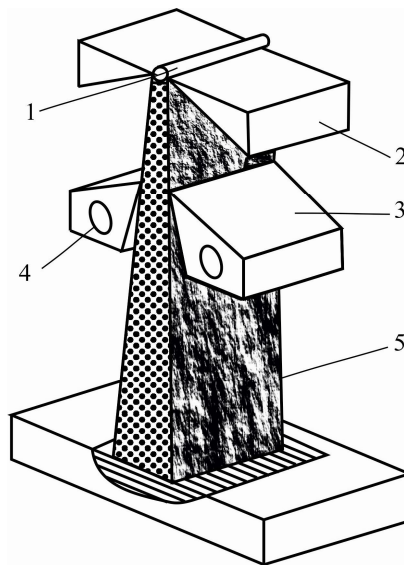
Сила струму в електронному пучку  $I_a$  залежить від прискорювальної напруги  $U_a$  за формулою  $I_a = P \cdot U_a^{3/2}$ , де  $P$  – повна провідність системи катод-анод, яка залежить від форми електродів, геометрії гармати. Ця величина зветься первіансом й має розмірність А / В<sup>3/2</sup>. Для гармати з кільцевим катодом первіанс звичайно дорівнює  $10^{-5}$  А / В<sup>3/2</sup>.

Пушка з кільцевим катодом є найпростішим обладнанням, використовуваним для електронно-променевого нагріву. Така пушка має високий к.к.д., оскільки весь потік електронів потрапляє на метал, включаючи вторинні й відбиті електрони. Потужність, що затрачена на нагрівання катода й сягаюча іноді 15...40 % від потужності електронного пучка, частково використовується у вигляді променистої енергії для нагрівання злитка. Однак при експлуатації гармати з кільцевим катодом зустрілися з великими труднощами. До них слід віднести в першу чергу швидкий вихід з ладу катода, розташованого поблизу розплавленого металу (пари металу потрапляють на катод і утворюють легкоплавку евтектику). У той же час підвищення тиску в просторі між катодом і анодом понад 0,01 Па за рахунок пару, і газів, що виділяються з металу створює можливість газового розряду з руйнуванням катода. Вакуумні насоси не завжди в стані підтримувати у вузькому проміжку між анодом і катодом необхідний вакуум ( $< 10^{-2}$  Па). Цим пояснюється обмежене застосування установок з кільцевим катодом.

*Радіальні електронні гармати.* У радіальних гарматах для прискорення електронів використовують окремий електрод – анод, не з'єднаний з металом, що нагрівається. На рис. 3.7 пока-

зана схема елемента радіальної гармати, що формує плоский електронний промінь.

Катод у вигляді вольфрамового дроту, що нагрівається електричним струмом, поміщений у проріз фокусуючого електрода. Анод охолоджується водою. Подаюча на анод прискорювальна напруга 10...15 кВ дозволяє створити плоский потік електронів, що злегка розходиться за напрямком від аноду (кут 8...10°). Електронний пучок направляється прямо або за допомогою магнітної лінзи відхиляється убік металу, що нагрівається. Відхилення дозволяє уникнути влучення бризів металу на катод. Окремо взяті обладнання має потужність 10...35 кВт, первіанс якого складає  $(2...1,2) \cdot 10^{-6} \text{ А / В}^{3/2}$ . Поєднуючи окремі елементи, можна створювати системи, що відповідають формі виробу, що нагрівається (по колу, у лінію і т.д.). Катоди всіх елементів установки включаються в електричну мережу послідовно, аноди – паралельно.



1) лінійний катод; 2) катодний фокусуючий елемент; 3) анод; 4) канали для охолодження анода; 5) потік електронів

Рисунок 3.7 – Схема радіально випромінюючого елемента, що формує плоский електронний промінь [2]

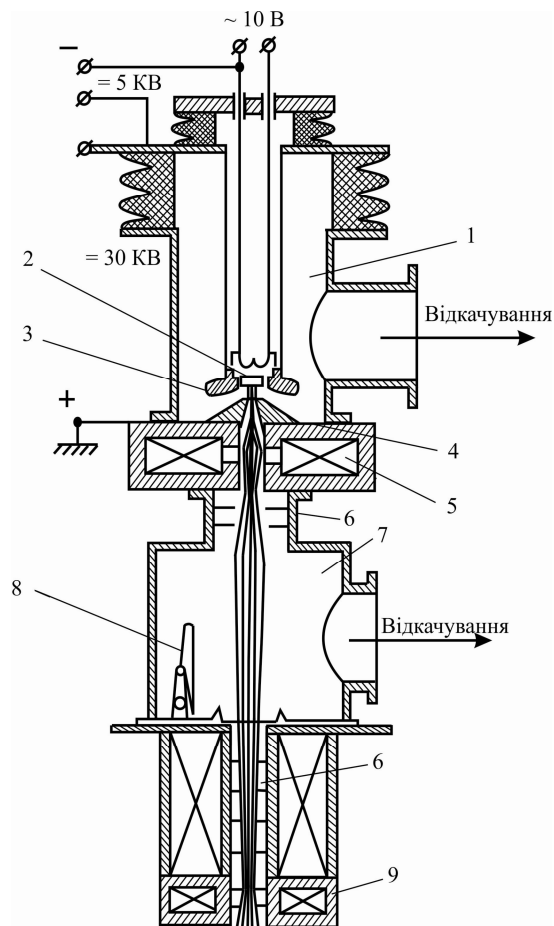
Перевагою радіальних гармат є те, що катод може бути вилучений від металу, що нагрівається, це дозволяє збільшити строк його служби. Можливо, також організувати самостійну відкачку газів з вузла катод-анод, що виключає можливість газового розряду на цій ділянці. До недоліків радіальних гармат відносять складність і громіздкість печей великої потужності з декількома елементами й труднощі організації самостійної відкачки біля катодного простору.

*Аксіальні електронні пушки.* Потреба повністю розділити системи відкачки печі й біля катодного простору привела до створення потужних аксіальних гармат (рис. 3.8). У верхній камері гармати розміщений катод, нагрів якого в пушках великої потужності може здійснюватися за допомогою допоміжного електронно-променевого нагрівача. Катодом такого нагрівача служить спіраль із вольфрамового дроту, що живиться від джерела перемінного струму з напругою близько 10 В. Прискорююча напруга між допоміжним і основним катодом обирається 3...5 кВ. Витрата енергії на нагрівання основного катода становить 3...5 % від потужності електронного променя. Нагрітий основний пластинчастий катод емітує електрони, які за допомогою фокусуєчого елемента й прискорювального анода формуються в пучок, що проходить через анодну діафрагму. Камера випромінювача має самостійну систему відкачки, що забезпечує вакуум  $(0,5...1) \cdot 10^{-3}$  Па, що визначає стабільну роботу, надійність в експлуатації й тривалий термін служби катода незалежно від тиску в робочій камері печі. Пучок електронів, який вийшов з отвору в аноді фокусується першою магнітною лінзою.

Системи діафрагм обмежують проникнення газу з робочого простору в катодний вузол гармати. Камера може мати додаткову вакуумну систему. Вакуумний затвор (клапан) дозволяє від'єднувати гармату від робочої камери й тим самим, не порушуючи вакууму в гарматі, напускати повітря в грубний простір. На виході пучка в робочу камеру розміщують відхиляючу систему, за допомогою якої встановлюється пучок електронів, що нагріває,



діаметром 5...10 мм у будь-якому місці виробу або переміщається під час плавки за заданим законом. Аксиальна гармата може працювати при залишковому тиску в робочій камері печі 0,1...0,5 Па, що являється особливо коштовним при плавці кольорових і рідких металів з великою пружністю пари й великим газовідділенням. Гармати, що випускаються, мають потужність від 30 до 1200 кВт, первіанс досягає  $(5...6) \cdot 10^{-6} \text{ А} / \text{В}^{3/2}$  при прискорювальній напрузі до 35 кВ.

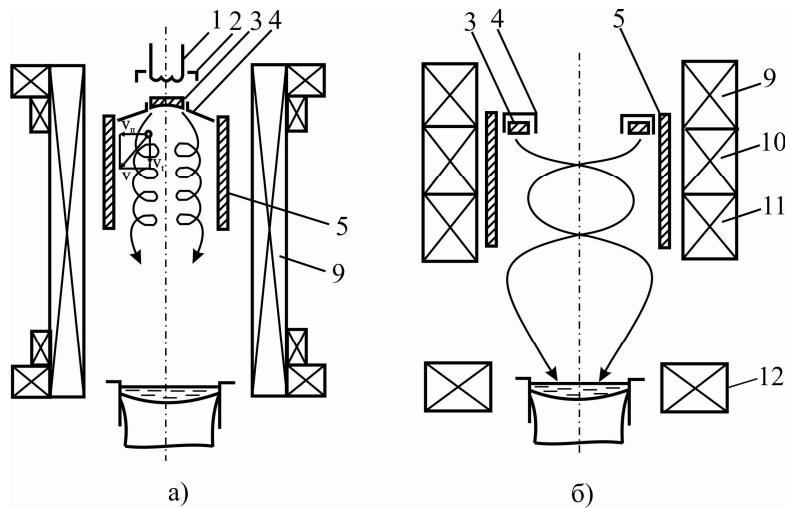


1) камера випромінювача; 2) основний катод; 3) біля катодний фокусуючий елемент; 4) прискорювальний анод з діафрагмою; 5) перша магнітна лінза; 6) система діафрагм; 7) проміжна камера відкачки; 8) вакуумний клапан; 9) вихідна магнітна лінза й відхиляюча система

Рисунок 3.8 – Пристрій аксіальної електронної гармати [2]

Магнетронні електронні пушки використовують накладення магнітного поля на потік електронів, що приводить до руху електрона по спіралі. Це знижує вимогу до електростатичної системи катод-анод.

На Рисунку 3.9 показано два різновиди магнетронних гармат з аксіальним (рис. 3.9, а) і радіальним (рис. 3.9, б) катодами. Велика робоча поверхня радіального катода дозволяє мати первіанс цих гармат до  $20 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ .



1) допоміжний катод; 2, 4) електроди, що фокусують; 3) робочий катод; 5) анод; 6) соленоїд; 7, 5) додаткові витки; 9-12) котушки магнітної системи, що фокусує

Рисунок 3.9 – Схема плавильних установок з магнетронною гарматою для створення однорідного магнітного поля (а) і неоднорідного магнітного поля (б) [2]

Швидкість електрона  $v$  можна розкласти на дві складові – тангенціальну  $v_t$  уздовж магнітного поля й нормальну  $v_n$ , перпендикулярну до нього. Рух електрона можна розглядати як складне, що складається з рівномірного руху уздовж осі під дією тангенціальної складової швидкості, і обертового руху, що викликається доцентровою силою, що виникає в результаті взаємодії сил, що діють на електрон, який рухається з нормальною

швидкістю в магнітному полі. Оскільки електрон рухається в прискорювальному електричному полі, то рух буде являти собою гвинтову лінію на конусній поверхні зі змінним кроком.

Можливо, підібрати таке магнітне поле, при якому радіус закручування траєкторії буде менше відстані між катодом і анодом, що виключає влучення електрона на анод. Це дозволяє значно наблизити анод до катода й збільшити їхні поверхні. При цьому можна одержати великі струми при невеликій прискорювальній напрузі (близько 10 кВ). Так як електронний пучок при виході із соленоїда значно розширюється, це роблять додаткові витки. При цьому ускладнюється поділ вакуумних систем пушки й робочої камери. Застосування неоднорідного магнітного поля (рис. 3.9, б) і додаткової магнітної лінзи на рівні поверхні розплаву дозволяє сформувати електронний пучок потрібного розміру й застосувати роздільне вакуумне обладнання для печі й електронної гармати.

### Питання для самоконтролю

- 1) Які існують способи нагріву металургійних агрегатів?
- 2) Назвіть переваги рідкого й газоподібного палива в порівнянні із твердим.
- 3) Назвіть основні хімічні елементи палива.
- 4) Які види аналізу проводять для визначення сполуки палива?
- 5) Що розуміють під поняттям «теплота згорання палива»?
- 6) Назвіть переваги електричного нагріву в порівнянні з паливним.
- 7) Назвіть недоліки електричного нагріву.
- 8) Види електричного нагріву.
- 9) На якому законі базується електричний спосіб нагріву опором?
- 10) Принцип індукційного нагріву.
- 11) Принцип дугового й плазмового нагрівів.
- 12) Принцип електронно-променевого нагріву.

## 4 КЛАСИФІКАЦІЯ І КОНСТРУКЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

Генерація теплоти в печі відбувається шляхом перетворення хімічної або електричної енергії в теплоту. Залежно від джерела тепловиділення печі діляться на паливні, автогенні й електричні.

*Паливні печі.* У паливних печах джерелом теплоти є хімічна енергія твердого, рідкого або газоподібного палива. Теплота виділяється в результаті згоряння палива. Теплоносіями є газоподібні продукти згоряння палива - димові гази.

Паливні металургійні печі підрозділяються на два класи: *полум'яні* й *шарові*. Робочий простір *полум'яних печей* у малому ступені заповнене оброблюваним матеріалом, який розташовується на черені. Основний об'єм робочого простору заповнений полум'ям і димовими газами, що передають теплоту матеріалу. Сучасні полум'яні печі працюють на газоподібному або на рідкім паливі – мазуті. Для спалювання газоподібного палива застосовують горілки, для спалювання мазуту – форсунки. До класу полум'яних печей відносять печі для плавки мідних концентратів на штейн, печі для рафінування міді, різноманітні печі прокатного й ковальсько-пресового виробництва: нагрівальні колодязі; методичні, кільцеві, роликові печі; печі з висувним черенем; трубчасті обертаючі печі, для випалу сипучих матеріалів.

Відомі три різновиди *шарових паливних печей*: із щільним, "киплячим" і зі зваженим шаром оброблюваного матеріалу.

У вертикальних шахтних печах із щільним шаром шихта, до складу якої може входити й тверде кускове паливо, розташована по всьому об'єму печі й повільно опускається зверху вниз. Гарячі гази – продукти горіння палива – рухаються через шар між шматками шихти знизу нагору, тобто в протитечії. Шахтні печі із щільним шаром шихти широко поширені в металургії. До них відносять доменні печі, вагранки, печі для виробництва вапна шляхом випалу вапняку, печі нікелевих і свинцевих заводів.

У печах з "киплячим" шаром під дією газів, що рухаються знизу нагору, роздрібнена шихта, до складу якої може входити й роздрібнене паливо, стає менш щільною. Окремі частки шихти потоком газів піднімаються над шаром подібно киплячої рідини. Іноді разом з повітряним дуттям знизу в піч подають газоподібне паливо. У кольоровій металургії печі з «киплячим» шаром застосовують для випалу сульфідних концентратів різних матеріалів, для сушіння глинозему.

У печах зі зваженим шаром обробляють матеріали, доведені до пилюватого стану. Кожна частка матеріалу перебуває у зваженому стані під дією потоку газів, що йде знизу нагору, і рухається разом з потоком. Застосовують у цих печах розмелене й газоподібне паливо. Їх використовують у кольоровій металургії для плавки сульфідів кольорових металів.

*Автогенні печі.* Джерелом теплоти в цих печах є тепловий ефект екзотермічних реакцій окиснення й горіння ряду елементів, що втримуються в оброблюваних матеріалах. У чорній металургії прикладом автогенних печей є кисневі, сталеплавильні конвертери й двованні сталеплавильні печі. В них при продувці рідкого чавуну киснем відбувається окиснення вуглецю й ряду інших елементів з виділенням теплоти. Цей процес не вимагає витрати палива. В кольоровій металургії при виробництві матеріалів із сульфідної сировини основним джерелом теплогенерації є процес вигорання сірки, що міститься в сульфідах.

У мартенівській печі, поряд з виділенням теплоти згорання палива, відбувається тепловиділення від окиснення вуглецю й інших елементів, що втримуються в рідкій ванні. Такі печі займають проміжне положення між паливними й автогенними печами.

*Електричні печі.* За способом перетворення електричної енергії в теплоту можна виділити три класи печей, застосовуваних у металургії: електродугові, індукційні й печі опору.

У дугових печах використовується принцип пропускання електричного струму через газовий проміжок між двома елек-

тродами. Під дією електричної напруги газ між електродами іонізується й стає електропровідним. При цьому в газовому проміжку виникає електрична дуга, що представляє собою яскраве світло суміші електронів, позитивних іонів, атомів і молекул. Дуга є зоною, у якій енергія електрики перетворюється в теплоту, при цьому температура дуги становить від 3000 до 20000 К.

В індукційних печах використовується властивість змінного електричного струму створювати навколо провідника змінне магнітне поле. Якщо помістити в таке поле тіло, що нагрівається та є провідником, то в ньому будуть індуктуватися вихрові струми. Енергія вихрових струмів перетворюється в теплоту, яка виділяється усередині тіла, що нагрівається.

Робота печей опору заснований на чинності закону Джоуля-Ленца, згідно з яким при протіканні струму в провіднику виділяється теплота, пропорційна його електричному опору. У печах опору можна використовувати постійний і змінний струм.

У металургії електричні печі застосовують для виплавки технічного кремнію, титанових жужелів, для нагрівання металу перед обробкою тиском і при термічній і термохімічній обробці металовиробів.

За технологічним призначенням металургійні печі розділяють на плавильні й нагрівальні. Плавильні печі служать для одержання й переплавлення металів. У цих печах матеріали, як правило, змінюють свій агрегатний стан. Нагрівальні печі служать для нагрівання матеріалів без зміни їх агрегатного стану. Нагрівальні печі застосовують у металургії для випалу вогнетривких виробів, вапняку, магнезиту, для сушіння ливарних форм, руди, піску, для надання металу пластичних властивостей перед обробкою тиском, для термічної обробки металу з метою зміни його структури й механічних властивостей.

За режимом роботи печі умовно ділять на два класи: безперервної й періодичної (циклічної) дії. До печей безперервної дії відносяться рудовідновлювальні дугові печі, шахтні шарові печі, печі "киплячого" і зваженого шару, тунельні печі для випалу вог-

нетривких виробів, трубчасті обертові печі, такі печі прокатного виробництва, як методичні печі із крокуючим черенем або балками, кільцеві й роликові печі. У цих печах технологічний процес іде безупинно, матеріали, як правило, переміщуються від завантажувальних пристроїв до обладнання для випуску готової продукції.

До печей періодичної дії відносяться плавильні відбивні печі, конвертери, нагрівальні колодязі, садкові камерні печі з нерухливим черенем, застосовувані в ковальсько-пресовому виробництві й у термічних цехах і відділеннях. Ці печі працюють циклами. Цикл складається з послідовних операцій завантаження шихти або виробів, їх теплової обробки й потім випуску або вивантаження готової продукції. Між циклами проводять підготовчі й поточні ремонтні роботи, як, наприклад, заправлення череня мартенівської печі або нагрівального колодязя, розігріву печі перед початком наступного робочого циклу.

## **4.1 Паливні печі**

При розгляді основних типів печей кольорової металургії зупинимося на найпоширеніших і відмінних одна від одної головним чином принципом нагрівання. Печі одного типу можуть знаходити застосування при одержанні різних металів, що приводить до деякої різноманітності конструкцій у відповідності із властивостями одержуваного матеріалу, температурою плавлення, хімічною взаємодією з футерівкою і ін.

### **4.1.1 Відбивні плавильні печі**

Відбивні печі використовуються для плавки дрібнорозмельених матеріалів (концентратів), а також металів при виробництві міді, олова, цинку, алюмінію, вторинних металів і сплавів. За

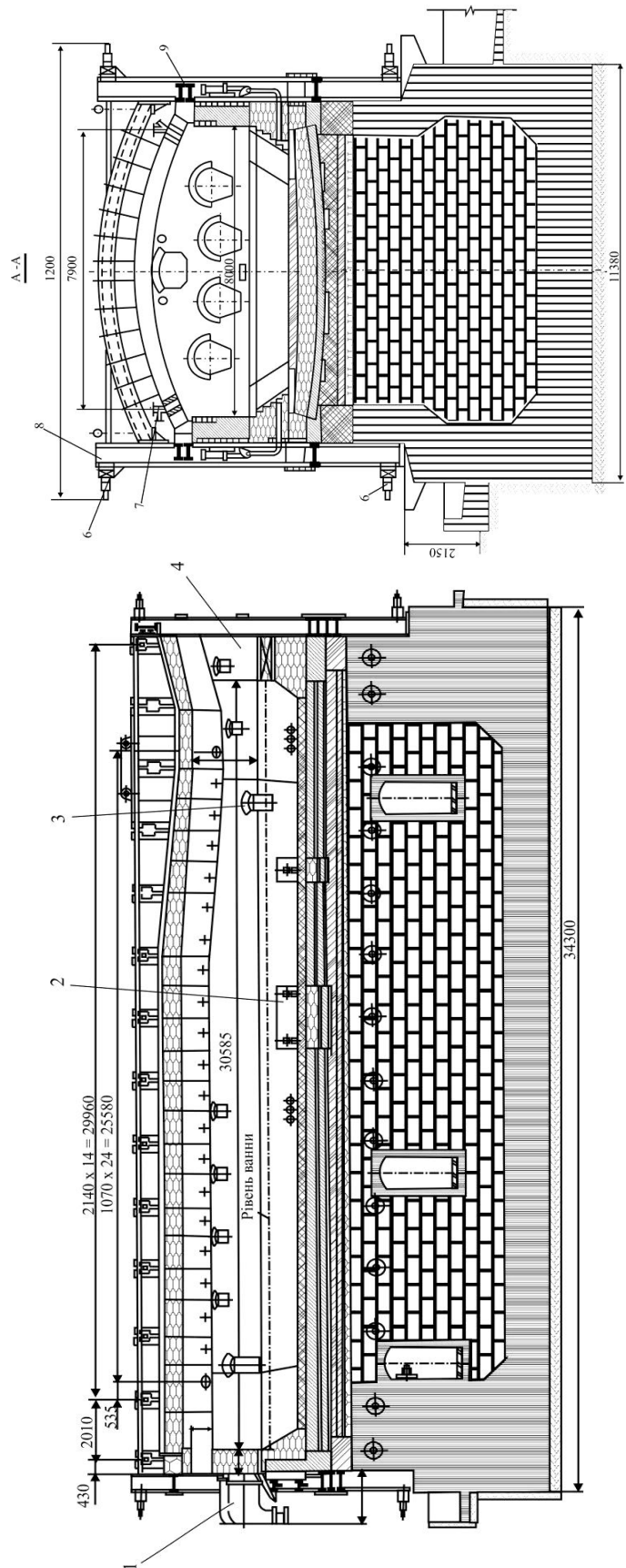
принципом нагрівання відбивні печі відносять до типу полум'яних печей, де тепло металу, що нагрівається, передається від полум'я при спалюванні палива. Тому відбивні печі подібні нагрівальним печей різних конструкцій (методичні, камерні та ін.).

На рис. 4.1 дані розрізи відбивної печі для плавки мідних концентратів на штейн. Відбивні печі такого типу мають площу череню 240...280 м<sup>2</sup>, довжину 31...35 м, ширину 7...10 м, висоту від череня до склепіння 3,0...4,0 м.

Печі опалюються вугільним пилом, мазутом або газом. У теперішній час більшість вітчизняних печей переведені на опалення природним газом – найбільш дешевим ефективним видом палива, що легко транспортується. Горілки, або форсунки, вводяться в піч через отвори в торцевій стіні. У протилежному кінці печі газу по лежаку відводяться в димар. Початкова ділянка борову 4, яка називається аптейком, нахилена убік печі. Віднесені газами, що відходять, частки шихти в рідкому стані осідають в аптейку й стікають знову в піч. Оскільки газу, що відходять, мають високу температуру (1100...1300 °С), доцільно за піччю встановлювати парові казани, де тепло газів, що відходять, використовується для виробництва пари. У деяких випадках за паровими казанами встановлюють рекуператор для підігріву повітря, що надходить у піч на спалювання палива.

Піч розташовується на фундаменті 5, що виготовляється з бутового каменю, бетону, червоної цегли або розплавлених жужелів. Черінь печі робиться звичайно набивний із кварцового піску з добавкою 5...10 % глини, яка спікається на місці перед пуском печі. Між черенем й фундаментом прокладені шари динасової, шамотної й теплоізоляційної цегли. З успіхом використовується черінь із цегли, при цьому верхній шар у вигляді зворотної арки товщиною 0,46 м робиться з магнезитохромітової цегли. Стіни до рівня ванни викладаються магнезитохромітовою цеглою товщиною 0,75...1,0 м, а вище рівня ванни динасовою цеглою. Магнезитохромітовою цеглою футерують випускні отвори для штейну й жужелів.





1) горілка; 2) шпурові отвори; 3) вікно для випуску жужелів; 4) аптейк; 5) фундамент; 6) стягуючі зв'язки; 7) завантажувальні отвори; 8) стійки; 9) підп'ятні балки

Рисунок 4.1 – Відбивна піч для плавки мідних концентратів [2]

Піч має розпірно-підвісне склепіння з магнезитохромітових цегл, що набираються у вигляді блоків. Іноді робиться аркове склепіння з динасової цегли товщиною 0,35...0,5 м. Застосування підвісного склепіння спрощує його частий ремонт, дозволяє збільшити ширину печі, але при цьому зростає витрата металу на обладнання підвісок. У поздовжньому напрямку склепіння може бути прямим і похиленим до кінця печі. Обладнання похилого склепіння складніше, але при цьому поліпшується нагрівання ванни наприкінці печі. При прямому склепінні збільшується перетин для проходу газу. Стійкість динасового склепіння менше, ніж магнезитохромітового, оскільки динас швидше роз'їдається пилом шихти, що містить окисли заліза, кальцію, цинку, міді та інших металів.

Аркове і розпірно-підвісне склепіння втримуються металевим кріпленням, що складаються із підп'ятних балок 9 і стійок, розташованих на відстані 1,2...2,2 м друг від друга уздовж стінок печі. Стійки внизу й угорі стягаються зв'язками 6.

Дрібну шихту в піч завантажують через склепіння, для чого в ньому в поздовжніх стінах роблять отвір 7 на відстані 0,9...1,1 м один від одного. Над ними встановлюють чавунні або сталеві труби діаметром 200...300 мм. Верхня частина труби з'єднується з бункером або жолобом, з яких шихта надходить у піч. У печі шихта розташовується по укусу в стінки, що прискорює її проплавлення й стікання штейну й жужелів у ванну. Для зменшення пиловиносу шихти при завантаженні, особливо при роботі з обпаленими концентратами, останнім часом стали застосовувати завантаження безпосередньо на поверхню ванни через отвори в бічній стінці. Відсутність отворів у склепінні робить його більш стійким. Штейн випускають через один зі шпурових отворів 2 наприкінці печі, розташованих на рівні череня, або через аварійний отвір, розташований вище рівня череня, якщо на черені утворилася охолодь. Жужелі випускаються через вікно 3 у бічній стінці наприкінці печі.

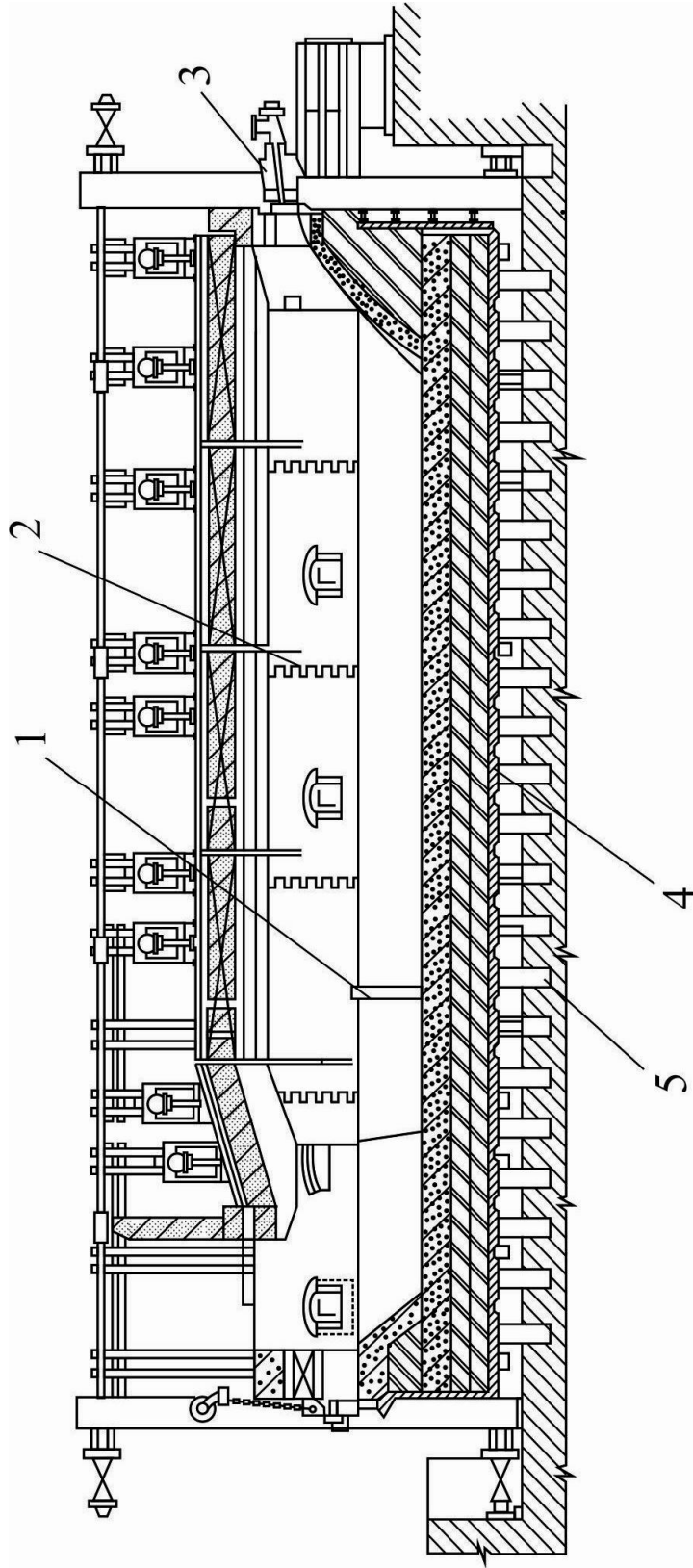
Значні переваги має практично безперервний сифонний випуск штейну з печі. Висота порога розраховується з урахуванням щільності й висоти шарів штейну й жужелів у ванні. Сифон розміром від 100x100 до 200x200 мм футерують магнезитохромітовою цеглою.

На рис. 4.2 показана відбивна піч, яка використовується для плавлення й рафінування міді. При рафінуванні мідь розплавляють у печі при температурі 1500 °С і вище, а потім окиснюють присутні домішки в окисній атмосфері з одночасним зниженням температури печі до 1200...1400° С. Розлив роблять у відновному середовищі при температурі металу близько 1150 °С.

Фундамент печі виконується з бутового каменю або бетону. Верхня його частина робиться у вигляді бетонних стовпчиків і стінок висотою 0,5...1,0 м. На фундаменті міститься металевий кожух або чавунні плити 4 такі ж плити ставлять вертикально по периметру на висоту ванни металу.

Металевий кожух необхідний для того, щоб перешкоджати протіканню рідкого металу у фундамент. Рідкий метал, який проникнув через кладку череня зустрічається з металевим охолоджуваним кожухом і застигає. Охолодження здійснюється циркулюючим повітрям по каналах фундаменту й зовні печі. На дно металевого кожуха або на чавунні плити кладуть шари жаростійкого бетону. Верхня частина череня у вигляді зворотної арки викладається з магнезитохромітової цегли. Між окремими арками робиться прошарок із кварцового піску для компенсації теплового розширення.

Черінь печі нахилений убік випускного отвору. Глибина ванни металу становить близько 900 мм. При малій глибині збільшується відносна поверхня металу, що стикається з атмосферою печі, що приводить до більшого його окиснення. Розміри череня в плані вибираються такими, щоб можна було обслуговувати піч через вікна (2...5 м). Співвідношення довжини череня до ширини приймається від 1,5 до 3,5.



1) льотка; 2) температурні шви; 3) горілка; 4) чавунні плити; 5) фундамент  
 Рисунок 4.2 - Відбивна піч для рафінування міді [2]

Розпірно-підвісне склепіння печі виконується з магнезито-хромітових блоків. Стріла склепіння складає  $\frac{1}{6} \dots \frac{1}{12}$  прольоту. Стіни викладаються магнезитохромітовою і шамотною цеглою товщиною 0,5 м. Стіни мають температурні шви 2 для компенсації теплового розширення кладки. Метал випускають через льотку 1 прямокутної форми шириною 115 мм і висотою, що не на багато перевищує глибину ванни. Зовні льотка має чавунну плиту, укріплену між стійками металевого каркаса печі. У черені до льотки робиться жолоб, що дозволяє випускати весь метал з печі.

Відбивні печі опалюються мазутом або газом. Для одержання в грубному просторі високої температури горілки 3 установлюються у форкамері. Висока температура газів, що відходять, використовується або в парових казанах-утилізаторах, або для підігріву повітря й газу, що надходять у піч.

У відбивних печах здійснюють також вогневе рафінування вторинної чорнової міді, плавку вторинного лома й відходів. Застосовують як стаціонарні, нерухливі, відбивні печі, так і поворотні (циліндричні), а також безупинно обертові навколо поздовжньої осі печі. Місткість печей для рафінування коливається в межах 1...400 т [3]. Однак, при значних обсягах виробництва, застосовувати печі, що вміщують менш 60...75 т розплавленої міді, недоцільно, тому що при зниженні ємності печі нижче цього значення починає зростати питома витрата палива на тонну виплавленої міді.

Форма печі залежить від місткості й конструкції. Як невеликі, так і великі печі нема рації робити повертаючими; при малій ємності печі зручність обслуговування, що досягається застосуванням печей, що повертаються, не виправдовує ускладнення конструкції печі й додаткового догляду за механізмом повороту. У той же час внаслідок великої поверхні охолодження на одиницю ємності різко зростають теплові втрати.

Застосуванню повертаючих й тим більше обертових печей досить великої ємності перешкоджає занадто велика маса печі, тому що потрібна підвищена міцність конструкцій, що також не

виправдовується зручністю, що досягається, обслуговування. Печі ж середніх розмірів зручно робити повертаючими або обертовими, оскільки це полегшує обслуговування печі, поліпшує умови нагрівання й зливу металу.

Стационарні печі великої місткості в плані мають прямокутний перетин, печі ж невеликої місткості нерідко бувають овальними, багатокутними, а також круглого перетину. За конструкцією ці печі нагадують печі для плавки концентратів і рафінування (рис. 4.1 і 4.2). Печі викладають на бутовому фундаменті, на якому роблять бетонну підставу. На бетон укладають цегельну підставку, у верхній частині якої влаштовують канали для охолодження череня. Іноді по цих каналах подають вторинне повітря для дуття, при цьому крім охолодження череня, підігрівають повітря, використовуване для спалювання палива.

Канали перекриваються чавунними плитами, на яких викладається черінь, що складається із шару шамотного й двох рядів хромомagneзитової цегли. Черінь викладається у вигляді зворотного склепіння насухо й після викладення простукується, щоб забезпечити засипання порошкоподібного магнезиту в усі нещільності череня. Між шарами шамотної й хромомagneзитової цегли передбачена постіль із шару сухого піску.

Стіни викладають також у два шари: усередині хромомagneзитовою цеглою, а зовні шамотною. Хромомagneзитове склепіння опирається за допомогою п'яти на поздовжні стіни печі й зверху покривають термоізоляційним шаром з температурними швами.

Піч має завантажувальні вікна й вікна для введення дерев'яних деревин для проведення операції «дражнення» або труб, через які в розплавлений метал вдувається повітря. Через ці ж вікна віддаляються жужелі. Вікна обрамляють охолоджувані водою рами й закривають кришки з механічним підйомом

Черінь має ухил убік лютки  $17^\circ$ . У місці обладнання лютки зовні встановлюється чавунна легенева плита, до якої кріпиться лоток для випуску металу. У верхній частині однієї зі стін під

склепінням робиться отвір для заливання в піч розплавленого конвертерного металу.

Гази, що відходять, відводяться наприкінці печі із протилежного місця установки форсунки. Нижня частина стін затискається чавунними плитами. Уся кладка печі стягується залізним каркасом, що складається із чавунних плит, сталевих стійок із двотавра або швелера.

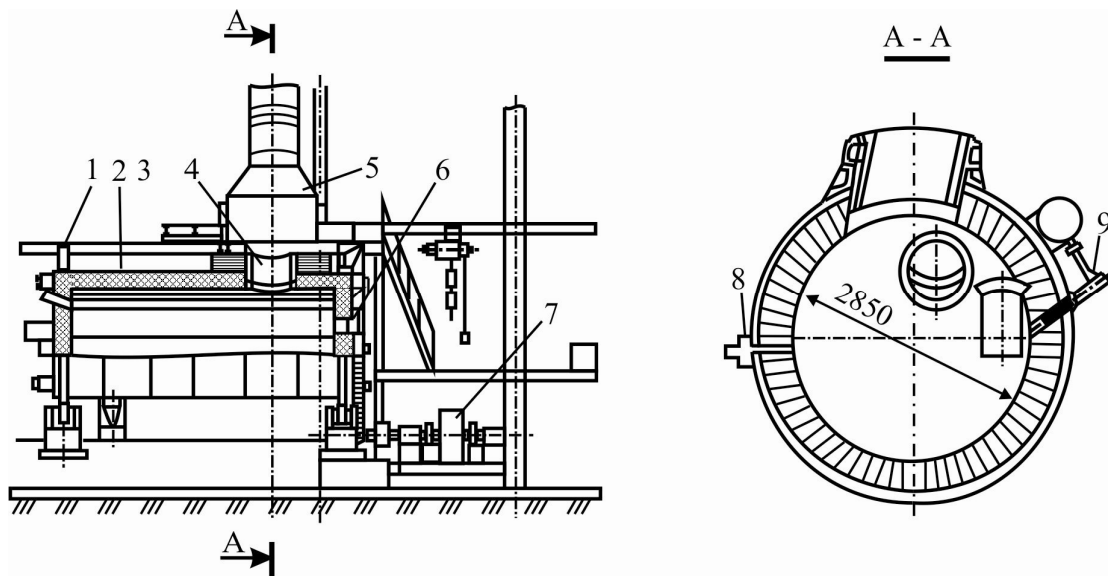
Щоб уникнути нещасних випадків і виходу з ладу розливної машини при прориві льотки в підлозі цеху близько льотки передбачений аварійний приямок. Для того, щоб метал, який потрапив у приямок, після його застигання було зручніше витягти й обробити на частини, приямок повинен складатися з відсіків.

При будівлі печі з кислим черенем основні елементи конструкції печі не міняються, а змінюється тільки матеріал кладки. Щоб уникнути швидкого руйнування кладки жужелями, навіть у печі з кислим черенем, на рівні утворення жужелів стіни викладаються в кілька рядів хромомagneзитовою цеглою, яка утворює своєрідний основний пояс.

На невеликих заводах установлюють обертові (роторні) печі барабанного типу, а на мідеплавильних заводах для вогневого рафінування рідкої чорнової міді, як правило, використовують циліндричні печі, що нахиляються (рис.4.3).

Печі, що нахиляються, аналогічні в основному за конструкцією горизонтальним конвертерам, одержали велике поширення завдяки наступним перевагам у порівнянні зі стаціонарними печами:

- заливання чорнової міді в ці печі більш зручне й менш тривале; піч, що нахиляється, може служити міксером і забезпечити велику маневреність у роботі;
- тривалість періоду окиснення міді різко скорочується;
- розташування встаткування більш компактно;
- менші капітальні витрати.



1) вікно для пальника; 2) кожух печі; 3) футерівка; 4) горловина; 5) уловлювач пилю; 6) вікно для «дражнення»; 7) привід повороту печі; 8) лютка; 9) фурма

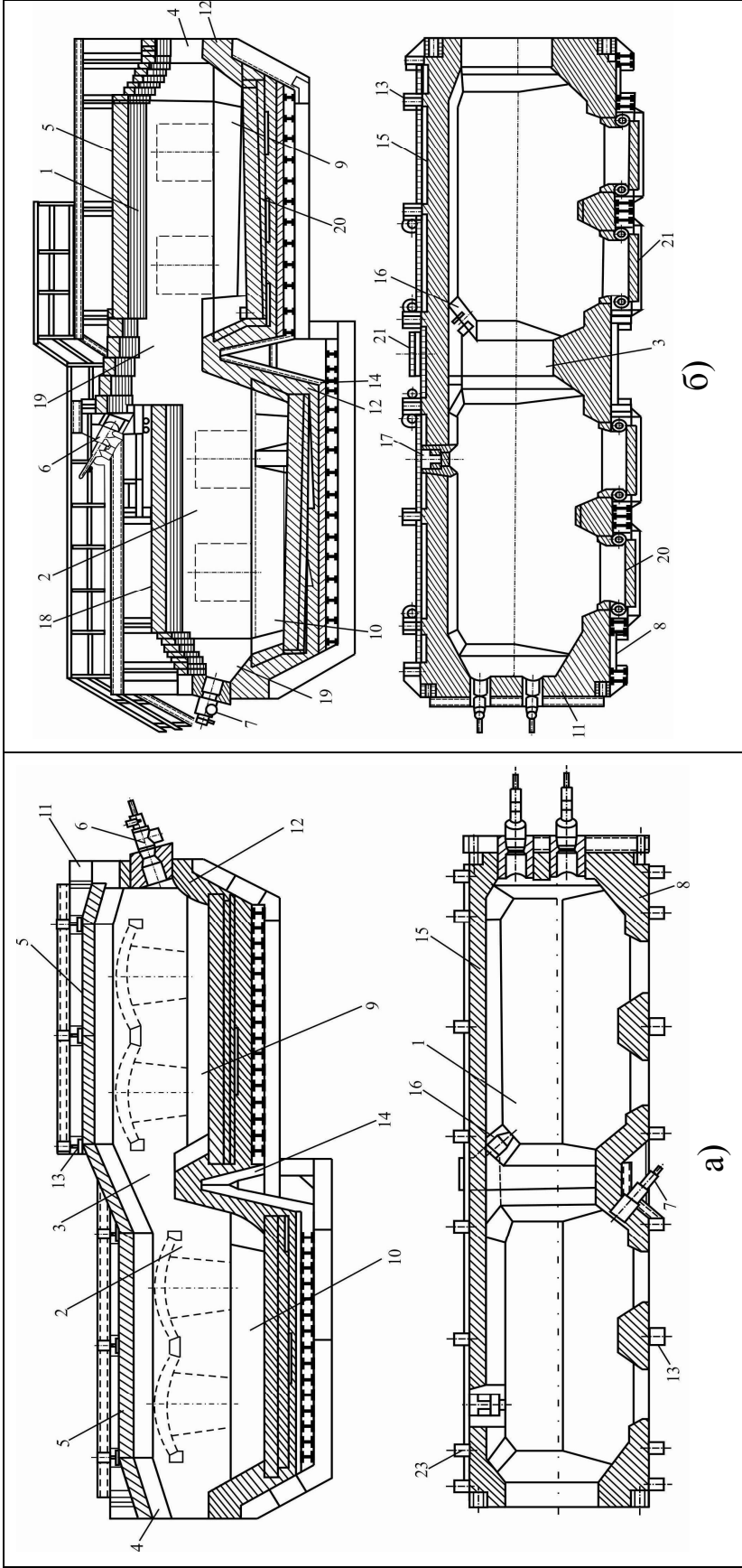
Рисунок 4.3 – Рафінуюча піч, що нахиляється [2]

Крім того, при роботі на печах, що нахиляються, виключені випадки мимовільного випуску металу – він може бути перелитий в іншу піч або ємність; скорочується питома витрата вогнетривів. Недоліками печей, що нахиляються, є менша герметичність системи відводу газів і пов'язані з нею труднощі утилізації тепла газів, що відходять.

Крім однокамерних відбивних печей, існують і двокамерні печі (рис. 4.4). У двокамерних печах технологічний процес плавки складається із двох стадій, здійснюваних у різних ваннах: 1) одержання розплаву металу; 2) доведення його до заданого хімічного складу й перегрів, необхідний за умовами випуску.

Двокамерні печі у свою чергу підрозділяють по загальному напрямку руху газів, що гріють, і металу на прямоструминні й протиструминні. У прямоструминних печах першої по ходу газів розташована плавильна камера, за нею камера доведення хімічного складу сплаву до заданого – накопичувач. У протиструминних печах камери розташовані у зворотному порядку.





1) плавильна камера; 2) накопичувач; 3) переструмнинне вікно; 4) димове вікно; 5) склепіння; 6) горілка плавильної камери; 7) горілка накопичувача; 8) передня стінка; 9) ванна плавильної камери; 10) ванна накопичувача; 11) горілочна стіна; 12) укіс; 13) стійка каркаса; 14) міжкамерний холодильник; 15) задня стінка; 16) проміжна льотка; 17) випускна льотка; 18) склепіння накопичувача; 19) форкамера; 20) поріг; 21) заслінка

Рисунок 4.4 – Схема прямоструминної (а) і протиструмнинної двокамерної відливної печі [2]

Печі, які обладнані двома ваннами (у кожній виконується повний цикл плавки) і об'єднані загальним склепінням, називають двованними.

У вітчизняній вторинній кольоровій металургії набули застосування всі перераховані типи відбивних печей. Як було сказано раніше, мідь і сплави на її основі одержують переважно в однокамерних печах, а на основі алюмінію – у двокамерних.

В існуючих двокамерних печах можна переробляти різноманітну за сполуками алюмінієву сировину зі значним вмістом прироблень чорних металів. Ємність накопичувача таких печей з урахуванням прийому розшихтувальних матеріалів звичайно на 15...25 % більше ємності плавильної камери.

Найбільше поширення у вітчизняній вторинній кольоровій металургії мають прямоструминні двокамерні печі, що з'явилися в промисловості раніше протиструминних і модернізовані за останні роки (рис. 4.4, а). До недоліків печей цієї конструкції необхідно віднести забруднення металу й ванни накопичувача пиловим віднесенням із плавильної камери, залежність теплового режиму накопичувача від теплового режиму плавильної камери, складність орієнтації обладнання накопичувача, що спалює паливо, в напрямку загального потоку газів із плавильної камери, значні втрати тепла в навколишнє середовище з газами, що відходять, також складність використання тепла газів, що відходять, для попереднього підігріву шихтових матеріалів у межах основного агрегату.

Ці недоліки усунуті у двокамерній протиструминній печі (рис. 4.4, б). Завдяки тому що в цих печах нижня камера – накопичувач установлена перша по ходу газів, в обох камерах вдається вільно розташувати горілки в напрямку до димоходу, як це зроблено в методичних нагрівальних печах. Важливою особливістю протиструминних печей є індивідуальність теплового режиму накопичувача. Це дозволяє вести процес в обох камерах незалежно один від одного. У протиструминних печах виключений винос пилу із плавильної камери в накопичувач, що сприяє по-

ліпшенню якості металу й зниженню заростання корисного об'єму охолоддю.

Кожна відбивна піч складається з наступних основних конструктивних елементів, властивих як однокамерним, так багатоканерним агрегатам: фундаменту, робочого простору, каркасу, горілочного обладнання із підведенням палива і його окиснювача (повітря), гарнітури робочого простору (віконні рами, заслінки робочих вікон, балки та ін.) і системи газоходів.

Металургійні печі встановлюють на бетонні фундаменти, призначені для передачі тиску на ґрунт (допускається не більш 250 кПа). Глибина закладки фундаменту і його товщина залежить від характеру ґрунту, маси печі й рівня ґрунтових вод. При високому стоянні ґрунтових вод прагнуть понизити їхній рівень за допомогою місцевих і загальних дренажів або захищають гідроізоляцією фундамент від проникнення в нього ґрунтових вод. Елементи конструкції печі, розташовувані нижче рівня ґрунтових і випадкових вод захищають звареними кесонами з м'якої вуглецевої сталі. Фундамент слід оберігати й від дії високих температур – на його поверхні температура не повинна перевищувати 250 °С.

Двоканерні відбивні печі встановлюють на східчасті монолітні фундаменти. Різниця рівнів щаблів дорівнює різниці рівнів черенів у робочих камерах. Однак при такому фундаменті неможливий огляд металоконострукцій череню під час експлуатації. Значно зручніше стрічкові фундаменти, розташовувані поперек печі в трьох місцях: під голівкою, що відводить, під передньої горілочною стіною й близько щабля. Щоб уникнути перекоосу печі підвалини внизу зв'язують загальною бетонною плитою.

Робочий простір – найбільш відповідальна частина печі. Правильний вибір його параметрів – важлива умова досягнення високої продуктивності й економічності агрегату. Робочий простір складається з наступних елементів: ванни, передньої й задньої стінок, склепіння, горілочної стіни, робочих вікон, випускних і переструмінних (для багатоканерних печей) льоток. Ванна

– це нижня частина робочого простору, обмежена склепінням і укосами. Вогнетривку кладку робочого простору печей для плавки алюмінієвої сировини заповнюють шамотною цеглою, а печей для плавки бронз – хромомagneзитовим. Гарні експлуатаційні показники досягаються при використанні високоглиноземистої цегли із вмістом  $Al_2O_3$  не менш 60 %.

Для забезпечення міцності масиву кладки її виконують із перев'язкою швів і кріплять металевою арматурами. Для компенсації розширення стін при нагріванні залишають температурні шви з розрахунку в середньому 5...6 мм на 1 м шамотної і 8...10 мм магнезитової кладки. На ряді підприємств успішно використовують для викладення верхнього ряду черенів, ванни й міжвіконних прорізів високоглиноземисті вогнетривкі банки. Зовні кладку печі теплоізолюють легковагим шамотом або іншим ізоляційним матеріалом.

Кладка череню повинна бути особливо ретельною (товщина швів до 1 мм) і мати ухили з усіх боків до випускної льотки, щоб уникнути застоїв металу при випуску. Робочий спай футерівки череню не повинен активно взаємодіяти із продуктами плавки й насичуватися металом. У печах для плавки алюмінію у шви кладки череню й під його робочий шар засипають вирівнюючий шар річкового піску, який компенсує розширення череню при розігріві. В останні роки замість піску застосовують магнезитовий порошок, який обмежує проникнення металу по щілинах до нижніх шарів футерівки з рядового шамоту. При цьому черинь не наварюють. Загальна товщина черинь залежно від місткості печі може бути від 600 до 1000 мм.

Якщо поверхня ванни печі за технологічними особливостями плавки потребує чищення, ділянку череню, прилеглу до завальочного вікна, виконують у формі плавного укосу, щоб було зручно вигрібати прироблення й неметалеві включення.

Глибина ванни залежить від маси садки, технології плавки, властивостей сировини, що переплавляється, і звичайно становить від 500 до 750 мм. При однаковій місткості продуктивність

печей зі збільшеною площею череню й відповідно зі зменшеною глибиною ванни вище, а якість металу краще (за ліквідацією елементів і однорідності властивостей): чим глибші ванни, тим менша площа череню, а отже, менше теплоприймаюча поверхня шихти. Крім того, черинь глибокої ванни важко оглядати й очищати через робочі вікна.

Плавильна ванна печі повинна вмещати весь розплавлений метал і частину шихтових матеріалів, що має щільність і температуру плавлення вище, ніж рідкий метал. Для втримання жужелів у печі місткість ванни збільшують за рахунок обладнання підсипних (неправильних) порогів. Якщо жужелі розташовані в печі нижче рівня порогів, зняття їх значно ускладнюється й супроводжується втратами металу.

У процесі експлуатації первісна форма ванни змінюється залежно від якості переробляючої сировини й старанності догляду за черенем. Так, досвід експлуатації відбивних печей для плавки алюмінію показує, що приблизно через 10...15 плавок ємність ванни через утворення настилу значно зменшується. Конструкція ванн частини старих печей має прямокутну форму; у кутах між стінами таких ванн і черенем зняти відкладання важко. Тому за період між ручними чищеннями місткість плавильної камери звичайно стає значно нижче проектної. Застосування ванн із укосами дозволяє не тільки стабілізувати місткість плавильних камер, але й зменшити опорну поверхню, підвищити швидкість плавлення шихти на укосах за рахунок поліпшення опромінення їх факелом.

Глибина ванни й площа череню значно впливають на продуктивність печі, витрату палива й окиснення металу. У двокамерних відбивних печах глибина ванни обмежується зоною обслуговування нижньої ванни при максимальному опусканні хобота мультдозавалочної машини. Для забезпечення повноти спуска металу з верхньої ванни в нижню лютка верхньої ванни повинна бути розташована вище максимального рівня металу в

нижній ванні на величину, обумовлену ухилом переливного жолоба 6...7 %.

Відношенню довжини ванни до ширини при проектуванні печей надається велике значення. Печі із широкою ванною мають збільшений проліт склепіння й внаслідок цього великий розпір і знижену стійкість. При великій ширині ванни виникає необхідність у підвісному склепінні, який конструктивно складніше аркового. У широких і коротких печах утруднене розташування робочих вікон на передній стінці, хобот мульдозавалочної машини повинен бути довше, що при однаковій вантажопідйомності викликає необхідність у збільшенні загальної маси машини. Збільшується при цьому й площа, необхідна для роботи машини. При надмірній довжині ванни можливий відрив від неї факела, що приводить до погіршення прогріву металу й підпалу зводу з боку голівки, що відводить, печі. За умовами раціонального використання тепла довжину ванни звичайно вибирають в 2,1...2,4 рази більше її ширини. Відношення довжини печі до її ширини залежить також від якості застосовуваного палива, типу, потужності, довжини факела, що злився, горілок (яка повинна бути не більш  $2/3$  довжини ванни) і, нарешті, від того, чи можливо розміщення обладнання, що спалює паливо.

Висота склепіння – один з основних параметрів конструкції відбивних печей. При недостатній висоті склепіння швидко руйнується від теплового впливу факела, бризок жужелю, механічного впливу сировини при завантаженні його мульдами. Занадто високе склепіння менш піддається руйнуванню, але в печах з таким склепінням погіршується теплопередача від нього до ванни, збільшуються втрати тепла в навколишнє середовище через футерівку передньої й задньої стін робочого простору. Для прямокутних печей місткістю 10...50 т раціональна висота склепіння складає (0,6...0,77) ширини печі. Верхня межа відноситься до 10 т печам. Висота склепіння в першу чергу визначається необхідною за умовами обслуговування висотою робочих вікон, конструкцією опори й стрілою арки склепіння, яка в добре працюючих

печей дорівнює 0,133 ширини печі. Конструкція кріплення задніх неохолоджувальних і передніх п'яткових балок дозволяє змінювати висоту склепіння під час холодного ремонту печі для відшукування раціонального її значення. Іншим критерієм правильності вибору висоти склепіння є питома теплова напруга умовно вільного об'єму печі. Вона повинна становити 140...220 кВт/м<sup>3</sup>.

Рекомендовані розміри робочих вікон печей місткістю 15...25 т з охолоджуваною передньою п'ятковою балкою плавильної камери: висота 1350, ширина вгорі 1400, унизу 1200 мм; з неохолоджуваною – відповідно 1260, 1290 і 1200 мм. За умовами обслуговування висота порога вікна плавильної камери від рівня підлоги цеху 900...1100 мм.

При внутрішній ширині печі до 3,5...4 м виконують аркові склепіння, що опираються на передню й задню стіни печі, а іноді півциркульні склепіння з радіусом кривизни, рівним половині ширини печі. При ширині печі до 3,5 м аркове склепіння роблять кільцями в одну нормальну цеглу товщиною 300 мм. Опорою для аркових склепінь служать п'яткові або підп'яткові балки, що опираються на стійки каркаса. Склепіння набирають із прямої й клинової цегли. Послідовність укладання прямого й клинового вогнетривів визначають при проектуванні печі. Застосування ушкодженої цегли, а також обтісування вогнетривів не допускаються. У печах для плавки бронз склепіння набирають із термостійкого хромомагнетитової або магнезитохромітової цегли зі сталевими прокладками товщиною 0,8...1,2 мм. Завдяки прокладкам під час розігріву й експлуатації печі футерівка склепіння зварюється в моноліт. Для кращого збереження тепла склепіння із зовнішньої сторони доцільно ізолювати порошковим засипанням товщиною 50...70 мм. При внутрішній ширині печі більш 4 м застосовують підвісні склепіння із секційною системою кріплення. При підвісному склепінні можна робити частковий ремонт зруйнованої частини склепіння, не порушуючи придатної.

На діючих прямоточних відбивних печах для обігріву накопичувача встановлені бічні горілки, факел яких спрямований під

кутом до загального напрямку руху газів, що може привести до утворення великих зон ванни з недостатнім обігрівом. Орієнтація горілки накопичувача в напрямку загального руху газів уздовж печі можлива при установці її в районі перетискання між камерами й при правильному виборі розмірів переструминного вікна. Із практики роботи плавильних агрегатів відомо, що швидкість руху димових газів на перетисканні не повинна перевищувати 1,0...1,2 м/с, а ухил склепіння плавильної камери в напрямку накопичувача повинен забезпечувати безвідривний рух газів над ванною. Розміри переструминного вікна, крім зазначених міркувань, повинні забезпечувати умови мінімального виносу пилу із плавильної камери.

Металевий каркас відбивної печі служить для кріплення кладки й сприйняття зусиль, що виникають у результаті розпору аркових склепінь і розширення кладки. Металевий каркас робочого простору складається з конструкції, що підтримує ванну, арматури передньої й задньої стін і верхнього кріплення. На каркас монтують гарнітуру печі (рами й заслінки вікон, топкові дверцята, замки), лебідки підйому заслінок, горілки або форсунки, коробки витяжної вентиляції та ін. Каркаси, які встановлені на фундаменти печей, бувають твердого кріплення, рухливі й комбіновані. Останнім часом рухливі каркаси майже не застосовують у зв'язку з тим, що натяг як череневих зв'язків, так і зв'язків над склепінням практично неможливо привести в точну відповідність із розширенням кладки. При твердому каркасі обов'язково залишають у кладці температурні шви.

Конструкція, що підтримує ванну печі з вентиляльованим черенем, складається з поздовжніх і поперечних балок, на які укладаються сталеві листи. Арматури передньої й задньої стінок виконуються з вертикальних стійок, встановлюваних через 1,2...1,5 м. Кожна стійка складається із двох (іноді трьох) двотаврових балок, з'єднаних між собою сталевими накладками. Стійки закріплені на кінцях поперечних балок, розташованих під ванною, і зв'язані по висоті на двох-трьох рівнях кільцевою об-



в'язкою. На деяких старих печах, встановлених на монолітному фундаменті без вентиляції череню, стійки печі закріплені у фундаментних гніздах. Нижче рівня порога завалочних вікон стійки перев'язані банками або литими сталевими плитами. На рівні п'ят склепіння стійки з'єднані балками, до яких кріпляться п'яткові балки склепіння.

Плити під завалочними вікнами облицьовані вогнетривкою цеглою для запобігання влучення на них металу й жужелів. У прорізах завалочних вікон на плити встановлені литі або порожні зварені охолоджувані водою металеві рами, які кріпляться клинами до стійок. Вікна в рамах зроблені прямими або розширеними догори; при розширених догори вікнах зручніше обслуговувати накопичувач, вище стійкість розділових стовпчиків і менше підсмоктування повітря в нижній частині вікна. Завалочні вікна закривають литими неохолоджувальними або порожніми охолоджуваними звареними заслінками, які футерують шамотною цеглою або набиванням з боку, зверненого до печі. Кожна заслінка відкривається й закривається за допомогою лебідки.

На нових печах ці лебідки розташовані уздовж задньої стінки на ходовому містку, що забезпечує підвищення надійності їх експлуатації й зручність розміщення на склепінні парасолів витяжної вентиляції.

На сучасних печах теплових навантаженнях, що працюють при високих температурах і, задні п'яткові балки, рами й заслінки накопичувача з метою економії тепла роблять неохолоджувальними. Для підтримки торцевих укосів ванн між плавильною камерою й накопичувачем, накопичувачем і димоходом установлені зварені вентильовані стільці. На задній стінці в районі випускної льотки між стійками встановлена металева плита з отвором для випуску металу й ребрами для кріплення випускного жолоба. Вільні поверхні стін, що залишилися, закриті сталевією обшивкою 5...8 мм. Верхні кінці стійок передньої й задньої стін з'єднані поперечними балками, які забезпечують високу стійкість і

міцність усієї конструкції, ніж зв'язки, що застосовувалися раніше, регульованого рухливого каркаса.

При розміщенні декількох горілок на горілочній стіні загальну вісь симетрії горілок зміщають до задньої стінки печі так, щоб її проекція на черинь збігалася з лінією центрів ваги поперечних перерізів ванни. Таке розташування доцільне для будь-якого типу торцевих горілок незалежно від швидкісного напору. Для впровадження швидкісних горілок печі повинні бути обладнані вентиляторами з напором не менш 10 кПа.

Робочий простір печі з'єднується з димарем за допомогою системи лежаків. Борова бувають як відкритого, так і підземного виконання. Перші зручніше для обслуговування, але займають багато корисної площі в цеху. До лежаків пред'являються наступні основні вимоги: газощільність, водопроникність, зручність обслуговування й ремонту, тривала стійкість при максимальній температурі газів, що відходять, нормальна пропускна здатність при 30 %-ному заповненні корисного об'єму налипань, мінімальна довжина, простота геометричної форми й плавність поворотів, що забезпечують мінімальний опір при видаленні газів із грубого агрегату. Для регулювання тяги в печі лежака споряджають шиберами прямого (опускні, поворотні) і непрямого (зрив тяги поперечними газовими струменями) дії. Для захисту шиберів і газохідів від налипань у виході газів з печі встановлюють спеціальну камеру для вловлювання великих фракцій віднесення (жужільник), а сам газохід виконують із ухилом убік цієї камери, що забезпечують стік рідкого віднесення, що накопичується на черені, до лежака.

#### 4.1.2 Полум'яні нагрівальні печі

Полум'яні нагрівальні печі застосовуються для нагрівання кольорових металів перед обробкою тиском і для їхньої термічної обробки. За конструктивними ознаками печі можна розділити

на прохідні й камерні. У прохідних печах метал просувається через піч за допомогою механізмів різних типів (штовхачів, конвеєрів, крокуючих балок та ін.). При цьому нагрівання може здійснюватися за спеціальною програмою, як, наприклад, у методичних печах. До камерних печей метал завантажується в піч, де він перебуває без руху доти, поки не закінчився процес нагрівання. Потім нагрітий метал з печі виймають. Для того щоб метал, який нагрівають, не взаємодіяв із грубними газами, використовують муфельні печі, де грубними газами проводиться нагрівання муфеля, а вироби, що перебувають усередині муфеля, нагріваються вже від його стінок.

Практично всі кольорові метали мають великий коефіцієнт теплопровідності, що дозволяє часто вважати їх «тонкими» за нагрівом. Цьому сприяють також низькі значення ступеня чорності для багатьох кольорових металів, що зменшує променистий тепловий потік до металу, а також звичайно невеликі розміри виробів, що нагріваються. Як відомо, у тонких виробках перепад температури між зовнішньою поверхнею виробу і його серединою невеликий, що дозволяє нагрівати їх з великою швидкістю, не побоюючись виникнення термічних напруг. Цим кольорові метали сильно відрізняються від чорних, швидкість нагрівання яких часто обмежується можливою появою тріщин внаслідок значного перепаду температур по перетину.

Нагрівання в полум'яних печах проводиться від гарячих продуктів горіння палива випромінюванням і конвекцією. Невисокі температури нагрівання кольорових металів (звичайно нижче 850 °С) визначають великий вплив конвекційного теплообміну. Променистий потік на метал, так само як це було розглянуто при описі нагрівання у відбивних печах, складається із прямого випромінювання полум'я й відбитого потоку від навколишньої кладки. Поверхню металу, що брав участь у теплообміні, визначають із урахуванням його розташування на черені печі й характеру нагрівання (однобічне або двостороннє). Час нагрівання виробів змінюється обернено пропорційно активній поверхні ви-

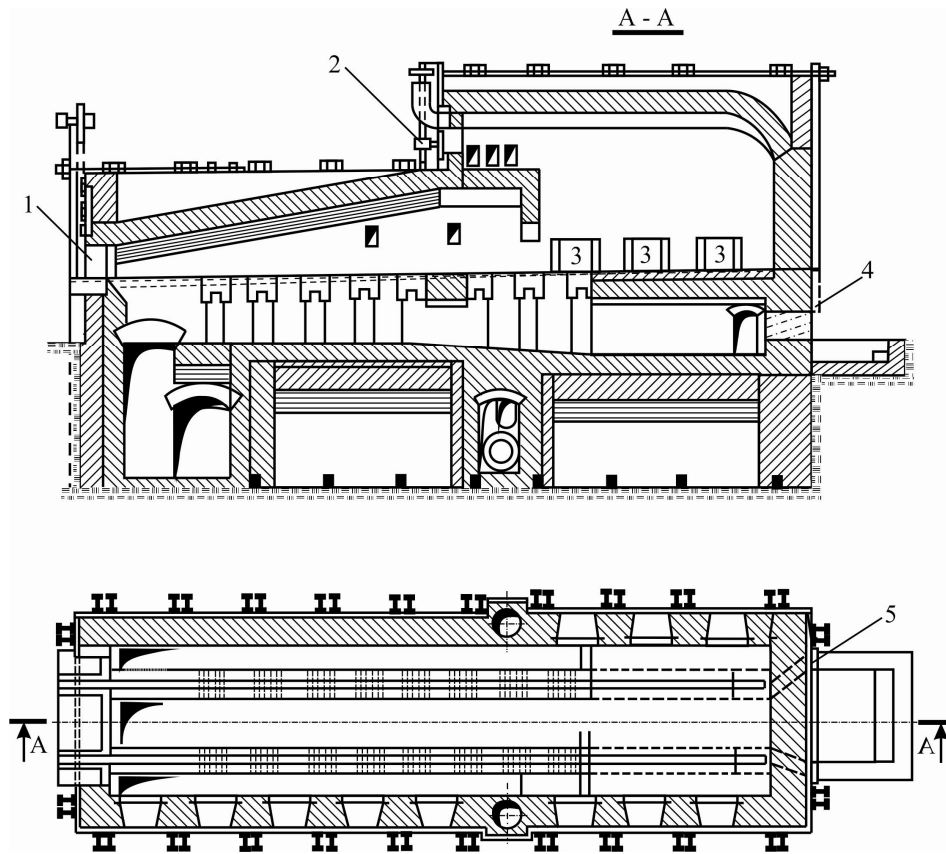
бів. Час нагрівання мінімальний в одиничного злитка (круглого й квадратного перетинів), що обігривається з усіх боків. При однобічному нагріванні щільно покладених один до одного злитків квадратного перетину час нагрівання збільшується в чотири рази, у зв'язку зі зменшенням поверхні теплообміну злитка в чотири рази. Для коротких злитків, що мають відношення довжини до товщини менше трьох, слід урахувувати нагрівання через торці, що збільшує відповідно поверхню нагрівання металу.

Прохідні (методичні) печі найчастіше застосовуються для нагрівання злитків металу перед прокаткою для надання їм пластичності. У цих печах звичайно використовується протиструминний рух продуктів спалювання палива й металу. Це дає можливість знизити температуру газів, що відходять, і підвищити коефіцієнт використання палива. У зоні спалювання палива температура максимальна (на 100...200 °С вище кінцевої температури нагрівання металу), до кінця печі вона зменшується. При нагріванні тонких виробів час нагрівання міг би бути зменшений при підтримці високої температури по всій довжині печі. Однак при цьому значно поменшався б коефіцієнт використання палива в печі. Таким чином, при виборі температури газів, що відходять, у печі слід урахувувати всі економічні міркування й робити оптимальний вибір.

При нагріванні масивних виробів, крім зони поступового нагрівання (методичної), зони інтенсивного нагрівання (називаної часто зварювальної), розташовується ще третя зона – зона витримки (томильна), температура якої лише на 50 °С вище кінцевої температури нагрівання металу. У цій зоні відбувається вирівнювання температури по перетину злитка перед видачею його з печі.

На рис. 4.5 наведена методична двозонна піч для нагрівання злитків з мідних і алюмінієвих сплавів. Злитки завантажуються в піч через вікно й просуваються в ній за допомогою штовхача з електричним або гідравлічним приводом. Злитки видаються че-

рез вікна 3 за допомогою другого штовхача, встановленого збоку. Злитки нагріваються із двох сторін – зверху й знизу.



1) завантажувальне вікно; 2, 4) форсунки або горілки; 3) розвантажувальне вікно; 5) оглядове вікно

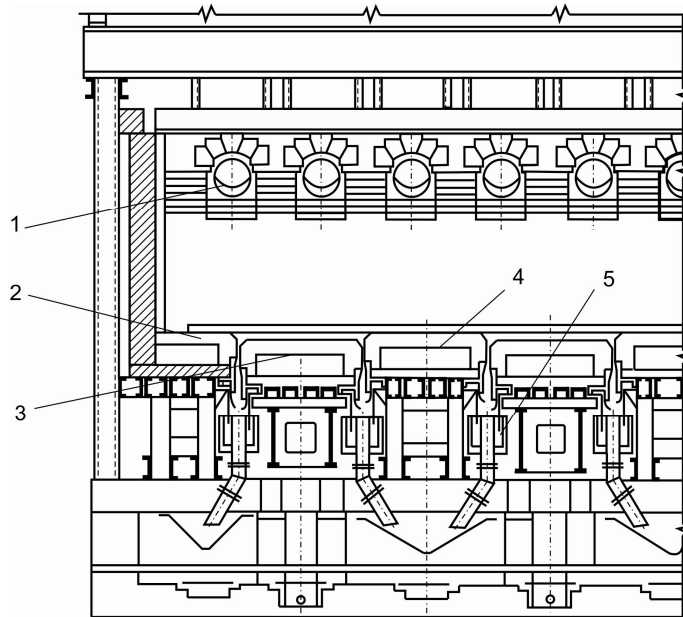
Рисунок 4.5 – Схема методичної печі для нагрівання мідних або алюмінієвих злитків [2]

Піч працює на рідкому або газоподібному паливі. Форсунки 2 і 4 розташовані зверху й знизу злитків. У методичній зоні печі склепіння робиться похилим, щоб зберегти швидкість руху газів постійну по довжині печі (при зниженні температури об'єм газів зменшується). Напруженість активного череню, тобто кількість металу, що нагрівається на кожний квадратний метр активного череню в годину, для мідних злитків  $1600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ , для алюмінієвих  $500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ . Витрата мазуту на 1 т прокату при на-

гріванні мідних злитків 37,4 кг, при нагріванні алюмінієвих злитків 52,6 кг. Злитки в розглянутій печі переміщаються по металевих балках, що зменшує опір проштовхуванню їх через піч. При високій температурі нагрівання металеві балки замінюють водоохолоджувальними глісажними трубами. Для запобігання стирання труб рухаючими злитками до них приварюють металеві прутки. Щоб знизити відбір тепла глісажними трубами, передбачають їхню теплову ізоляцію, що зміцнюється за допомогою металевих штирів. Ізоляція може бути з набивної маси й збірна з керамічних сегментів. Втрати тепла з охолодною водою при використанні ізоляції знижуються в 3...6 раз.

Досить перспективними слід вважати печі із крокуючим черенем. Частина поперечного розрізу такої печі показана на рис. 4.6. Черінь печі складається з нерухливих 2 і 4 і рухливих 3 балок. Переміщення металу в печі здійснюється за рахунок руху балок 3 нагору - уперед - униз - назад. При цьому метал піднімається з нерухливих опор і переміщається на певну відстань уперед до вікна вивантаження. Істотним є ущільнення зазору між балками, щоб не підсмоктувалося холодне повітря в піч, а гарячі гази не перегрівали б механізм переміщення балок. Надійним ущільненням виявився водяний затвор 5. Перевага печей із крокуючим черенем у порівнянні з штовхальними печами полягає в можливості розміщати нагріваючі злитки на відстані друг від друга, що дозволяє збільшити швидкість і поліпшити рівномірність нагрівання металу. Швидкість переміщення металу в печі легко регулюється. У печах із крокуючим черенем можна переміщати заготовки будь-якої довжини й будь-якого профілю.

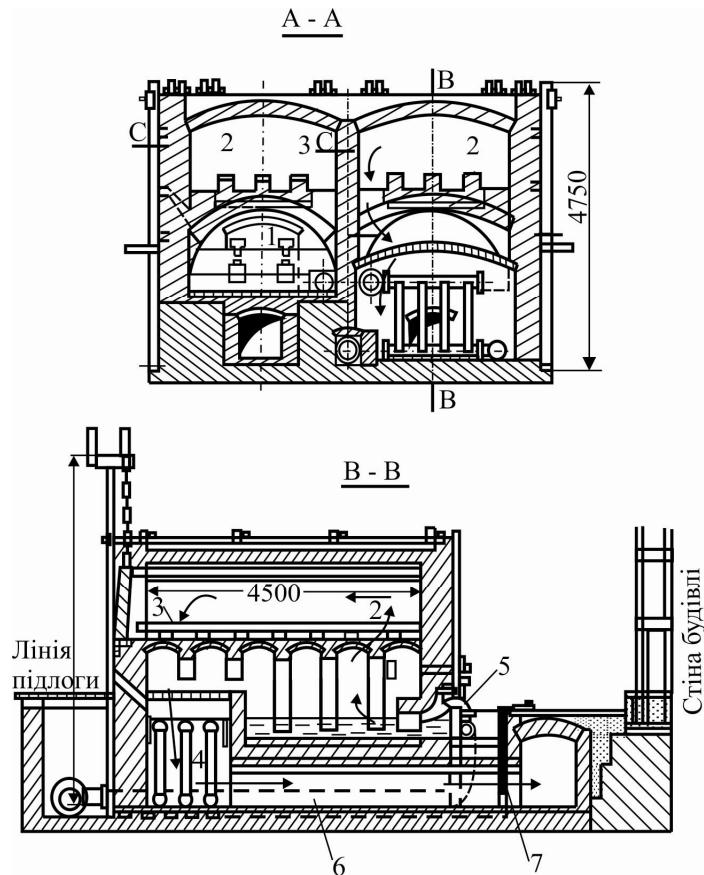
При нагріванні круглих заготовок можна використовувати похилий черінь із самостійним перекочуванням злитків у печі. Однак практика показала малу ефективність таких печей. Підвищене тертя злитків і удари один об одного збільшують утворення окалини. Періодично доводиться затрачати велику фізичну працю й для усунення перекоосу й заїдання при русі злитків.



1) горілки; 2) керамічні бортики череню печі; 3) рухливі балки; 4) нерухливі балки; 5) водяні затвори

Рисунок 4.6 – Поперечний розріз печі із крокуючим черенем [2]

Камерні печі найчастіше використовуються для термічної обробки металів (загартування, нормалізація, випал), коли потрібне точне дотримання необхідної температури нагрівання металу. Тому основною вимогою, пропонованою до печей для термічної обробки, є можливість точно регулювати температуру в робочому просторі й рівномірно нагрівати метал по всьому його перетину. Часто встає питання про нагрівання в захисному середовищі, щоб запобігти взаємодії металу із продуктами горіння палива. На рис. 4.7 показано піч для випалу листів, рулонів і стрічок. Унизу розміщена камера згорання, у якій встановлена форсунка рідкого палива 5. Продукти горіння палива по каналах у черені 3 попадають у камеру нагрівання 2, де розміщують вироби, що нагріваються. Відвід продуктів горіння проводиться також через канали в черені. Гази, що відходять, направляються в рекуператор 4, а потім через димохід 6 у трубу. Шибер 7 регулює тягу в печі.

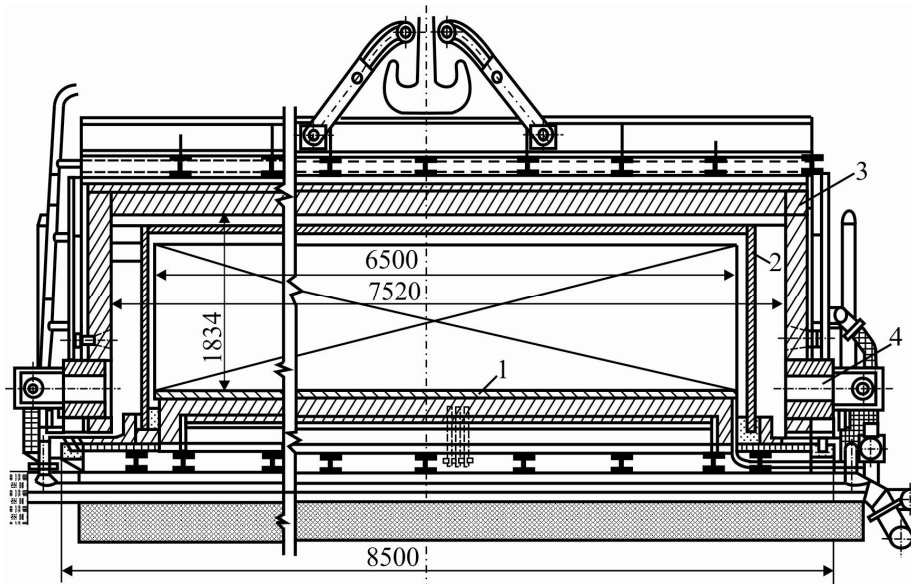


1) камера згорання; 2) камера нагріву; 3) черинь; 4) рекуператор; 5) форсунка; 6) димохід; 7) шибер

Рисунок 4.7 – Камерна піч для випалу листів і рулонів [2]

На рис. 4.8 представлена ковпакова піч для випалу листів у захисній атмосфері. Листи у вигляді стопок або рулонів укладаються на черинь 1 і покриваються внутрішнім металевим ковпаком 2, який у свою чергу накривається зовнішнім керамічним ковпаком 3. Піч опалюють генераторним газом, який спалюють за допомогою інжекційних горілок 4 у просторі між внутрішнім і зовнішнім ковпаками. Продукти горіння за допомогою ежектору відводяться до лежачка. Протягом усього часу нагрівання й охолодження у внутрішній ковпак надходить захисний газ. Передбачене використання одного зовнішнього ковпака на три череня. Поки один охолоджується, інший завантажується, а третій нагрівається.





1) черинь; 2) металевий ковпак; 3) керамічний ковпак; 4) інжекційні горілки

Рисунок 4.8 – Схема ковпакової печі [2]

Вибір захисної атмосфери визначається властивістю металу й необхідним ступенем захисту поверхні (світла або чиста або злегка потемніла). При цьому слід враховувати також вартість захисного середовища. Широко поширені захисні середовища із пару води, продуктів неповного спалювання природного або зрідженого газу при коефіцієнті надлишку повітря 0,5...0,95 і продуктів розкладання аміаку. Враховуючи вибухонебезпечність продуктів розкладання аміаку, їх спалюють і очищають від пару води. Продукти спалювання газу також залежно від вимог проходять очищення від  $CO_2$  і пару води.

Розміри нагрівальної печі розраховують на основі визначення часу нагрівання виробів. Час нагрівання знаходиться за формулами для масивних або тонких виробів залежно від значень критерію Біо. При розрахунках печей термообробки до цього часу звичайно додається час, необхідний на протікання процесів у твердій фазі для зміни фазової сполуки. Довжину й ширину печі визначають виходячи із заданої продуктивності й повного часу перебування металу в печі. Прохідні (методичні) печі мо-

жуть бути одно- і дворядними. В останньому випадку їх довжина зменшується у два рази.

### 4.1.3 Шахтні печі

Шахтні печі в кольоровій металургії застосовуються при виробництві міді, нікелю, свинцю, а останнім часом і цинку. Використовуються вони для плавки кускових матеріалів (руда, агломерат, брикети), що володіють достатньою міцністю. Шихта, що включає також розрахункову кількість жужелеутворювальних компонентів (флюсів) і кускове паливо (кокс), завантажується зверху у вертикальну шахту печі (рис. 4.9).

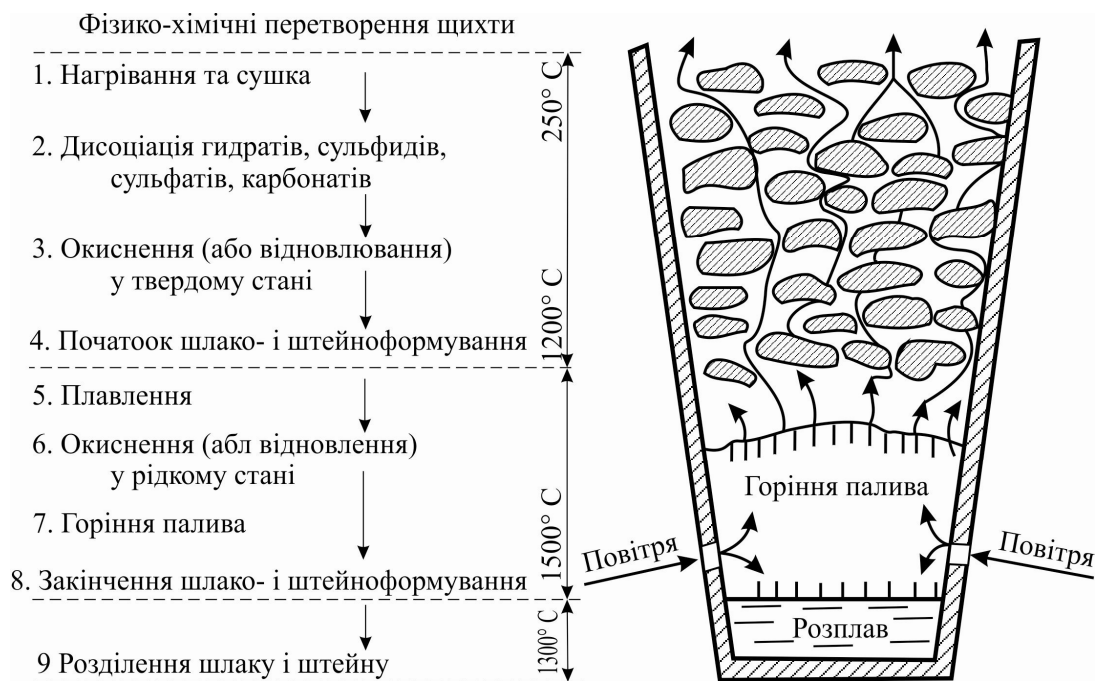


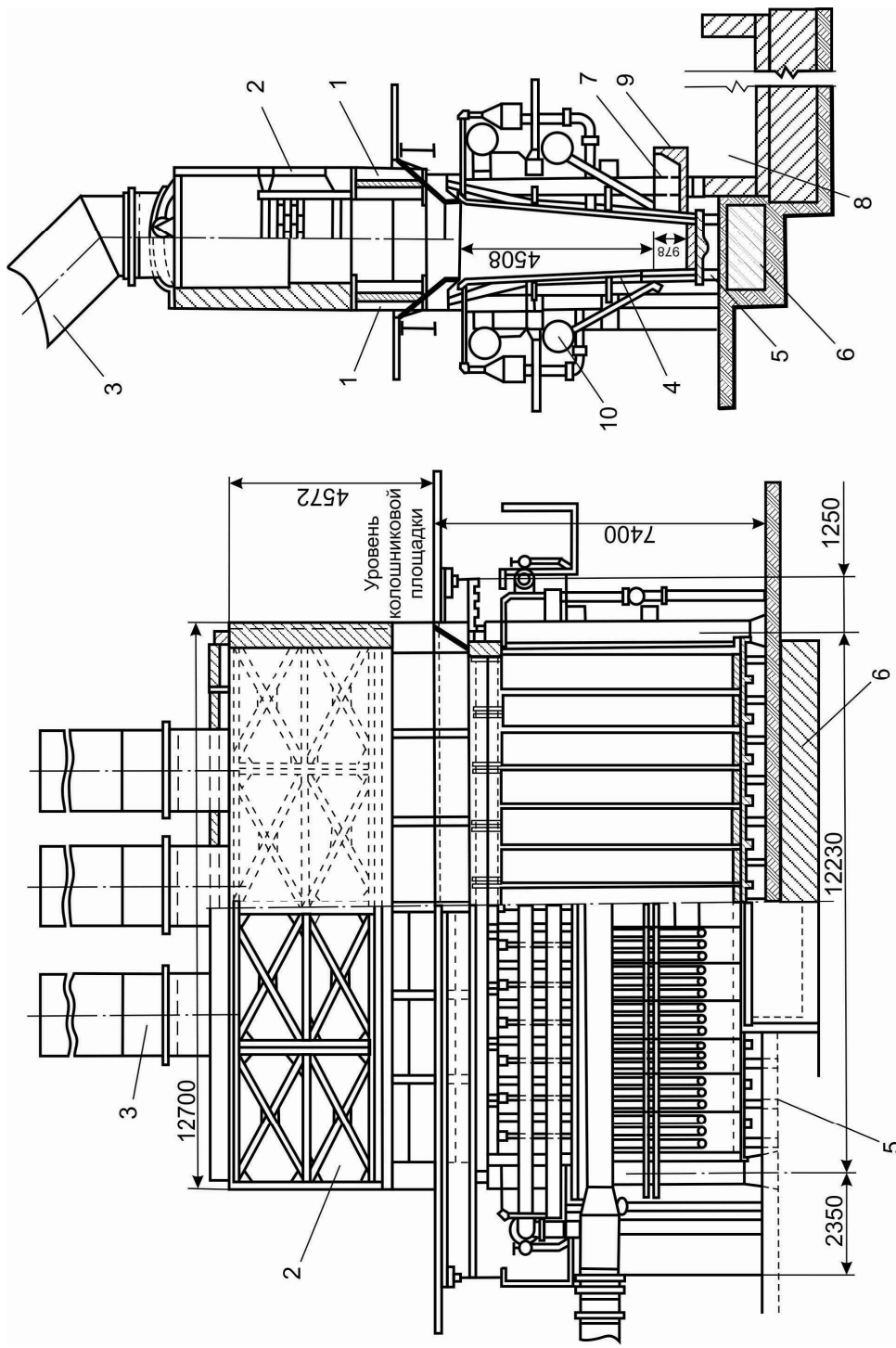
Рисунок 4.9 – Схема руху матеріалу й газів у шахтній печі [2]

У нижню частину печі через фурми подають повітря для горіння коксу. Гарячі гази піднімаються нагору назустріч шихті. Рухаючись протитечією, гази віддають своє тепло шихті й охо-

лоджені йдуть із печі у верхню її частину. Матеріал, що завантажується, рухаючись зверху вниз, проходить різні температурні зони, де протікають фізико-хімічні процеси. Найбільш характерними процесами є (рис. 4.9): нагрівання й сушіння матеріалу у верхній частині печі; розкладання нестійких при нагріванні сполук; відновлення або окиснення матеріалу й плавлення з утворенням жужелів, штейну, металу. Рідкі продукти плавки збираються в нижній частині печі.

Шахтна піч – високоефективний агрегат, що має велику продуктивність, високий коефіцієнт використання палива завдяки протиструминному руху матеріалу й газів у печі, що легко піддається механізації при обслуговуванні. Обмежують застосування шахтних печей особливі вимоги до шихти, яка повинна складатися із сировини у вигляді кускового матеріалу й дорогого й дефіцитного коксу. Останнім часом для економії коксу практикується заміна його антрацитом і часткове використання природного газу, який подається в піч разом з повітрям. Застосування повітря, збагаченого киснем, дозволяє підвищити продуктивність печей і знизити питому витрату палива. При плавці окиснених нікелевих руд і вмісті кисню в дутті 25,7 %, продуктивність зросла на 30 %, витрата палива знизилася на 20 %; при плавці свинцево-цинкового агломерату застосування дуття, що містить 28...39 % кисню, 4...5 % природного газу, підігрітого до 400 °С, дозволило збільшити продуктивність печі на 67...78 % і знизити витрату коксу до 9...10 % від шихти, що завантажується.

Конструкція шахтної печі для плавки мідної руди на штейн наведена на рис. 4.10. Піч має прямокутну форму в плані. Ширина печі вибирається така, щоб повітря, що подавалася в піч під тиском, могло досягти центру печі. При використанні дуття надлишковим тиском до 20 кПа ширина печі становить звичайно 1,2...1,4 м. Довжина печі вибирається залежно від необхідної продуктивності й коливається в широких межах від 2,5 до 26,5 м.



1) колошник; 2) напилек; 3) димохід; 4) кесони; 5) домкрати; 6) бетонний фундамент; 7) жо-  
 лоб; 8) горн; 9) поріг; 10) повітряпідводи

Рисунок 4.10 – Схема шахтної печі у виробництві міді [2]

Шихту завантажують через вікна 1 у верхній частині печі, яка називається колошником. Над колошником розташований намет або напилек 2 для відводу газів з печі в металевий димохід 3. Висота намету близько 3 м. Стіни намету робляться із шамотної цегли й опираються на металеві балки, прокладені під колошниковим майданчиком. Перекривається намет склепінням. У великих печах встановлюють 2...3 газоходи для рівномірного відводу газів по довжині печі.

Особливістю шахтних печей є використання водоохолоджуваних металевих стінок – кесонів 4. Викликане це тим, що продукти плавки руд кольорових металів досить агресивні й важко підібрати вогнетривкий матеріал, що забезпечує тривалий термін служби печі. При використанні водоохолоджуваних стінок їх поверхня покривається шаром застиглих продуктів плавки, що добре захищають кесони від роз'їдання розплавом.

Кесони поздовжніх стін (фурмені) робляться шириною 0,6...1,2 м і висотою 2,5...6 м (рис. 4.11, а). Їх встановлюють на черені або ванни печі з нахилом 5...7 °. Кесони між собою з'єднуються болтами.

Для герметичності між кесонами ставиться азбестова прокладка. Торцеві кесони встановлюються вертикально. Усі кесони підтримуються за допомогою металевих балок, що оточують піч, роль яких іноді виконують повітрявідводи печі. Кесони виготовляються з листів товщиною 12...16 мм із вогневої сторони (усередині печі) і 10...12 мм із зовнішньої.

За допомогою відбортовування вони з'єднуються між собою із зазором для проходу води в 100...140 мм. Воду подають у середню або нижню частину кесона й відводять у самому верху з таким розрахунками, щоб не міг утворюватися простір, заповнений паром. Внаслідок поганого охолодження це місце може швидко прогоріти. У кожному кесоні, що утворює поздовжні стінки печі, є по 2...3 отвори, у які вставляються труби діаметром 80...120 мм для подачі повітря в піч.

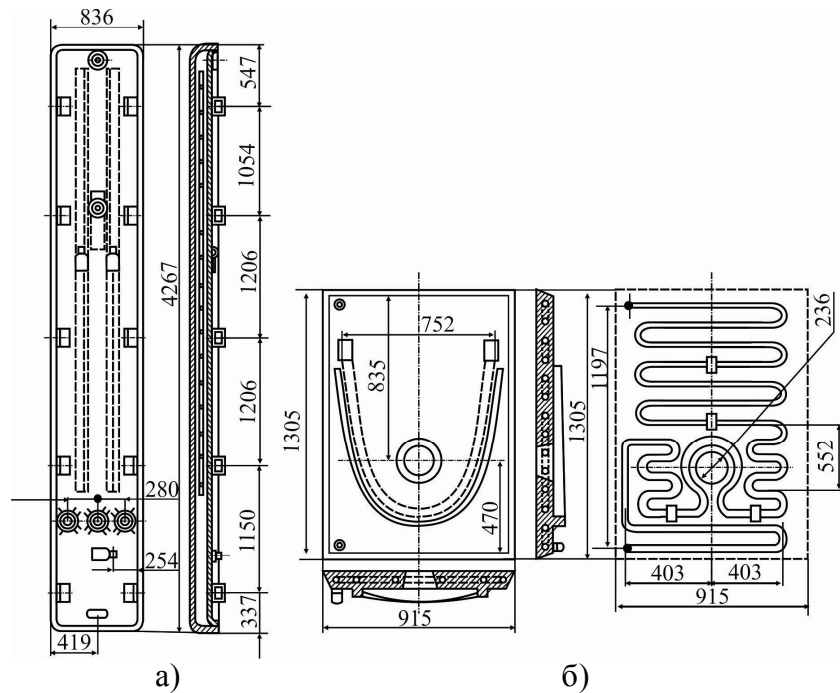


Рисунок 4.11 – Кесони шахтної печі: а) фурмений кесон; б) випускний мідний кесон [2]

У самій нижній частині кесона є невеликий люк, що дозволяє очищати кесон від осілого в ньому бруду. Опадів випадає менше при підведенні води в нижню частину кесона. Випуск розплаву з печі проводиться через отвір у кесоні. Для цього часто встановлюється спеціальний випускний кесон (рис. 4.11, б).

Підведення повітря здійснюється за допомогою фурм (рис. 4.12). У фурмі передбачений горизонтальний патрубок для чищення й похилий для аварійного зливу розплаву. Аварійний отвір закритий картонною заглушкою, яка згорає, коли розплав з переповненої ванни тече через фурму.

Випускний кесон відливається з міді й має меншу висоту в порівнянні з висотою основних кесонів. У тіло кесона залитий сталевий змієвик, усередині якого циркулює холодна вода. До випускного кесона кріпиться жолоб 7, що з'єднує піч з переднім горном 8, де проводиться розподіл продуктів плавки (жужелів, штейну) по щільності. Жолоб відлитий із чорнової міді й прохолоджується змієвиком. Усередині жолоб футерують магнезито-

вою або хромистою цеглою. Для утворення гідравлічного затвору, що перешкоджає вибиванню грубних газів через випускний отвір при безперервному випуску розплаву, наприкінці жолоба робиться поріг 9, відлитий з міді або викладений цеглою.

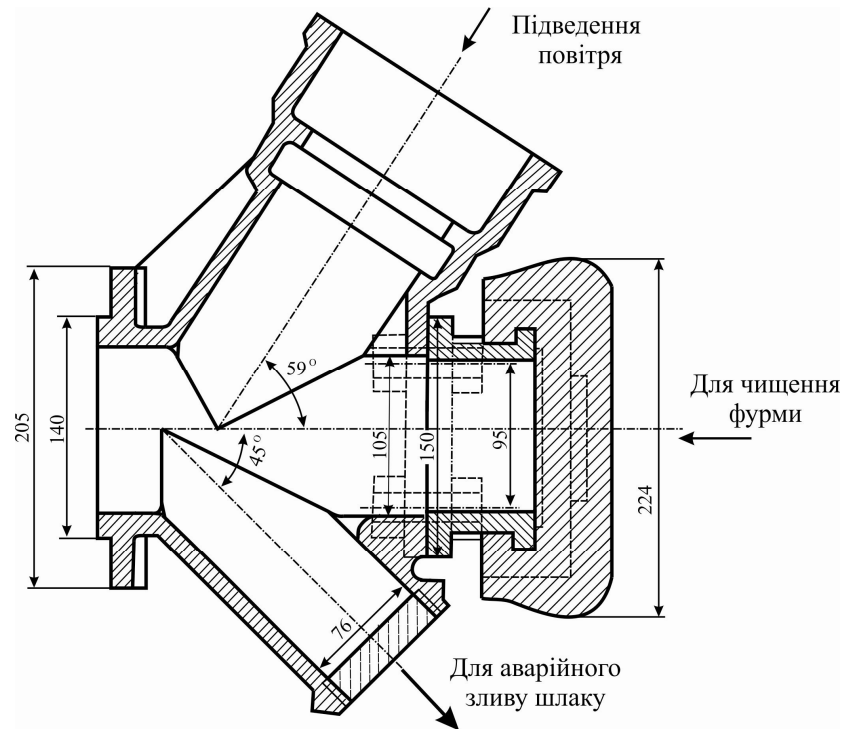


Рисунок 4.12 – Фурма шахтної печі [2]

Ряд шахтних печей обладнаний кесонами з випарним охолодженням (рис. 4.13). Кесони такого типу виконуються у вигляді панелей з товстостінних труб 1, розташовуваних на деякій відстані один від одного. З боку, зверненому усередину печі, проміжки між трубами перекриті сталевими пластинами. Із зовнішньої сторони кесони мають теплову ізоляцію 4 з піношамоту. Зверху й знизу труби уварено в круглі колектори 3. У нижній подається вода, з верхнього пароводяна суміш надходить у сепаратор, де відбувається поділ пари й води.

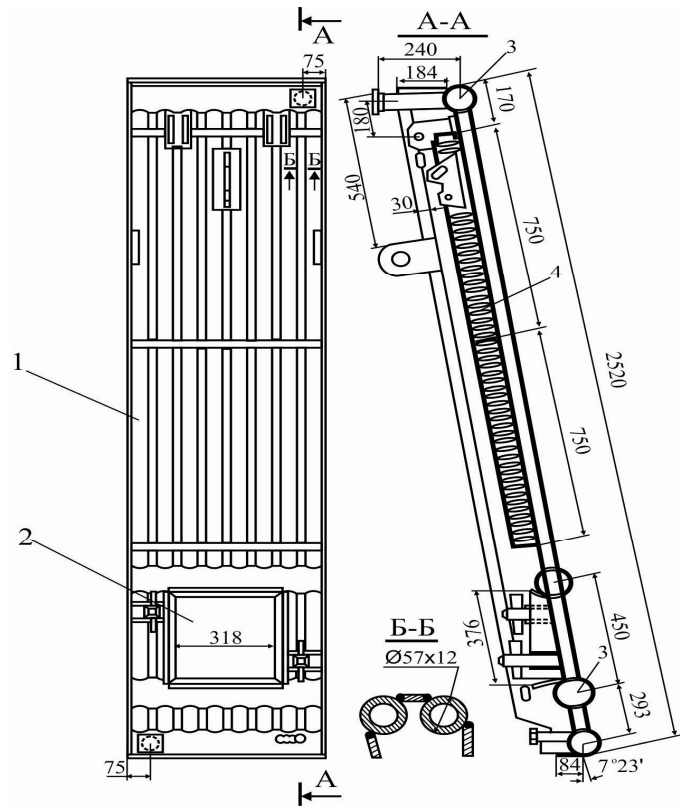


Рисунок 4.13 – Кесон з випарним охолодженням [2]

Пара під тиском до 1,40 МПа використовується для потреб підприємства, вода вертається в кесони. У нижній частині кесона є вікна 2 для установки фурм. Основою печі (рис. 4.10) служить бетонний фундамент 6, на якому установлені невисокі колони або домкрати 5. На колони або домкрати кладуть, горнові або череневі чавунні плити, які іноді мають залізні трубки для охолодження повітрям. Сам черінь і стінки горну (ванни) робляться із шамоту або кварцу, при бідних і роз'їдаючих штейнах – з магнетиту й хроміту.

У деяких випадках необхідно забезпечити герметичність шахтної печі (мідно-сірчана плавка, плавка свинцево-цинкової сировини). У цьому випадку робиться герметичний колошник із завантажувальним пристроєм дзвонового типу. У цьому випадку з газів, що відходять, уловлюють сірку конденсацією її пару. Шихту спочатку завантажують на верхній дзвоновий затвор. Потім цей затвор опускається, а матеріал потрапляє в простір між



двома затворами. При закритому верхньому затворі відкривається нижній, і шихта попадає в піч. При цьому газів назовні не проникають. Газів з печі відводять через димохід, розташований збоку печі.

Найважливішим показником роботи печі є питома продуктивність, що характеризується кількістю шихти (без коксу), яка виплавляється за добу на  $1 \text{ м}^2$  площі перетину печей в області фурм. Питома продуктивність різна для печей різного призначення. Так, при відновній плавці на свинець вона становить  $60 \dots 70 \text{ т/м}^2$  у добу, при напівпіритному топленні мідної руди – від  $60 \dots 80$  до  $110 \text{ т/м}^2$  у добу, при плавці на штейн із одержанням елементарної сірки –  $40 \dots 50 \text{ т/м}^2$  у добу. За прийнятою середньою питомою продуктивністю може бути знайдена необхідна площа перетину печі для проплаву заданої кількості шихти. Прийнявши ширину печі в раніше зазначених межах, можна знайти необхідну довжину печі або визначити необхідне число печей певної довжини. Висота печі може бути прийнята на основі досвіду аналогічної плавки.

Витрата палива знаходиться з теплового балансу плавки. За розрахунками горіння палива й фізико-хімічних процесів у печі знаходиться необхідна кількість повітряного дуття, склад й кількість газів, що відходять. Експериментальні дані показують, що найбільша кількість коксу витрачається при відновній свинцевій плавці ( $12 \dots 15 \%$ ) і відновно-сульфідуючій плавці окиснених нікелевих руд ( $20 \dots 25 \%$ ); менша витрата при мідно-сірчаному процесі ( $8 \dots 10 \%$ ); при напівпіритній плавці мідних і мідно-нікелевих руд ( $6 \dots 10 \%$ ), при піритній мідній плавці ( $2 \dots 3 \%$ ).

У таблицях 4.1 і 4.2 приводяться теплові баланси сульфідуючої плавки окисненої нікелевої руди й піритної плавки мідної руди. Підвищення теплового к.к.д. шахтних печей можливо за рахунок скорочення втрат з газами, що відходять, на частку яких доводиться близько  $1/3$  тепла, що витрачається. Найбільш ефективним засобом зниження цих втрат є застосування дуття, збагаченого киснем. Вище вказувалося, що це дає можливість не тіль-

ки знизити витрату коксу, але й збільшити питому продуктивність печей. Корисною є утилізація тепла охолоджуючої води й гарячих жужелів. Зниження виходу жужелів при плавці більш багатої шихти із чистими флюсами також дозволяє зменшити витрату коксу.

Таблиця 4.1 - Тепловий баланс сульфідуючої плавки

Прихід тепла:	%	Витрата тепла:	%
від горіння коксу	85,6	через штейн	1,2
від жужелеутворення	8,2	через жужелі	33,2
від екзотермічних реакцій	6,2	ендотермічних реакцій	13,4
		на випар вологи	4,1
		через гази	28,1
		через воду, що охолоджує кесони	16,3
		різні втрати	3,7
Разом	100,0	Разом	100,0

Таблиця 4.2 - Тепловий баланс піритної плавки

Прихід тепла:	%	Витрата тепла:	%
горіння коксу	10,5	через штейн	1,6
горіння сірки	42,5	через жужелі	24,3
окиснення заліза	36,2	на ендотермічні реакції	18,6
екзотермічних реакцій і жужелеутворення	10,8	через гази	37,5
		через воду та інші втрати	18,0
Разом	100,0	Разом	100,0

Повітря подають через фурми. Припустима швидкість повітря у фурмах до 25 м/с, у повітряпідводі, що підводить, 10...18 м/с. Загальна площа перетину фурм, віднесена до площі перетину печі в області фурм, зветься фурменим відношенням. Фурмене відношення при піритній плавці досягає 0,1. При від-

новній плавці витрата повітря менша й фурмене відношення рівне 0,03. Необхідний надлишковий тиск дуття розрахувати важко через недостатню характеристику опору шару шихти.

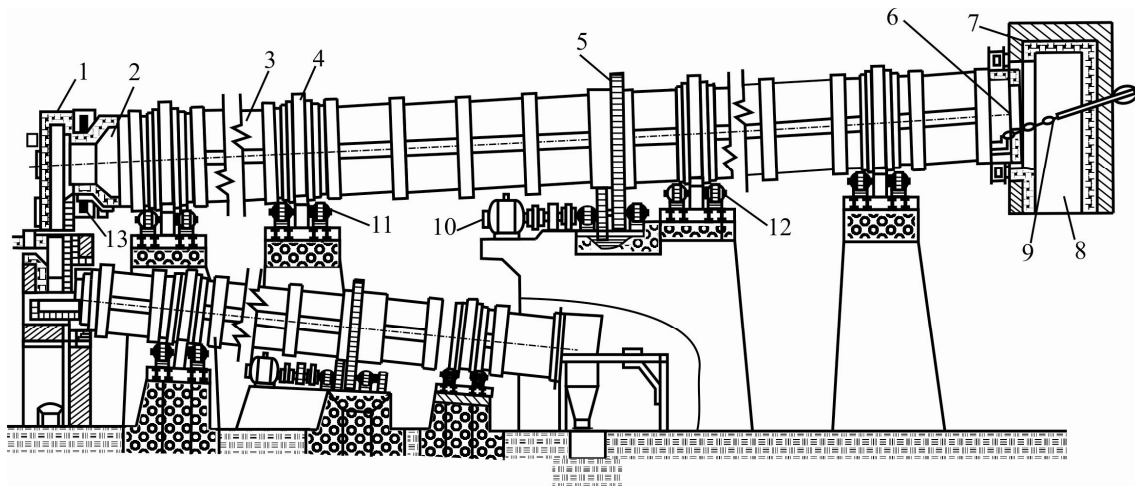
Практично при відновній плавці використовують надлишковий тиск 16...24 кПа, при сульфідуючій плавці окиснених нікелевих руд 8...11 кПа, при напівпіритній плавці кускової руди 15...18 кПа, при піритній плавці 28 кПа. При відводі газоподібних продуктів плавки швидкість їх у газозоді ухвалюється 3...7 м/с.

#### 4.1.4 Трубчасті обертові печі

Переробка дрібного сипучого матеріалу без його розплавлення з успіхом проводиться в трубчастих обертових печах. У довгій футерувальній трубі найчастіше протитечею рухаються нагрівачий матеріал і продукти горіння палива. Рух матеріалу відбувається завдяки невеликому нахилу труби убік вивантаження й обертанню печі. При обертанні матеріал піднімається на деяку висоту й пересипається вниз. При цьому відбувається гарний теплообмін з гарячими газами увесь час оновлюючої поверхні матеріалу. Теплообміну сприяє також те, що матеріал, пересипаючись, попадає на нагріту поверхню кладки за той період, коли вона вільна від шару матеріалу. Усе це визначило високу інтенсивність теплообміну в робочому просторі печі.

Трубчасті обертові печі використовуються для сушіння різних матеріалів, видалення хімічно зв'язаної вологи при високих температурах випалу й для спікання матеріалу з утворенням нових сполук. Це визначило їхнє застосування при виробництві глинозему в алюмінієвій промисловості (спікання й кальцинація). Вони знайшли застосування й при переробці матеріалів, що містять свинець і цинк. При цьому цинк відганяється у вигляді окислу й уловлюється з газів, що відходять. Барабанні печі використовуються для випалу сульфідних матеріалів.

На рисунку 4.14 представлено піч для спікання матеріалу, що містить алюміній, з утворенням розчинної алюмінієвої сполуки. Основний елемент печі – залізний барабан 3 довжиною до 150 м і діаметром 2,0...3,8 м. Барабан футерують високоглиноземистою або шамотною цеглою. Піч працює за принципом протитечії. Шихта суха або мокра у вигляді пульпи із вмістом вологи 40...42 % надходить у барабан через торець 6 (холодний кінець) і повільно переміщується до головної частини 2 (гарячий кінець) назустріч газам. З барабана продукт спікання – спік – зсипається в холодильник, розташований під піччю барабан, що й представляє собою також барабан довжиною до 30 м і діаметром до 2,5 м. У барабані спік охолоджується повітрям, що рухається назустріч, або водою, що зрошує холодильник зверху.



- 1) розвантажувальна голівка; 2) головна частина; 3) барабан; 4) бандаж; 5) вінцевий триб; 6) хвостова частина; 7) завантажувальна коробка; 8) димохід; 9) відбійне пристосування; 10) привід; 11) обертові ролики; 12) завзяті ролики; 13) ущільнення

Рисунок 4.14 – Трубчаста обертова піч [2]

При охолодженні спіку повітрям останній просмоктується через холодильник вентилятором (на рисунку не показаний) і використовується при спалюванні палива. Для нагрівання печі застосовують мазут, газ або вугільний пил. Форсунки або пальники

розташовують у головній частині барабана. Димові гази, що містять значну кількість пилу, через димохід 8 направляються на очищення в пилові камери, в електрофільтри й навіть іноді в скрубери. Тільки після цього димові гази за допомогою димососу потрапляють в димар. Футерувальний і завантажений шихтою барабан має велику масу (маса печі довжиною 70 м близько 400 т). За допомогою спеціальних бандажів 4, закріплених зовні кожуха, піч опирається на обертові ролики 11 із бронзовими підшипниками. Обертання проводиться від мотора 10 через редуктор і вінцевий триб 5, закріплений за допомогою пружин на кожусі печі. Барабан обертається звичайно із частотою 0,6...2 оберти у хвилину. Частоту обертання можна змінювати, регулюючи контролером число обертів двигуна.

Піч монтують із ухилом в 3...6°. Щоб уникнути сходу барабану з опор використовуються завзяті ролики 12, розташовані горизонтально, у які збоку впирається бандаж.

Гарячий кінець печі входить у паливну (розвантажувальну) голівку 1, що влаштовується звичайно відкотною. Між кінцем барабана й паливною голівкою ставиться лабіринтове ущільнення у вигляді диска 13, закріпленого на барабані й обертового в коробці, закріпленої на паливній голівці. У передній стінці паливної голівки є отвори для пальників або форсунок. До голівки примикає челюсті каналу, по якому спік пересипається в холодильник.

Холодний кінець печі входить у завантажувальну коробку 7. Завантажують суху шихту за допомогою патрубку, що проходить через завантажувальну коробку печі (на рисунку не показаний). Пульпу в піч або наливають, або розпилюють форсунками. Щоб уникнути утворення настилів на внутрішній поверхні холодного кінця барабану є відбійне пристосування 9, що складається зі сталеві болванки, прикріпленої ланцюгом до завантажувальної голівки. При обертанні барабана болванка розбиває настили.

Барабан печі по довжині може бути розбитий на чотири зони, а саме: зону сушіння й зневоднювання (I), зону кальцинації або розкладання (II), зону спікання (III) і зону охолодження (IV). Максимальна температура газів у зоні спікання, де вона досягає 1600 °С. При нормальній роботі печі температура газів, що відходять, у боріві становить 400...500° С.

Продуктивність печі при мокрій бокситовій шихті 12 т/годину спіку й вище. Головні фактори, що впливають на продуктивність: товщина шару матеріалу в печі, частота обертання печі, вологість шихти і її хімічний склад. Середня питома витрата тепла становить 6300...7100 кДж на 1 кг спіку. У таблиці 4.3 приводиться тепловий баланс трубчастої печі спікання.

Таблиця 4.3 - Тепловий баланс спікання в трубчастій печі

Прихід тепла:	%	Витрата тепла:	%
горіння палива	95,0	на одержання спіку	53,4
внесене шихтою	4,0	через двоокис вуглецю	1,1
нагрітим повітрям	1,0	через водяну пару	1,9
		через оборотний пил	1,1
		Через спік	14,5
		через димові гази	16,6
		втрати	11,4
Разом	100,0	Разом	100,0

Підвищення к.к.д. печі досягається оптимізацією умов спалювання палива, більш повним використанням тепла спіку для підігріву повітря, використовуваного для спалювання палива, кращою тепловою ізоляцією печі.

#### 4.1.5 Печі киплячого шару

Великим успіхом в інтенсифікації металургійних процесів і процесів нагрівання подрібненого матеріалу з'явилося використання печей киплячого шару. У цих печах через шар здрібно-

го матеріалу продувається газ знизу нагору з певною швидкістю. Об'єм шару при цьому зростає, настає момент, коли зчеплення між частками буде ослаблено (кожна частка буде оточена газом) настільки, що вони стануть вільно переміщатися в шарі, випробовуючи лише періодичні зіткнення між собою. Такий шар зовні нагадує киплячу рідину, звідки печі й одержали свою назву.

Малий розмір часток (близько 0,1...4,0 мм), а отже, значно розвинена питома (на одиницю маси) поверхня й гарний контакт по всій поверхні часток з газовим середовищем приводять до значного прискорення нагрівання й хімічних процесів, що відбуваються на поверхні часток. При нагріванні дрібних часток практично відсутній внутрішній тепловий опір, і швидкість нагрівання визначається лише зовнішнім теплообміном з гарячим газом, головним чином за рахунок конвекції. Випромінювання при малій товщині газового шару й малій різниці температур між газом і часткою відіграє меншу роль, хоча теплообмін випромінюванням між частками, що рухаються, сприяє вирівнюванню їх температур. У киплячому шарі турбулентний рух настає при порівняно малих значеннях критерію Рейнольдса ( $Re = 100$ ), що також сприяє поліпшенню теплообміну. Усе це приводить до того, що об'ємний коефіцієнт тепловіддачі в киплячому шарі в сотні разів більше, чим у щільному шарі.

Якщо швидкість газу, що проходить через киплячий шар, ще збільшувати, то відбуваються викиди матеріалу із шару з переходом його у зважений стан (рух часток у газовій фазі й переміщення їх разом з газом). Такий стан зветься зваженим й знайшов застосування в спеціальних печах. При киплячому шарі перехід часток у зважений стан сприяє збільшенню пиловиносу, який при неоднорідному матеріалі може досягати дуже великих значень (до 50 %).

Таким чином, для киплячого шару характерні дві швидкості – мінімальна ( $\varpi_{min}$ ), при якій починається зрідження шару, і максимальна ( $\varpi_{max}$ ), при якій шар починає переходити у зважений стан (рух часток у газі). При цьому під швидкістю газу розу-

міють швидкість  $\varpi_{св}$ , віднесену до вільного перетину печі без врахування матеріалу. При проведенні процесу в киплячому шарі повинна зберігатися умова  $\varpi_{min} < \varpi_{св} < \varpi_{max}$ .

Дійсна швидкість газу в даному перетині:

$$\varpi_{\Gamma} = \frac{\varpi_{св}}{f_K}, \quad (4.1)$$

де  $f_K$  – шпаруватість киплячого шару матеріалу. Шпаруватість киплячого шару ( $f_K$ ) більше шпаруватості щільно лежачого шару ( $f$ ).

Мінімальну швидкість за М.А. Глінковим можна знайти, чисельно прирівнюючи силу опору руху газу по каналах шару до маси шару. При цьому, допускаючи турбулентний характер руху газу, одержуємо критеріальну залежність:

$$Re_{min} = \left[ \frac{Ar}{4,35} \frac{f}{(1-f)^{0,15}} \right]^{0,54}. \quad (4.2)$$

Максимальну швидкість можна знайти, чисельно прирівнюючи силу тиску потоку газу на частку (силу лобового опору частки) її масі й силі тертя при руху частки. Критеріальне рівняння при цьому має вигляд:

$$Re_{max} = \frac{f_K \cdot Ar}{18}, \quad (4.3)$$

де  $Re_{min}$  і  $Re_{max}$  – критерії Рейнольдса, які знаходять із виразів:

$$Re_{min} = \frac{\varpi_{min} \cdot d}{\nu_t}; Re_{max} = \frac{\varpi_{max} \cdot d}{\nu_t}, \quad (4.4)$$

$Ar$  – критерій Архімеду:



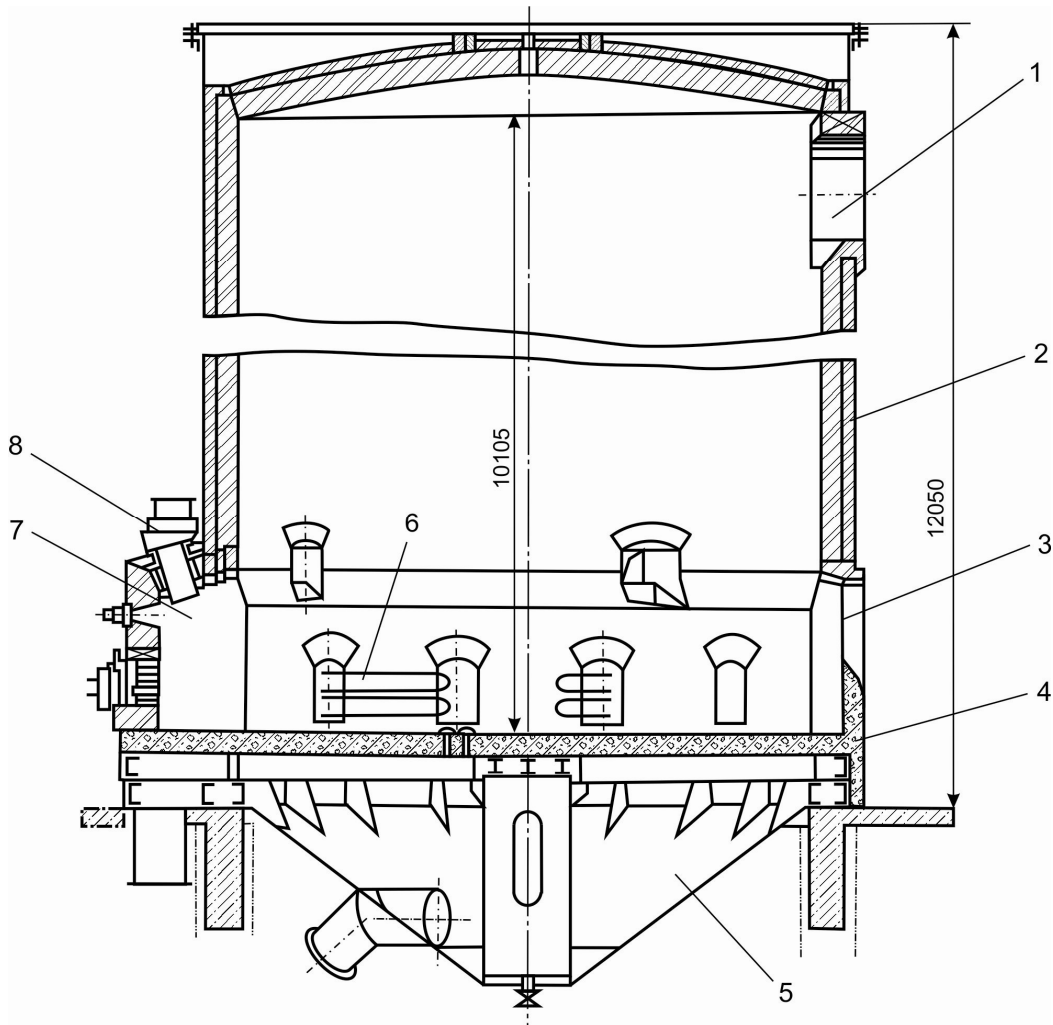
$$Ar = \frac{g \cdot d^3 (\rho_M - \rho_G)}{v_i^2 \cdot \rho_G}, \quad (4.5)$$

де  $d$  – діаметр часток матеріалу (прийнятих у вигляді кулі);  $\rho_M$ ,  $\rho_G$  – щільність матеріалу й газу;  $v_i$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу.

Широке використання печі киплячого шару одержали при випалі сульфідних концентратів цинку, міді, молібдену, а також при сушінні й кальцинації глинозему. Питома продуктивність череню печі зросла приблизно в 20 разів у порівнянні з питомою продуктивністю багаточерневих перегрібних печей. При випалі цинкових концентратів з наступною гідрометалургійною переробкою вона досягає 5,5 т/(м<sup>2</sup>·доб).

На рис. 4.15 показано піч для випалу цинкових концентратів у киплячому шарі із площею череню 34 м<sup>2</sup>. Робляться печі із площею череню до 90 м<sup>2</sup>. Робоча камера печі в горизонтальному перетині може мати круглу й прямокутну форму.

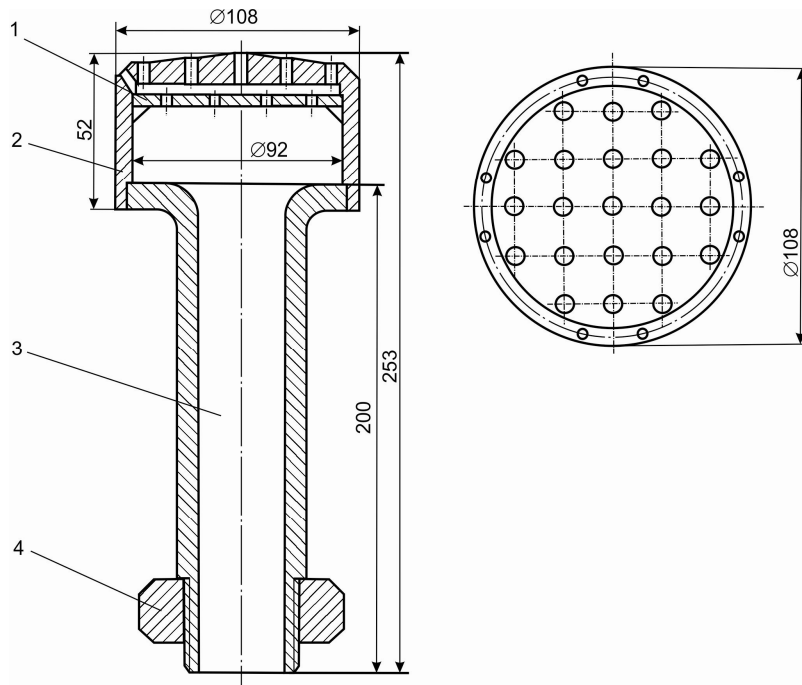
Іноді печі виготовляють багатокамерними. У камерах можна підтримувати різні температури, і матеріал проходить через усі камери послідовно. Склепіння і стіни роблять із шамотної цегли. У якості зовнішньої ізоляції використовують діатомітову або легковагову цеглу. Тепла, що виділяється за рахунок окиснення сульфідів, досить для підтримки заданої температури (930...1000 °С). Якщо буде потреба газоподібне й рідке паливо може подаватися разом з повітрям, тверде паливо повинне бути здрібнене й вводиться безпосередньо в піч. У випадку надлишку тепла, яке виділяється за реакцією, роблять спеціальні холодильники у вигляді кесонованих стінок або водоохолоджувальних труб усередині киплячого шару. Коефіцієнт тепловіддачі від киплячого шару до поверхні холодильника досягає 600...800 Вт/(м<sup>2</sup>·К).



1) газохід ; 2) шахта печі; 3) розвантажувальний поріг; 4) черінь; 5) повітряна коробка; 6) кесон; 7) форкамера; 8) завантажувальна тічка

Рисунок 4.15 – Схема печі киплячого шару [2]

Найбільш відповідальною деталлю печі є черінь робочої камери, через який підводиться повітря, необхідне для процесу. При цьому потрібний його рівномірний розподіл по перетину печі без розсіпання матеріалу у повітря. Найчастіше черінь роблять із вогнетривкого бетону поверх металевого листа з отворами через 250 мм, у які вставляють грибоподібні сопла (рис. 4.16).



1) решітка; 2) ковпачок; 3) кухоль; 4) гайка  
 Рисунок 4.16 – Повітряне сопло [2]

Сопло складається із чавунного патрубку й нагвинчуваного ковпачка з отворами діаметром 2,5...3,0 мм. У середині ковпачка знаходиться решітка, отвори якої не збігаються з отворами ковпачка. Це охороняє від провалу матеріалу в повітряну коробку.

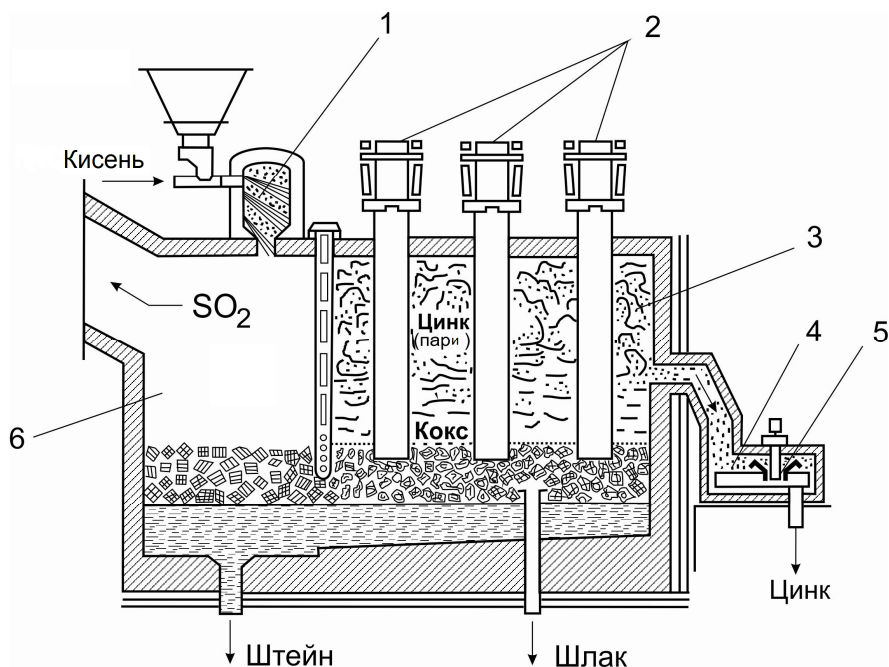
Матеріал завантажують через тічку у склепінні або форкамері. Вивантаження матеріалу відбувається самопливом через розвантажувальний поріг у стіні на верхньому рівні киплячого шару (1,0...1,2 м від череню). Гази, що містять значну кількість пилу, відводяться зверху камери й після охолодження направляються в пиловловлювальне обладнання.

У таблиці 4.4 приводиться тепловий баланс печі для випалу цинкових концентратів у киплячому шарі. З наведеного балансу видно, що найбільша кількість тепла губиться з газами, що відходять газами й водою холодильників. Для використання тепла газів, що відходять, застосовують казани-утилізатори. При цьому кесони включаються в контур казана.

Таблиця 4.4 - Тепловий баланс печі киплячого шару

Прихід тепла:	%	Витрата тепла:	%
екзотермічних реакцій	98,8	у недогарку	7,3
занесене повітрям	1,1	через гази	63,8
занесене концентратом	0,1	на випар вологи	4,5
		у холодильниках	21,8
		втрати тепла	2,6
Разом	100,0	Разом	100,0

Плавка подрібненого матеріалу у зваженому стані дозволяє значно прискорити процес завдяки практично миттєвому нагріванню дрібних часток матеріалу в газовому середовищі. Було розроблено й виготовлено кілька конструкцій. Однак найбільшою ефективністю характеризується комплексний агрегат, розроблений у Радянському Союзі, що й носить назву КИЗЦЕТ-Агрегату (киснево-завислий, циклонний, електротермічний) (рис. 4.17).



1) циклон; 2) електроди; 3) електротермічна піч; 4) конденсатор; 5) розбризкувач цинку; 6) розділова камера

Рисунок 4.17 – Схема КИЗЦЕТ-Агрегату [2]

Агрегат розрахований на комплексну переробку дрібної шихти крупністю до 5 мм сульфідних і окиснених концентратів кольорових металів. Шихта разом із киснем подається в циклон 1. Швидкість дуття досягає 100 м/с, що забезпечує підтримку часток у зваженому стані. При плавці сульфідних концентратів, що містять більш 20 % S, тепла, яке виділяється при їхньому окисненні, досить для досягнення необхідної температури.

Плавка окиснених або малосульфідних матеріалів проводиться з додавкою газоподібного, рідкого або твердого палива. Температура в зоні плавлення 1200...1600 °С. У циклоні гази рухаються за спіраллю. Тверді частки відцентровими силами відкидаються на стінки циклону, а кисень із великою швидкістю обмиває їх. У результаті швидкість протікання реакції значно зростає й виділяється велика кількість тепла. Питома об'ємна теплова напруга в циклоні досягає  $7 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>, тоді як у відбивній печі вона становить  $0,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>. Добова продуктивність КИЗЦЕТ-Агрегату 60...75 т/м<sup>2</sup>, а печі відбивної мідної плавки 5 т/м<sup>2</sup>.

Утворений розплав по стінках кесонованої циклонної камери стікає вниз у розділову камеру 6 і під охолоджуваною розділовою стінкою надходить в електричну відстійну піч 3. Тут за допомогою електродів 2, опущених у жужіль, відбувається нагрівання розплаву й відстоювання з поділом на жужіль й штейн. Якщо сировина включає легколеткі метали (цинк, кадмій і ін.), то в електропечі відбувається їхній відгін з виводом пар у конденсатор 4. Застосування спеціального розбризкувача металу 5 дозволяє поліпшити умови конденсації пару. Гази, що містять сублимацію металів і сірчистий газ, з розділової камери направляються на охолодження й очищення. У газі втримується до 85 % сірчистого ангідриду, який з успіхом може перероблятися на сірчану кислоту або скраплюватися.

Усі процеси в КИЗЦЕТ-Агрегаті безперервні, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати й автоматизувати обслуговування. Сумарні енергетичні витрати при цьому більш ніж у два рази

менше в порівнянні з витратами інших сучасних пірометалургійних процесів.

У КИЗЦЕТ-Агрегаті переробляються мідно-цинкові, мідно-олов'яні, нікелеві, мідні, свинцеві, свинцево-цинкові концентрати.

Універсальність КИЗЦЕТ-Агрегату, високі техніко-економічні показники, практична відсутність забруднення навколишнього середовища визначають велику перспективу його використання в кольоровій металургії.

## **4.2 Електричні печі**

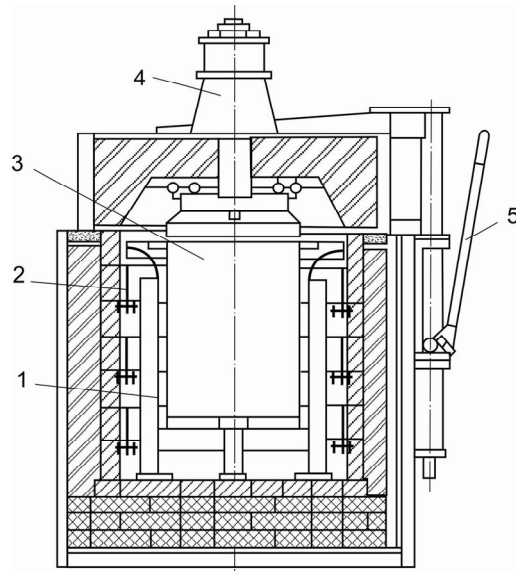
### **4.2.1 Печі опору**

*Нагрівальні печі.* Електричні печі опору широко використовуються для нагрівання й термічної обробки кольорових металів і їх сплавів при температурі до 1000 °С. Для одержання більш високих температур потрібні спеціальні матеріали для нагрівачів, як правило, дорогі й дефіцитні. Можливість точної автоматичної підтримки заданої температури й нагрівання в заданій атмосфері вигідно відрізняють електричні печі від паливних. Висока вартість електроенергії часто окупається зниженням втрат металу від випару.

Нагрівання при низькій температурі (300...500 °С) доцільно здійснювати із циркуляцією атмосфери в печі. При цьому збільшується інтенсивність теплопередачі конвекцією, що є найбільш ефективною при цих температурах. Одночасно досягається більша рівномірність нагрівання.

На рис. 4.18 показана циліндрична шахтна піч для нагрівання дрібних виробів з алюмінієвих сплавів перед їх загартуванням. Вироби укладаються в металевий кошик 3 з жароміцної сталі із ґратчастим дном. Кошик поміщають у піч. Стрічкові нагрівальні елементи 2 розміщені на стінці шахти. Для запобігання виробів

від перегріву за рахунок випромінювання нагрівачів між ними й кошиком поміщений металевий екран 1.



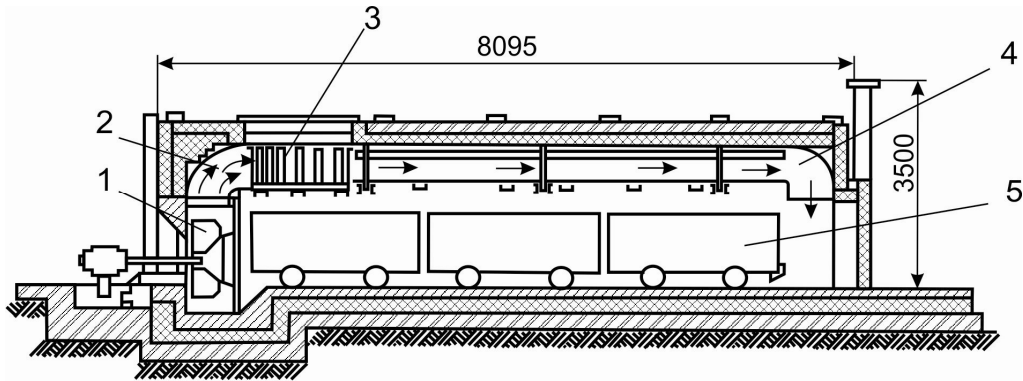
1) металевий екран; 2) нагрівальні елементи; 3) металевий кошик; 4) вентилятор; 5) важільне обладнання

Рисунок 4.18 – Шахтна циліндрична піч опору [2]

Примусова циркуляція повітря здійснюється за допомогою вентилятора 4, встановленого в кришці печі. Повітря циркулює в просторі між нагрівачами й екраном, а потім проходить через кошик з виробами. Для більшої рівномірності нагрівання виробів ( $\pm 5$  K) напрямку руху повітря періодично може змінюватися на зворотне. При завантаженні й вивантаженні виробів кришка печі разом з вентилятором трохи піднімається важільним обладнанням 5 і зрушується убік.

Для відпалювання алюмінієвих труб використовується електронна піч опору, показана на рис. 4.19. Труби завантажуються у візки 5, які по рейках за допомогою троса й лебідки вкочуються в піч. У печі міститься кілька візків. Секції нагрівачів 3 змонтовані на склепінні печі. Вентилятор 1 установлений у торці печі й подає повітря на нагрівачі по трубі 2. Нагріте повітря по трубі 4 під склепінням печі надходить в інший кінець печі й через відкриті

торці візків проходить усередині й зовні труб і знову надходить у вентилятор. При нагріванні труб до  $440\text{ }^{\circ}\text{C}$  витрата електроенергії становить  $0,4\text{ кВт}\cdot\text{година}$  на  $1\text{ кг}$  металу.



1) вентилятор; 2, 4) повітряпідвід; 3) нагрівачі; 5) візок

Рисунок 4.19 – Піч опору для нагрівання алюмінієвих труб

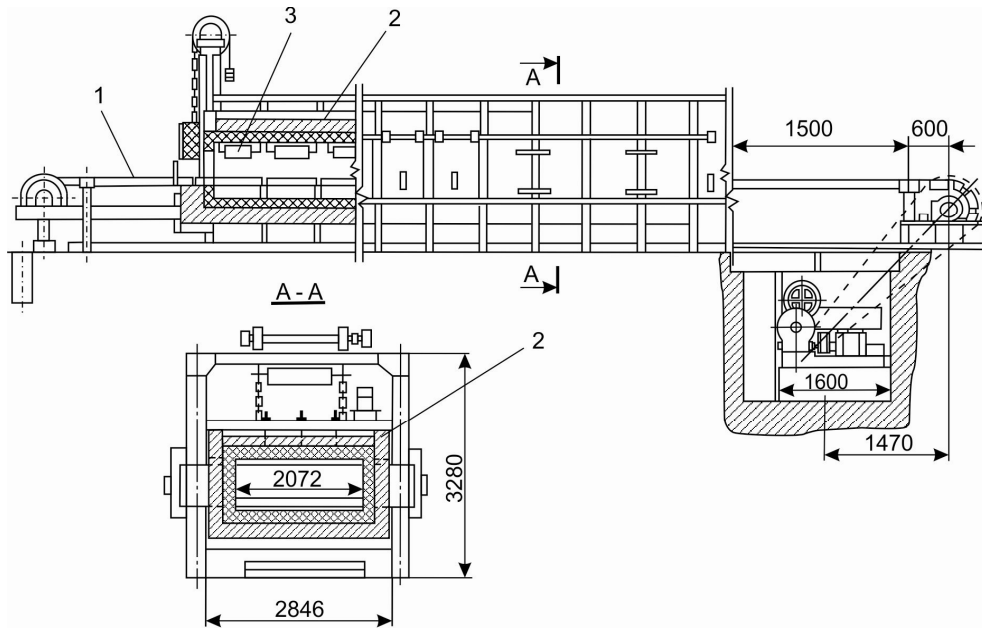
[2]

На рис. 4.20 показана прохідна піч для нагрівання дюралюмінієвих злитків. Злитки перемішаються через піч за допомогою конвеєра 1. Нагрівання двостороннє (зверху й знизу) за допомогою нагрівачів 3, змонтованих на металевих рамах. У бічних стінах печі є отвори, що закриваються кришками, для заміни згорілих нагрівачів новими. Склепіння печі 2 підвісне. Продуктивність печі  $2230\text{ кг/година}$ , питома витрата електроенергії  $0,188\text{ кВт}\cdot\text{година}$  на  $1\text{ кг}$  металу.

*Печі опору для плавки металу.* Легкоплавкі метали й сплави переплавляються в електричних печах опору тигельного і камерного типу. На рис. 4.21 показана конструкція електропечі для плавки алюмінію. Ємність тигля  $150\text{ кг}$  алюмінію. Циліндричний кожух печі на цапфах закріплений у підшипниках і має привід для нахилу печі. Спиральні дотові нагрівачі розташовані на керамічних полках у кілька рядів по висоті печі. Усередину печі вставлений чавунний тигель ємністю  $150\text{ кг}$ . Піч має піднімальну кришку й жолоб для зливу металу. Метал плавиться в тиглі й після нагрівання до заданої температури зливається шляхом нахи-



лу печі. Плавка наступних порцій металу значно прискорюється, якщо в тиглі залишається після розливу невелика кількість розплаву.



1) конвеєр; 2) підвісне склепіння; 3) нагрівальні елементи  
Рисунок 4.20 – Конвеєрна піч опору для нагрівання [2]

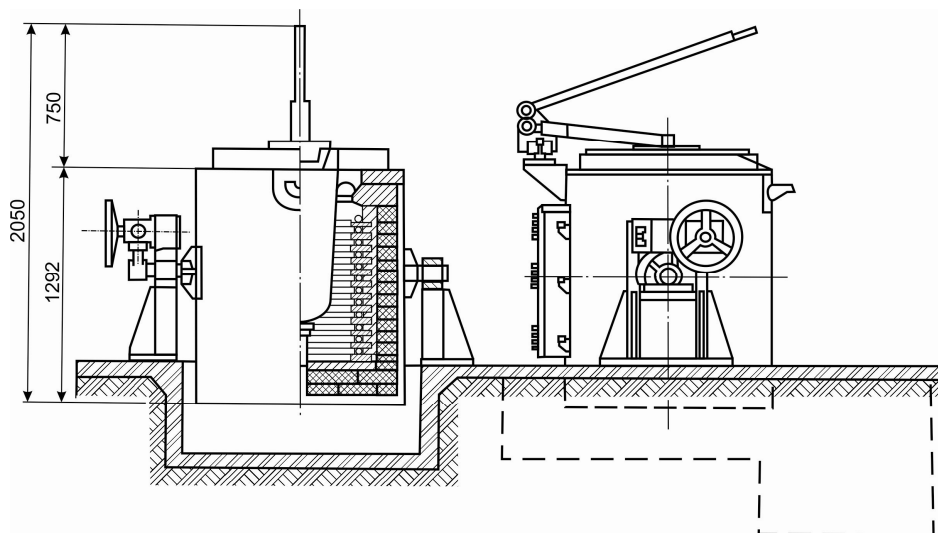
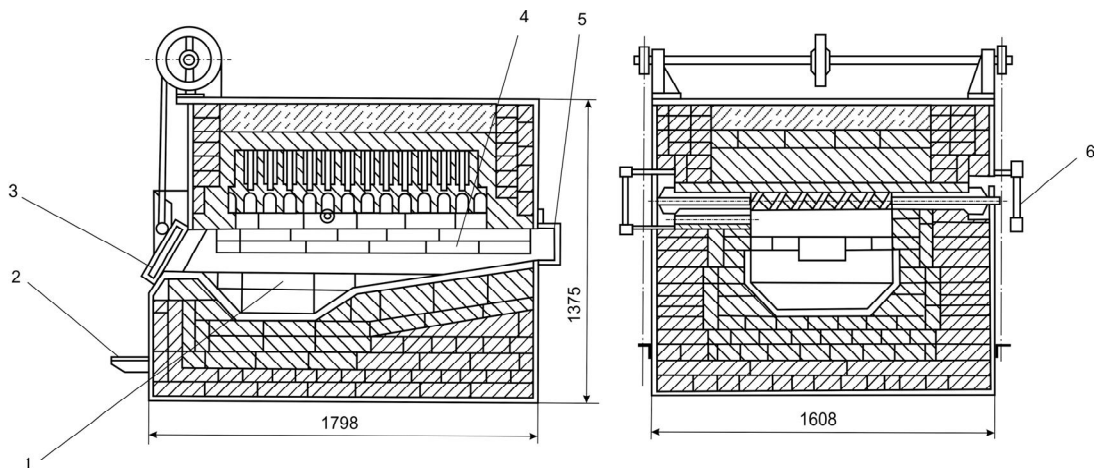


Рисунок 4.21 – Тигельна електрична піч опору для плавки алюмінію [2]

При плавці великих кількостей металу набули застосування ванні печі з нахилом і без нахилу. На рис. 4.22 показана конструкція камерної печі для плавки алюмінію ємністю 150 кг. Такі печі часто застосовуються в якості роздавальних і носять скорочене найменування ОАК (опору, алюмінієва, камерна). Чушковий алюміній завантажується через робоче вікно 5, розташовують на похилому черені форкамери 4, де метал підігрівається, а іноді й оплавляється. Нагрітий або розплавлений метал потрапляє в металозбірник 1, де він нагрівається до потрібної температури й звідки ложками періодично вичерпується через робоче вікно 3 в іншій торцевій стінці й розливається у форми. Для зручності роботи дверцята вікна 3 піднімається при натиску ногою педалі 2. Піч нагрівається дрововими (діаметр 7 мм) спіральними нагрівальними елементами, розташованими в пазах цегли склепіння. Для зручності заміни нагрівальних елементів, що вийшли з ладу пази зроблені наскрізні поперек усієї печі. Нагрівальні елементи з'єднують між собою під огорожувальним щитком 6. Піч включають у трифазну мережу напругою 220/380 В.



1) металозбірник; 2) педаль; 3) робоче вікно вивантаження; 4) форкамера; 5) робоче вікно завантаження; 6) огорожувальний щиток

Рисунок 4.22 – Камерна піч опору типу ОАК [2]

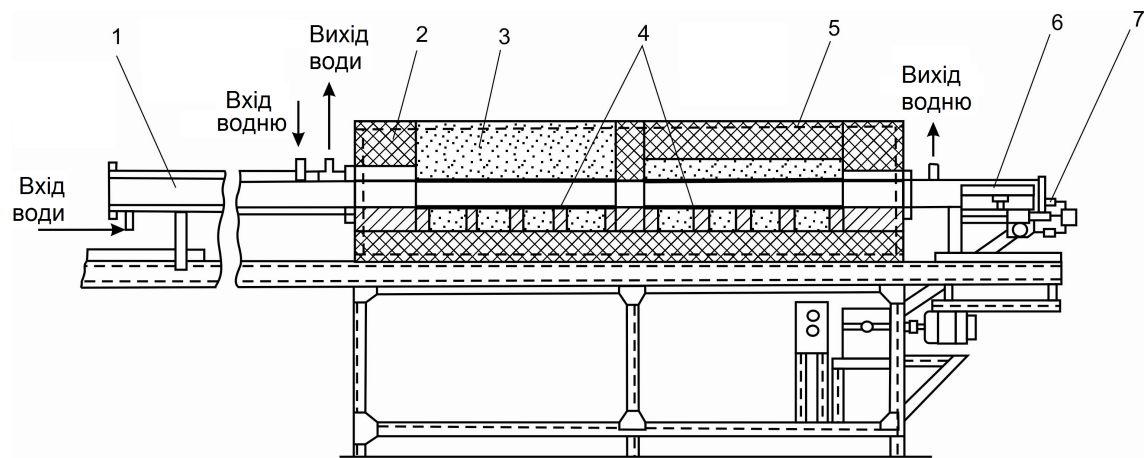
Склепіння печі роблять із фасонної цегли, що перекриває весь проліт печі. Поверх фасонної цегли роблять теплову ізоляцію. Усю піч монтують у металевому кожусі й розташовують на підлозі цеху або на фундаменті. Кожух усередині футерують шамотною цеглою по шару листового азбесту товщиною 5...7 мм. Черінь викладають із шамотної цегли по шару інфузорної землі товщиною 40 мм; зверху цегли укладають шар шамотного набивання товщиною 30 мм, що складається з 45 % вогнетривкої глини, 50 % шамотного порошку, 3 % піску й 2 % рідкого скла.

Піч ємністю 150 кг алюмінію має електричну потужність 40 кВт. Продуктивність печі 60 кг/година алюмінію. Термін служби нагрівальних елементів значно скорочується при влученні на них бризів металу. Тому при обслуговуванні печі необхідно стежити, щоб метал не розприскувався. Подібного типу печі будуються великої ємності (до 10 т). При цьому форкамери влаштовуються по обидва боки печі. Для розливу металу використовують сифон або піч нахиляють за допомогою спеціального механізму. Аналогічно робляться міксери, але без форкамер.

Високі температури в печах опору досягаються використанням нагрівачів з карборунду або дисиліциду молібдену. У твердосплавній промисловості знайшли широке застосування печі з молібденовими й графітовими нагрівачами, що працюють в атмосфері водню.

На рис. 4.23 показана муфельна двозонна піч для спікання твердих сплавів. При спіканні вироби повинні повільно нагріватися, тому перша зона має температуру до 1000 °С. Муфель для цієї зони виготовляється зі сталі, а в якості нагрівача використовується ніхром. У другій зоні завершується нагрівання й відбувається спікання завантажених у човники виробів при температурі 1400...1550 °С. Муфель у високотемпературній зоні робиться з переплавленого алунду з невеликою добавкою вогнетривкої глини як сполучного матеріалу. Нагрівач виконується з молібденової стрічки товщиною 0,8...1,0 мм або із дроту діаметром 1,0...2,0 мм, які намотуються на муфель і зовні обмазуються вогнетрив-

кою глиною з алундом. Обидва муфеля з нагрівачами 4 встановлюються в кожусі печі 2. Теплова ізоляція печі виконується з ультралегковажної цегли 5 і засипкою із прожареного технічного глинозему 3, який має гарні теплоізоляційні властивості при високій температурі й при наявності водню в кожусі печі. Водень, володіючи великою теплоємністю й більшим коефіцієнтом дифузії, при наявності великих пор у тепловій ізоляції звичайно сильно збільшує її теплопровідність. Тільки дрібні пори глинозему й закриті пори ультралегковажної цегли дозволяють зберегти теплоізолюючі властивості в присутності водню. До кожуха печі примикають завантажувальний 6 і розвантажувальний 1 патрубкі. Розвантажувальний патрубок охолоджується водою й дозволяє знизити температуру виробів, що вивантажуються з печі. Вироби, що спікають, завантажуються в контейнери (човники) із графіту, які штовхачем 7 просуваються через піч.



1) розвантажувальний патрубок; 2) кожух; 3) засипка; 4) муфелі з нагрівачами; 5) теплоізоляція; 6) завантажувальний патрубок; 7) штовхач

Рисунок 4.23 – Муфельна двозонна еkleктична піч [2]

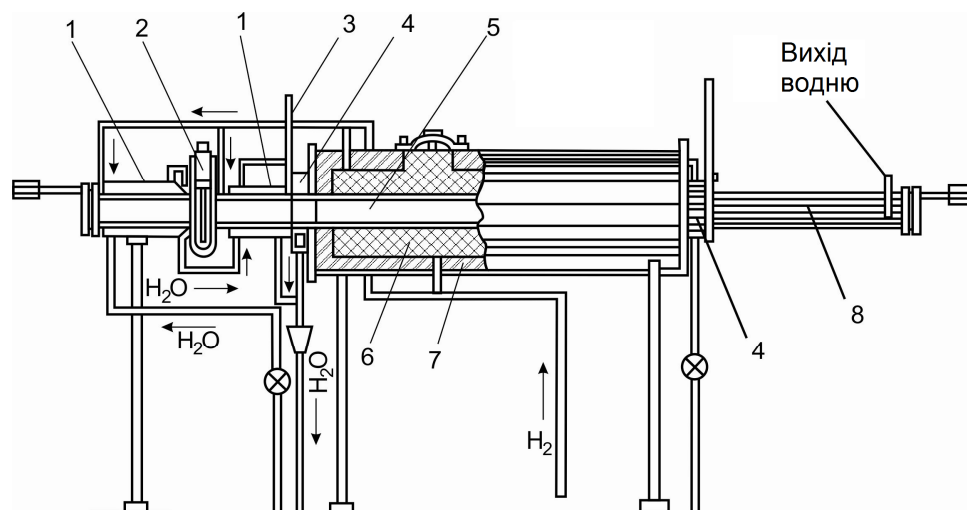
Водень, необхідний для процесу й для захисту молібдену від окиснення, подається виробам, що рухаються назустріч. Це дозволяє йому нагріватися від гарячих виробів до входу в гарячу

зону, а потім віддавати своє тепло назустріч холодним виробам, що рухаються. Цим здійснюється часткова рекуперація тепла. Випуск водню проводиться з боку завантаження. На виході з патрубка його підпалюють, щоб по факелу контролювати вступ водню в піч, і, що найголовніше, при його згоранні виключається можливість утворення вибухонебезпечної гримучої суміші в приміщенні.

Нагрівачі включаються в мережу через понижувальні трансформатори з напругою на низькій стороні 35...70 В. Живлення зниженою напругою, хоча й збільшує вартість установки, але зате дозволяє уникати міжвиткових замикань нагрівача й пробою на корпус. Електропровідність керамічного муфеля при високій температурі значно зростає. Живлення кожного муфеля проводиться самостійно, що дозволяє створювати потрібний температурний профіль печі. Температура по зонах підтримується автоматично за допомогою термопар. Тепловий к.к.д. печі досягає 45 %. Термін служби нагрівачів коливається від 3...4 місяців до року й більше. Термін служби залежить від якості кераміки, складання й умов експлуатації. Подібні конструкції печей застосовуються для водневого відновлення окислів молібдену, вольфраму та інших металів.

На рис. 4.24 показана трубчаста піч із графітовим нагрівачем, що дозволяє одержувати порошки карбідів вольфраму й титану при температурі до 2300 °С. Вони застосовуються й при виробництві литих карбідів металів при температурі до 3000 °С. Піч складається із зовнішнього металевого кожуха товщиною 3...5 мм, найчастіше круглого, діаметром 500...700 мм із торцевими кришками товщиною 10...20 мм. По осі горизонтально розташованого циліндричного кожуха проходить графітова нагрівальна труба, внутрішня порожнина якої є робочим простором печі. Через неї проходять графітові циліндричні човники, відкриті зверху, у яких перебуває шихта – суміш окисла з вуглецем. До труби за допомогою спеціальних контактних пристроїв підводить електричний струм низької напруги (10...20 В).

Часто печі працюють із захисною атмосферою (водень), що дозволяє збільшити термін служби нагрівача. Захисний газ подається з боку вивантаження виробів і рухається по трубі протитечією з виробами, що нагріваються. При виході із труби в місця завантаження водень підпалюється. Як і в молібденових печах, тут відбувається деяка рекуперація тепла. До графітової труби примикають завантажувальний і розвантажувальний патрубки, що закриваються з торців кришками. Розвантажувальний патрубок має водяне охолодження й подвійний затвор (шлюз), який робиться для того, щоб при вивантаженні човника повітря не потрапляло в піч і не прискорювало згорання графітової труби.



1) холодильник; 2) шлюз; 3) струмопідвідна шина; 4) контактні головки; 5) засипка; 7) теплоізоляція; 8) завантажувальний патрубков

Рисунок 4.24 – Трубчаста електрична піч із графітовими нагрівачами [2]

При конструюванні кожуха печі слід урахувувати, що він являє собою замкнений виток навколо провідника зі струмом (нагрівальної труби). Великий струм, що проходить по трубі, створює магнітний потік навколо труби й наводить вихрові струми в кожусі. Ці втрати можуть становити 10...20 % від за-

гальної витрати електроенергії й сильно розігрівати кожух печі. Зменшити цей вид втрат можна, виготовляючи кожух з немагнітної сталі.

При експлуатації печі відбувається часткове її вигорання. Доповнити сажу можна під час ремонту через металеві закриваючі люки на кожусі печі. Недоліком сажі є забруднення цеху при ремонті печей. Шари ізоляції, що примикають до кожуха, можуть виготовлятися з легкового вогнетриву, що скорочує обсяг використовуваної сажі. У деяких випадках навколо нагрівача встановлюється екранна труба із графіту. Це полегшує зміну нагрівача при ремонті й дозволяє не вивантажувати сажу. Малий термін служби екранної труби значно здорожує експлуатацію печі. Нагрівальна труба із внутрішнім діаметром 75...130 мм і довжиною 1...1,5 м виточується із графітованих електродів марки ЕГ-0 і ЕГ-1. Застосування графіту дозволило значно збільшити термін служби труб у порівнянні з вугільними завдяки великій механічній міцності графіту й меншій окисності на повітрі. Однак менший електричний опір графітових нагрівачів у порівнянні з вугільними приводить до необхідності працювати з меншою напругою, але з великим струмом. Це викликає збільшення електричних втрат у ланцюгу живлення, контактних пристроях і знижує електричний к.к.д. установки. Вугільні труби продовжують застосовувати лише в печах малого розміру.

У графітотрубчастих печах важко керувати розподілом температури по довжині печі. Місцева зміна товщини стінок труби впливає на розподіл температури. Термін служби графітових труб залежить від температури в печі, наявності захисної атмосфери, проведеного процесу й коливається від декількох днів до 2...3 місяців.

Живлення печі електричним струмом здійснюється від понижувального трансформатора з напругою 10...20 В на низькій стороні й 220...380 В на високій. Трансформатор доцільно розташовувати як можливо ближче до печі (під піччю). Температуру регулюють зміною напруги, яка підводиться до трансформатора,

для чого можуть бути використані автотрансформатори з відводами або регулятори напруги із плавним регулюванням напруги під навантаженням. Температуру в печі можна регулювати вручну й автоматично. Для контролю температури печі використовують оптичний пірометр, яким вимірюють температуру через спеціальне вікно зі склом у кришці розвантажувального патрубка печі. Для зручності виміру іноді усередині труби зверху зміцнюють графітову пластинку (маяк), на яку наводять пірометр.

Автоматичне регулювання здійснюють, підтримуючи постійною або потужність печі, або температуру. Зустрічаються певні труднощі у виборі датчика температури у зв'язку з високою температурою в печі й атмосферою, що містить окис вуглецю й вуглеводні.

При розрахунках розмірів муфельних і графітотрубчастих печей виходять із загальної продуктивності, розмірів човника, маси виробів і часу перебування виробів у печі.

#### 4.2.2 Індукційні каналні печі

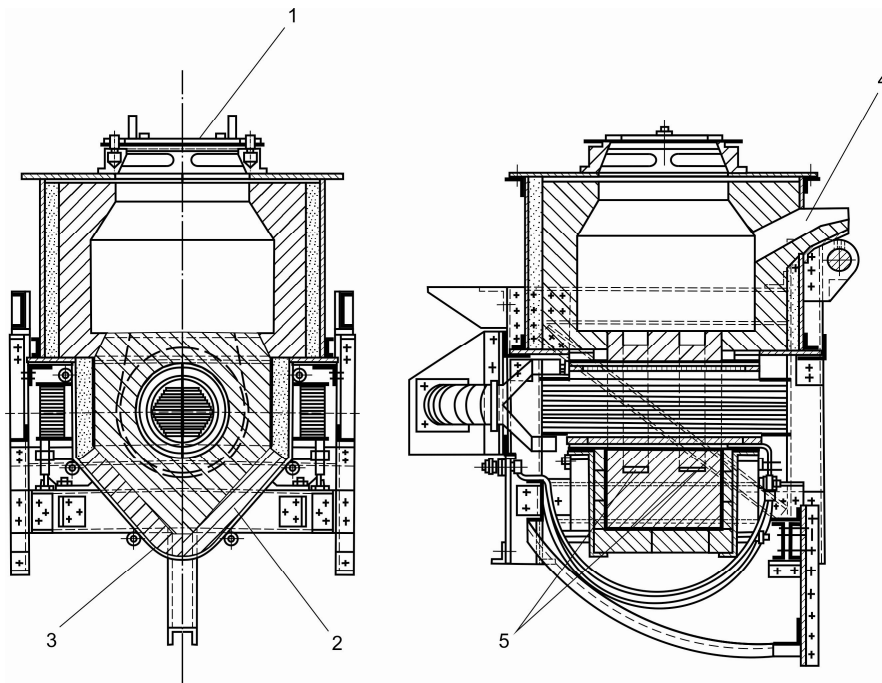
Індукційні каналні печі завдяки своїм високим техніко-економічним показникам знаходять усе більше застосування. Висока якість одержуваних металів і сплавів, малі їхні втрати від випару, більша продуктивність печей при малих витратах електроенергії вигідно відрізняють індукційні каналні печі від інших. Ці печі особливо ефективні при безперервній роботі на металі або сплаві одного складу.

Індукційні каналні печі використовуються для плавки різних кольорових металів (міді, нікелю, мідних і нікелевих сплавів, цинку, алюмінію і його сплавів). Залежно від призначення ці печі мають маркування в такий спосіб: ІЛК – для плавки сплавів на мідній основі, ІАК – для плавки сплавів на основі алюмінію й ІЦК – для плавки цинку. Печі виготовляються одно-, двох- і трифазними. У печах великої ємності широко використовують окре-



мі однофазні індукційні одиниці, що приєднують до загальної ванни печі. Це дозволяє уніфікувати їхнє виготовлення, легко замінити при виході з ладу й проводити ремонт індукційних одиниць окремо на стороні. Передбачається випуск печей ІАК ємністю 16 і 25 т, ІЦК ємністю 100 і ІЛК ємністю 40 і 100 т.

На рис. 4.25 показана широко розповсюджена індукційна однофазна піч для плавки латуні ємністю 0,6 т. Завантажується піч через верхній отвір 1, що закривається легкою металевою кришкою. Розлив металу проводиться через льотку при нахилі печі навколо осі. Циліндричну вертикальну шахту печі футерують звичайно вогнетривкою цеглою (магнезитовою) з теплоізоляційною засипкою.



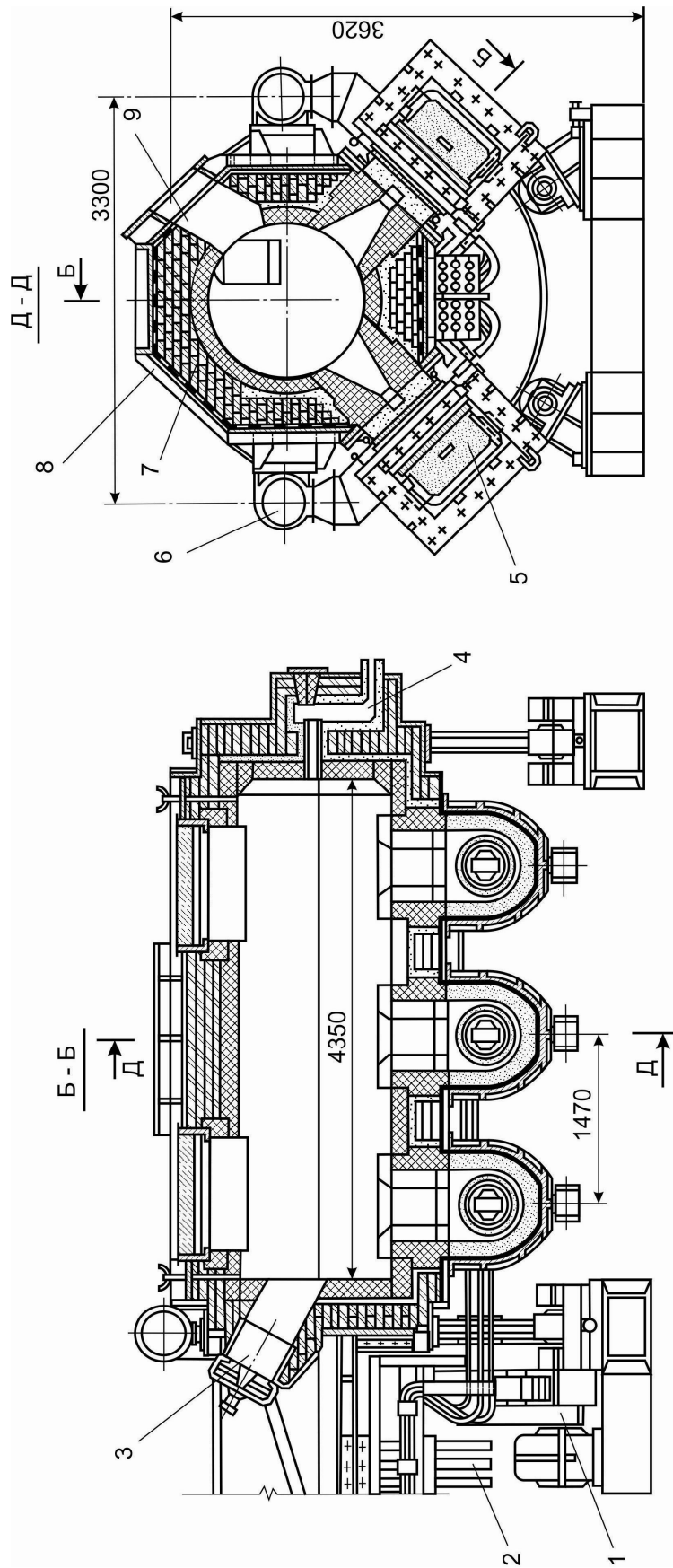
1) завантажувальний отвір; 2) подовий камінь; 3) металевий кожух; 4) зливальний носок; 5) канали

Рисунок 4.25 – індукційна піч із вертикальним закритим каналом для плавки латуні [2]

Черевий камінь 2 з індукційним пристроєм зміцнюють знизу печі, часто в зібраному виді. Для футерівки черевного ка-

меню застосовують звичайно набивні маси. При плавці латуні й бронзи використовується кварцитома маса, що містить 96 % дробленого кварцу (< 2 мм), 2 % бури в порошок й 0,5 % глини. Компоненти шихти ретельно перемішуються й у сухому виді використовуються для футерівки. При плавці нікелевих сплавів футерівка складається з 96,5 % плавленого магнезиту, 3 % бури в порошок. Череневий камінь має металевий литий кожух 3, що складається із двох частин, з'єднаних між собою за допомогою електроізоляційних прокладок і втулок, щоб уникнути утворення навколо сердечника замкненого електричного контуру. У футерівці зроблено два паралельні канали 5, загальна площа перетину яких визначається розрахунками. Пристрій двох каналів дозволяє зменшити магнітний потік розсіювання й збільшити природній  $\cos\varphi$  печі.

Для переплавлення катодної міді у вайєрбарси використовується установка, що складається з індукційної каналної печі ємністю 16 т (ІЛК-16), індукційного каналного міксера, ємністю 2,5 т (ІЛКМ-2,5), закритої жолоба, що обігривається, і машини безперервного лиття. Продуктивність агрегату 5,5 т/година безкисневих вайєрбарсів. На рис. 4.26 показані поздовжній і поперечний розрізи індукційної печі ІЛК-16. Піч має шість індукційних одиниць, розташованих у два ряди по три штуки в ряд. Плавка проводиться під шаром деревного вугілля товщиною 300...400 мм, що забезпечує зниження концентрації кисню в міді, більшу її електропровідність і пластичність. Піч має металевий кожух, азбестову ізоляцію, шар теплоізоляційної цегли й футерівку високоглиноземистою цеглою. Загальна товщина футерівки стін 440 мм. Піч може повертатися в ту або іншу сторону на 50°. Знімна індукційна одиниця має потужність 256 кВт при напрузі 500 В. Подовий камінь футерують високоглиноземистою набивною масою. Круглий канал перетином 120x30 мм утворюється в період набивання за допомогою дерев'яного шаблону, який потім випалюється.



1) механізм повороту; 2) струмопідвід; 3) вікно для завантаження вугілля; 4) зливальна льотка; 5) індукційна одиниця; 6) система повітряохолодження; 7) футерівка; 8) кожух; 9) отвір для завантаження мідних катодів

Ринок 4.26 — Індукційна піч ЛІК-16 [2]

Сушіння триває 7...10 днів у вакуумі при 100 °С, а потім протягом 1 місяця за допомогою ніхромових нагрівачів при температурі 200...300 °С.

Перед встановленням на місце футерівку нагрівають газовою горілкою до 1200 °С. Термін служби футерівки індукційної одиниці не менш 4...6 місяців, футерівки ванни близько 5 років. Зміна індукційних одиниць здійснюється без зупинки печі.

За допомогою мостового крана розігріту запасну індукційну одиницю встановлюють за 3...4 год. Піч завантажують катодними листами, що забезпечує безперервний злив металу через жолоб, що обігрівається силітовими стрижнями, у міксер ємністю 2,5 т. Міксер має одну аналогічну індукційну одиницю потужністю 157 кВт при напрузі 250 В. Рівень металу в міксері підтримується автоматично впливом на привід завантажувальної машини, яка припиняє або відновляє завантаження катодних листів у плавильну піч.

Індукційні каналні печі знайшли застосування для плавки алюмінію і його сплавів. Вони забезпечують менше газонасичення металу й втрати від окиснення. Однак при плавці алюмінію відбувається поступове заростання каналу більш важким і неелектропровідним окислом алюмінію, що викликає порушення електричного режиму роботи печі.

На рис. 4.27 показана однофазна індукційна канална піч для алюмінію ємністю 0,5 т. Особливістю конструкції такої печі є прямокутна форма каналу на відміну від круглого каналу в печах ІЛК і збільшений його перетину. При розрахунках рекомендується щільність струму в каналі брати менш 5 А/мм<sup>2</sup>. У нижній частині каналу є отвір, закритий керамічною пробкою. Через цей отвір періодично канал очищають від окислів, що нагромадились. Мала щільність струму в каналі, висока ванна металу над каналом зменшують перемішування алюмінію й можливість влучення окислів у канал. Подовий камінь футерують шамотно-кварцитовим набиванням або жароміцним бетоном. При цьому футерівка витримує до 3000 плавок.

У печах великої ємності використовують знімні індукційні одиниці, як і в печах ІЛК. Ємність таких печей досягає 40 т. Стандартні індукційні одиниці розраховано на потужність 400 кВт. Для перетоплення листів катодного цинку в чушки використовуються печі великої ємності (до 100 т).

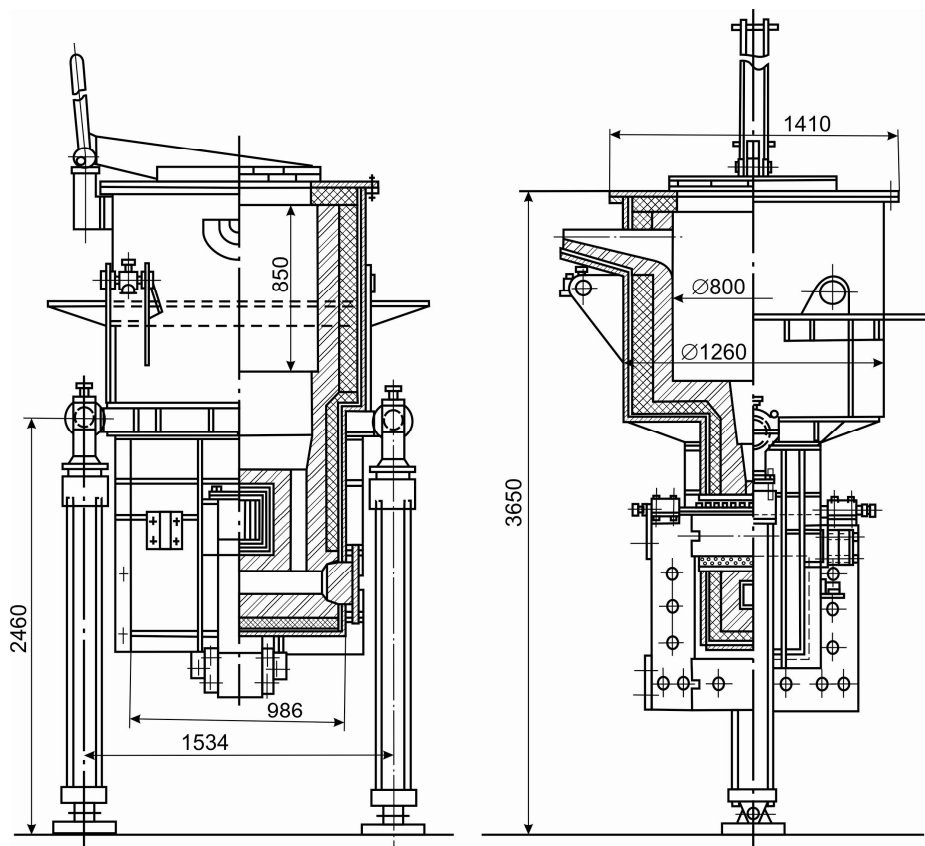
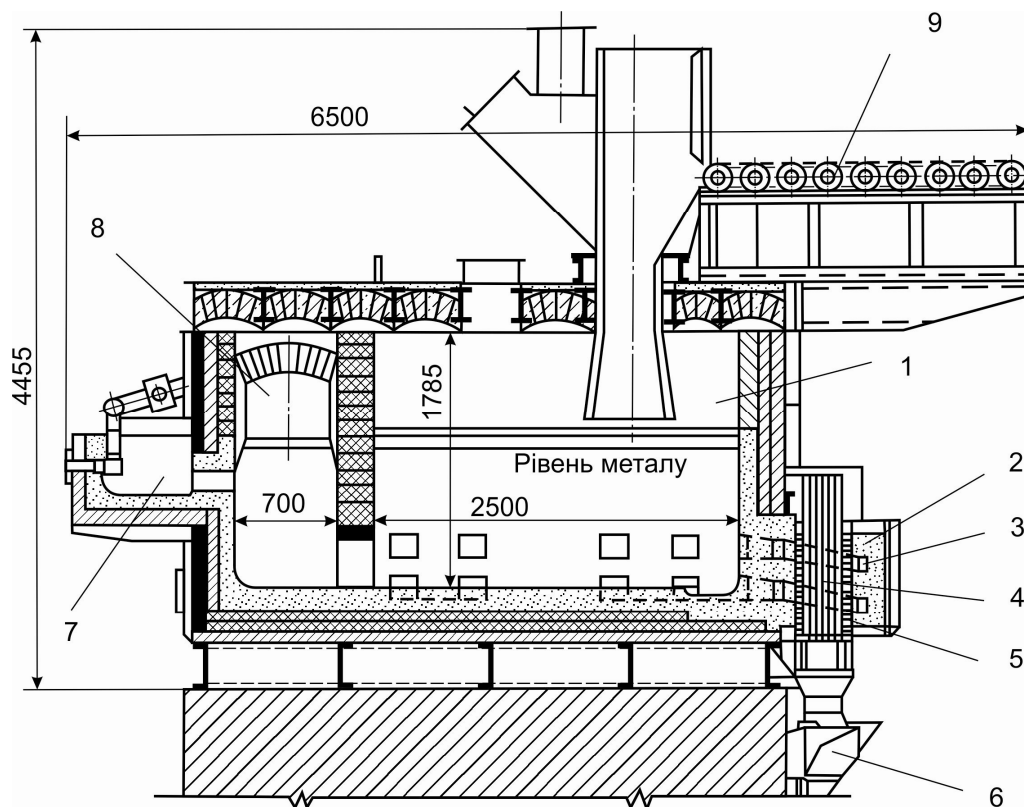


Рисунок 4.27 – Однофазна індукційна канална піч для плавки алюмінію [2]

На рисунку 4.28 показано піч для плавлення листів катодного цинку ємністю 40 т (ІЦК-40). Піч має плавильну й роздавальну камери, розміщені в одному металевому кожусі. По периметру кожуха розташовані 6 індукційних одиниць із горизонтальними каналами. На відміну від попередніх печей котушка індуктора виконана не із трубки з водяним охолодженням, а з мідної шини. Індуктор і футерівка каналу охолоджуються повітрям від венти-

лятора. Завантаження пакетів листів катодного цинку здійснюється спеціальним механізмом через отвір у склепінні печі. Розлив цинку проводиться з роздавальної камери.



1) плавильна камера; 2) індукційна нагрівальна система; 3) канал; 4) магнітопровід; 5) багатовитковий індуктор; 6) вентилятор; 7) роздавальний пристрій; 8) роздавальна камера; 9) рольганг

Рисунок 4.28 – Піч для плавлення катодного цинку [2]

У таблиці 4.5 наведено тепловий баланс індукційної каналної печі ємністю 0,6 т при плавці латуні протягом 1,1 години. Тепловий к.к.д. при цьому становить 82,6 %.

При плавці алюмінію в однофазній печі описаної конструкції тепловий к.к.д. становить близько 60 %, а при плавці цинку – близько 84 %. Питома витрата електроенергії при плавці

алюмінію 450...475, латуні 200, цинку 100 кВт·година/т, на перегрів міді в міксері від 1100 до 1200 °С 40 кВт·година/т.

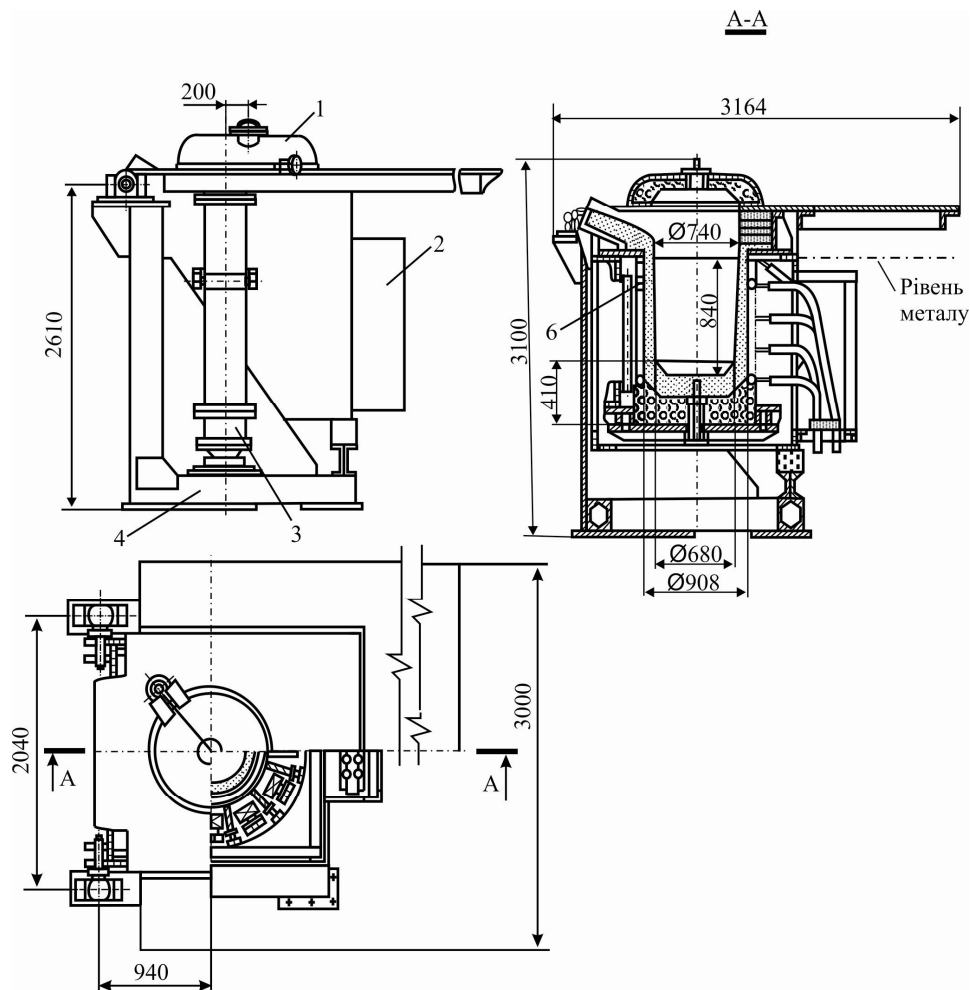
Таблиця 4.5 – Тепловий баланс індукційної печі ІЛО-0,6

Стаття балансу		МДж	%
Прихід тепла	Трансформація електричної енергії	419,9	88,7
	Згорання цинку	18,4	3,9
	Згорання вугілля	19,9	4,1
	Згорання органічних речовин і фосфору	15,5	3,3
	Усього	473,7	100,0
Витрата тепла	Нагрівання шихти	250,4	52,8
	Плавлення	97,6	20,6
	Перегрів металу	43,5	9,2
	Втрати тепла стінками печі й завантажувальним вікном	26,8	5,7
	Втрати тепла з повітрям охолоджуючим коутушку	31,2	6,5
	Втрати тепла з летучими речовинами	7,5	1,6
	Втрати тепла із жужелем	5,0	1,1
	Невраховані втрати	11,7	2,5
	Усього	473,3	100,0

#### 4.2.3 Індукційні тигельні печі

Масштаби використання тигельних індукційних печей у кольоровій металургії безупинно ростуть. Якщо спочатку це були печі ємністю кілька десятків і сотень кілограмів, що працюють на високій і середній частотах, то тепер виготовляють тигельні печі ємністю до 25 т. Згідно із прийнятою класифікацією серія печей ІАТ призначена для плавки алюмінію і його сплавів, ІЛТ – для плавки латуні й інших мідних сплавів, ІГТ – для плавки магнію, ІМВ – для плавки міді у вакуумі, ІСВ – для плавки сталі й нікелевих сплавів у вакуумі.

На рис. 4.29 показана схема печі для плавки латуні ємністю 2,5 т, що працює на промисловій частоті.



1) кришка; 2) кожух виводів; 3) плунжер; 4) рама; 5) підшипник; б) індуктор

Рисунок 4.29 – Тигельна індукційна піч для плавки латуні [2]

Піч має водоохолоджувальний індуктор з профільованої мідної трубки. Витки ізолювані один від одного склотканиною із просоченням кремнійорганічним лаком і наступним його спіканням. Тигель усередині футерують високоглиноземистою або кварцовою набивними масами. Офутерований індуктор може вийматися з каркаса печі, що дозволяє забезпечити його швидку



заміну. Термін служби футерівки більш 2000 плавок. Контроль над станом футерівки виконують спеціальним пристроєм, вмонтованим у дно футерівки тигля, що вимірює її електроопір. При проникненні металу у футерівку зменшується її електроопір і подається відповідний сигнал. Для зменшення магнітного потоку розсіювання індуктори по периметру оточені пакетами шихтованих магнітопроводів. Для розливу металу піч нахиляють плунжерними гідравлічними механізмами, що живляться від автономних оливонапірних установок. Електроживлення печі здійснюється через східчастий однофазний трансформатор.

Особливістю плавки в індукційних тигельних печах є інтенсивне перемішування металу, викликане дією електродинамічних сил. Одночасно спостерігається утворення меніска на поверхні металу. Будучи позитивними до певного значення, ці ефекти при надмірному їхньому прояві сприяють підвищенню окиснення й газопоглинання металу. Для усунення цих недоліків обмежують питому потужність печей і індуктор роблять лише на 70 % висоти металу в тиглі. На 30 % висоти розмішують холодні водоохолоджувальні витки для створення однакових теплових умов роботи футерівки.

Розрахунки показують, що електродинамічні ефекти зменшуються з підвищенням частоти живильного індуктору змінного струму. Частота 150 Гц може бути отримана з використанням статичного перетворювача частоти, при цьому питома потужність печей зростає в 1,73 рази без погіршення умов плавки. При високому к.к.д. зазначених перетворювачів (~95 %) таким шляхом можна досягти інтенсифікації роботи тигельних індукційних печей.

Тигельні індукційні печі ємністю 6 т успішно застосовуються при плавленні вторинного алюмінію й алюмінієвих сплавів. Це дозволило значно знизити випар металу в порівнянні з відбивними печами, одержувати метал кращої якості. Печі для плавлення алюмінію футерують також високоглиноземистою набивною масою або вогнетривким бетоном на рідкому склі, що

забезпечують стійкість більш 7000 плавок. Ведуться роботи зі створення печей ємністю 16 і 25 т.

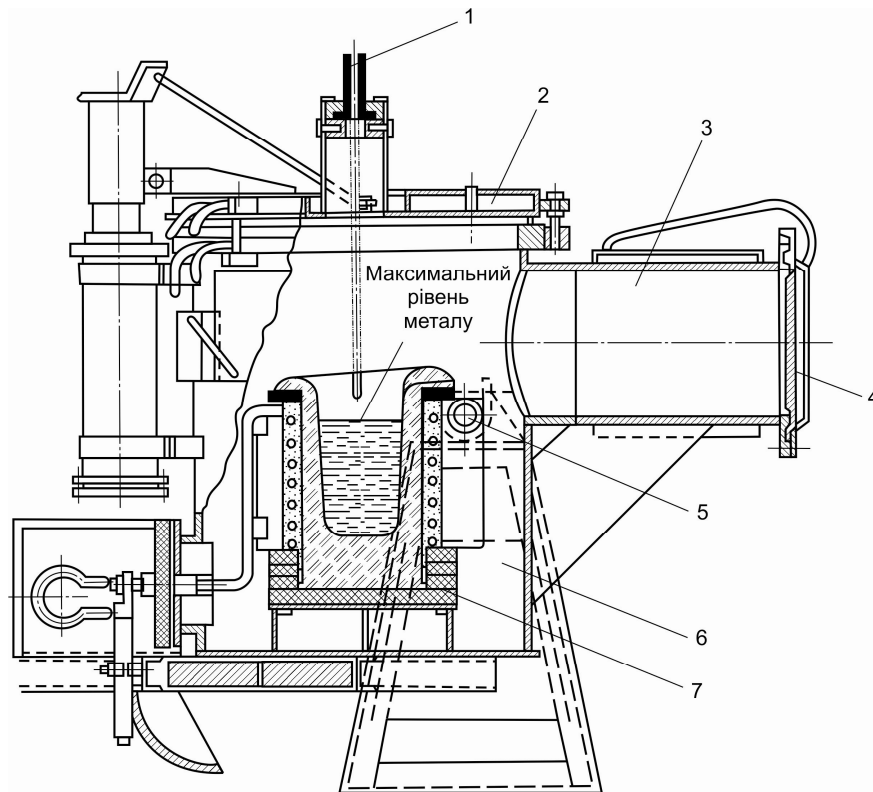
Питома витрата електроенергії в тигельних індукційних печах при плавленні металів становить: для алюмінію 550...700, для латуні 350...380, для магнію 400 кВт·година/т. Коефіцієнт потужності печей без компенсації 0,1...0,17.

Для підвищення електричного к.к.д. тигельних печей при плавленні кольорових металів з гарною електропровідністю доцільно застосовувати тигель із менш електропровідного матеріалу. У зв'язку із цим при плавленні міді в невеликих печах використовуються графітові тиглі. При плавленні магнію знайшли застосування сталеві тиглі з товщиною стінок 15...50 мм. Залежно від товщини стінки і її температури змінюється співвідношення потужностей, які виділяються у тиглі й у шихті: зі збільшенням товщини стінки й зменшенням її температури зменшується частка потужності, що виділяється в шихті. Так, при температурі стінки 900 °С і товщині 15 мм у шихті виділяється близько 70 %, а при товщині 50 мм і при тій же температурі – усього близько 30 % усієї потужності. Між тиглем і індуктором робиться теплова ізоляція з азбесту й магнезитової засипки.

Для одержання високоякісних металів і виливків з малим вмістом газів застосовують вакуумні індукційні тигельні печі, у яких плавлення, розлив й охолодження виливка ведуться у вакуумі або в атмосфері захисного газу.

На рис. 4.30 показана конструкція широко використовуваної вакуумної індукційної печі потужністю 60...100 кВт. Індуктор і тигель печі 7 перебувають усередині герметичного кожуха 6, що закривається кришкою 2. Внаслідок великого потоку розсіювання навколо індуктора кожух і кришку роблять із немагнітної сталі або кольорового металу; крім того, кришка й окремі частини кожуха печі охолоджуються водою. При розливі металу кожух нахиляють навколо осі 5, і метал потрапляє у виливницю, розташовану в патрубку 3, який закривається кришкою 4. Для спостереження за плавкою в кришці є оглядове вікно. Через пат-

рубок 1 може бути вставлена термопара. Вакуум створюється обертовим масляним вакуумним насосом. Відсмоктування проводиться через патрубок 5, сполучений з віссю обертання печі. Електроживлення печі здійснюється від машинного генератора змінного струму.

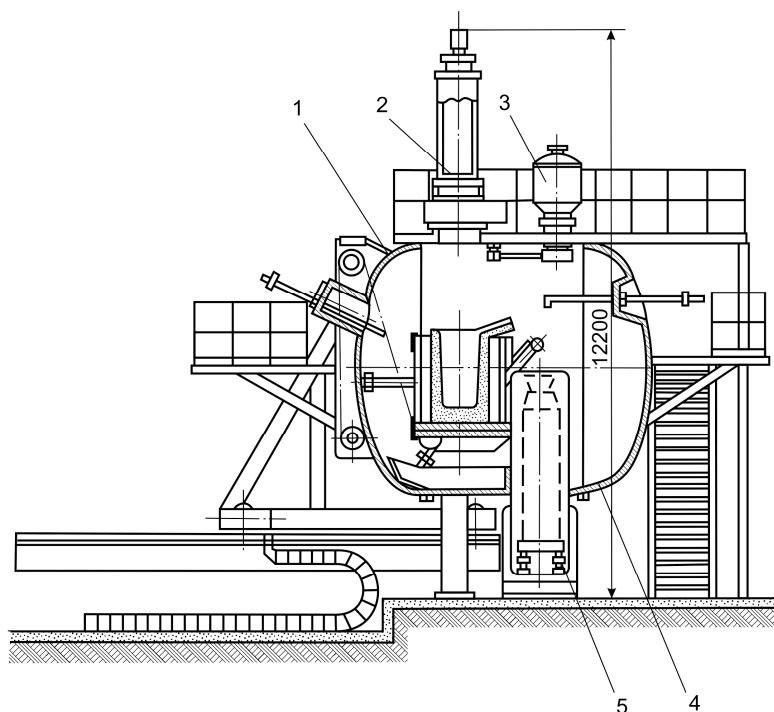


- 1) патрубок оглядового вікна; 2) кришка кожуха; 3) патрубок з виливницею; 4) кришка патрубка; 5) вісь нахилу; 6) кожух; 7) тигель

Рисунок 4.30 – Вакуумна індукційна піч [2]

Для виплавки сплавів на нікелевій основі у вакуумі створені вакуумні індукційні печі напівнеперервної дії ємністю 1,0 і 2,5 т (ІСВ-1,0-НІ й ІСВ-2,5-НІ), що працюють на частоті 1100 Гц від машинних генераторів потужністю 1000 і 1500 кВт. Розріз печі ІСВ-2,5-НІ наведено на рис. 4.31. Камера печі являє собою горизонтально розташовану вакуумну посудину з торцевою криш-

кою, що відкочується, на якій змонтований плавильний тигель із індуктором. Вакуумна система з механічного насоса дозволяє одержувати розрідження в печі 0,1 Па. Передбачена можливість нахилу печі й зливу металу у виливницю. Запас виливниць зберігається в бічній камері, що представляє собою шлюзовий пристрій, через який виливниці можуть віддалятися із плавильної камери без порушення вакууму. Із цією метою влаштовані вакуумні технологічні затвори з розміром прохідного отвору 1000x3300 мм.



1) частина плавильної камери, що відкочується; 2) камера завантаження; 3) дозатор; 4) нерухлива частина плавильної камери; 5) візок виливниці

Рисунок 4.31 – Вакуумна індукційна піч ІСВ-2.5-НІ [2]

Для введення шихти в тигель використовується шлюзова камера 2. Завантаження здійснюється за допомогою кошика із дном, що відпадає. Для введення легуючих елементів використовується дозатор, що має вісім секцій ємністю по 12 л кожна. Та-

ким чином, завантаження елементів шихти, що легують, подача виливниць і їх видалення, а також відбір проб і вимір температури металу здійснюються без порушення вакууму в плавильній камері й тим самим забезпечується напівнеперервний режим роботи печі із зупинкою лише для ремонту футерівки тигля.

Для плавлення малої кількості металу використовується серія високочастотних індукційних печей (ВЧІ) з ємністю тигля від 0,1 до 25 кг металу. Електроживлення печей здійснюється від лампового генератора із частотою  $440 \cdot 10^3$  і  $66 \cdot 10^3$  Гц. Для нахилу печі використовується ручна лебідка. Печі такого типу часто мають графітовий тигель із тепловою ізоляцією. Вони використовуються з успіхом для плавлення благородних металів, а також у лабораторних експериментах.

Енергетична характеристика індукційних печей визначається тепловим і електричним к.к.д., втратами в конденсаторній батареї й струмопідвідних шинах, а також у перетворювачах частоти струму або в трансформаторі при використанні промислової частоти. Тепловий к.к.д. залежить від ємності печі, зростаючи з її збільшенням, і відповідає звичайно 0,7...0,9. Електричний к.к.д. сильно залежить від металу, що розплавляється (його електроопору). Втрати в конденсаторній батареї й струмопідвідних шинах становлять часто 2...3 і 1...1,5 % відповідно.

#### 4.2.4 Дугові руднотермічні печі

Дугові електричні печі, які використовують для плавки руд і концентратів на штейн і метал, одержали назву руднотермічних дугових печей. Завдяки роботам вітчизняних і закордонних металургів руднотермічні печі з успіхом застосовуються в мідно-нікелевій промисловості, при плавці олов'яних концентратів, у виробництві титану, при одержанні силікоалюмінію й ряду інших процесів. Найголовнішими перевагами руднотермічних печей у порівнянні з відбивними є:

1) значно менша витрата флюсів для одержання рідких жужелів (внаслідок більш високої температури в зоні плавлення шихти); це сприяє підвищенню добування металу й економічності плавки;

2) досить незначні втрати тепла з газами, що відходять, завдяки їхній невеликій кількості й низькій температурі;

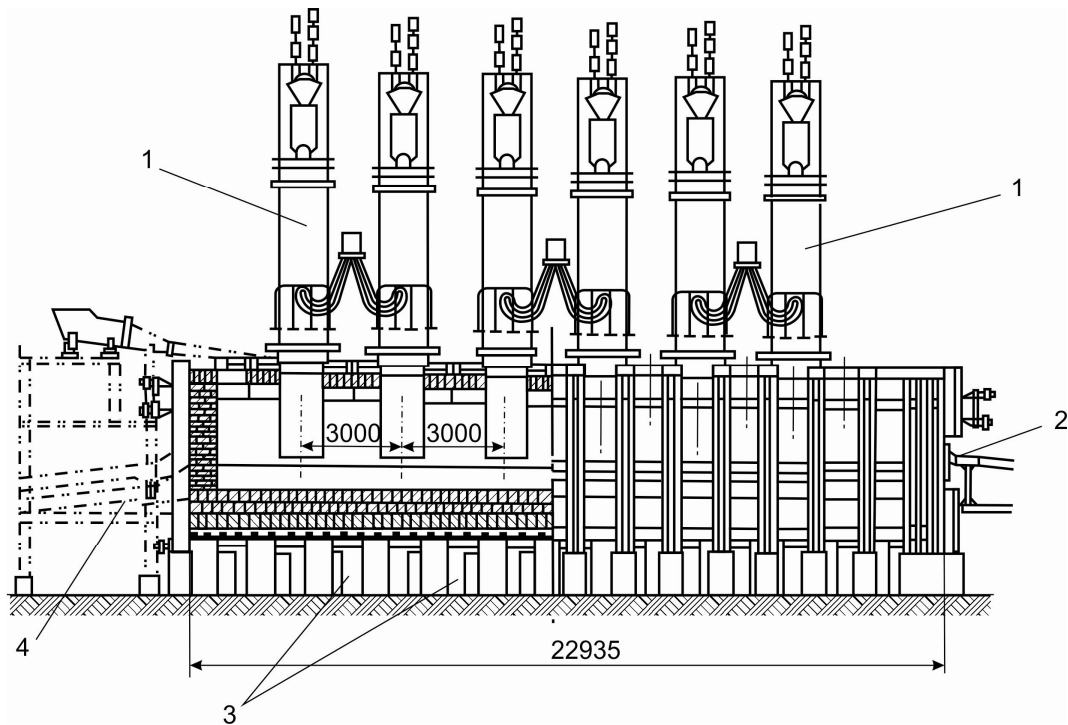
3) висока концентрація  $SO_2$  у газах і можливість його використання;

4) можливість механізації й автоматизації обслуговування.

Руднотермічні печі є дуговими печами змішаного дії. Вони мають електроди, занурені в шихту й жужелі. Тому в них, крім нагрівання дугою, основна частина тепла виділяється при проходженні струму між електродами через шихту, що містить вуглець, і розплавлені жужелі. Залежно від умов плавки частки дугового нагрівання й нагрівання опором можуть змінюватися. Відмінними рисами руднотермічних печей є робота при високій напрузі (до 1000 В) і велика потужність, що досягає 48 МВ·А і більше.

Руднотермічна піч має один, два, три й шість електродів, що найчастіше самоспівливих. Їхній діаметр коливається від 0,8 до 1,4 м. Живлення проводиться від одно- і трифазних трансформаторів. При шести електродах використовуються три однофазні трансформатори, що живлять кожні два електроди. Це дозволяє зменшити реактивний опір короткої мережі. На рис. 4.32 наведений поздовжній розріз шестиелектродної руднотермічної печі для плавки сульфідних мідно-нікелевих концентратів. Піч має в плані прямокутну форму. Ширина печі досягає 8,7 м. Шість електродів 1 розташовані уздовж поздовжньої осі печі. Фундамент печі залізобетонний у вигляді окремих стовпів 3, на які покладені балки й сталеві плити, що підтримують черинь печі. Черинь має товщину 900...1200 мм і складається з декількох рядів магнезитової цегли, яка викладена зворотними зводами на вогнетривкій підсипці або бетонній підставі. Стіни печі викладаються в нижній частині (до рівня ванни) з магнезитової або хромомаг-

незитової цегли, а у верхній частині (вище рівня ванни) – із шамотної цегли.



1) електроди; 2) льотка для жужелів; 3) фундамент; 4) льотка для штейну

Рисунок 4.32 – Дугова шестиелектродна піч для руднотермічних процесів [2]

Так як найбільш висока температура створюється усередині шихти, то температура в печі над шихтою невисока, і склепіння може бути викладене із шамотної цегли. Завантаження печі бічне через склепіння. Штейн випускають через льотку 4 у торцевій частині печі, жужелі – через льотку 2 у протилежному торці. Піч працює в безперервному режимі з періодичним випуском жужелів і штейну.

Для вугільних і самоспівливих електродів великого діаметра застосовується щоківий електродотримач із додатковим пристроєм для перепуску електродів (рис. 4.33, 4.34).

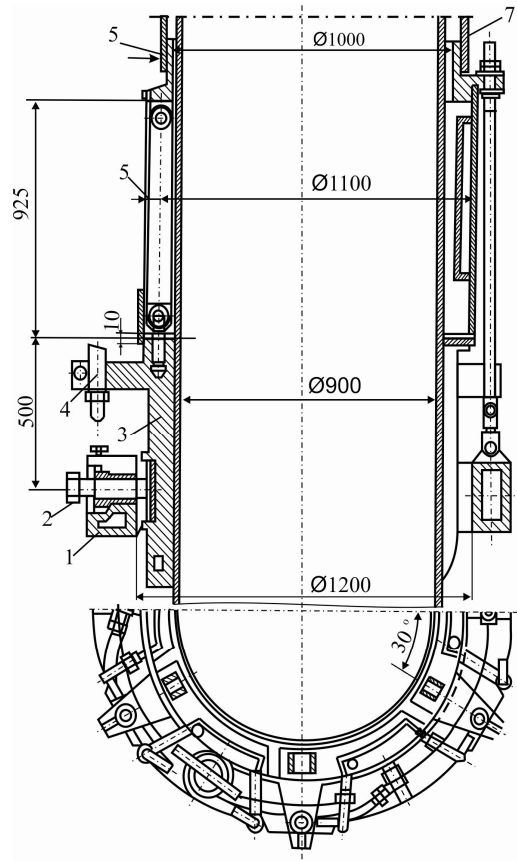


Рисунок 4.33 – Щоковий електродотримач (пояснення в тексті) [2]

Нижня частина електродотримача складається з декількох щік 3, виготовлених із хромистої бронзи, що щільно притискаються до електрода за допомогою суцільного кільця 1 і натискних гвинтів 2 або гідравлічних сильфонних затискачів. Щоки й кільце підвішено до циліндра 7 на підвісках 6 і охолоджуються водою. Струм і вода до щік підводять мідними трубами 4. Сталевий циліндр товщиною 5...10 мм щільно скріплений з рамою зі швелерів, розташованої у верхній частині електродотримача. За цю раму вся конструкція разом з електродом підвішується на тросах або ланцюгах 8 до лебідки перепускного пристрою (рис. 4.34).



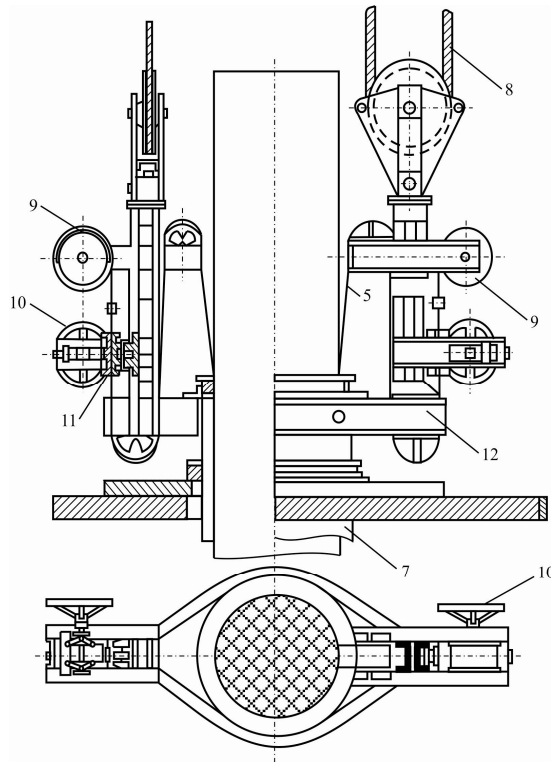


Рисунок 4.34 – Перепускний пристрій (пояснення в тексті)

[2]

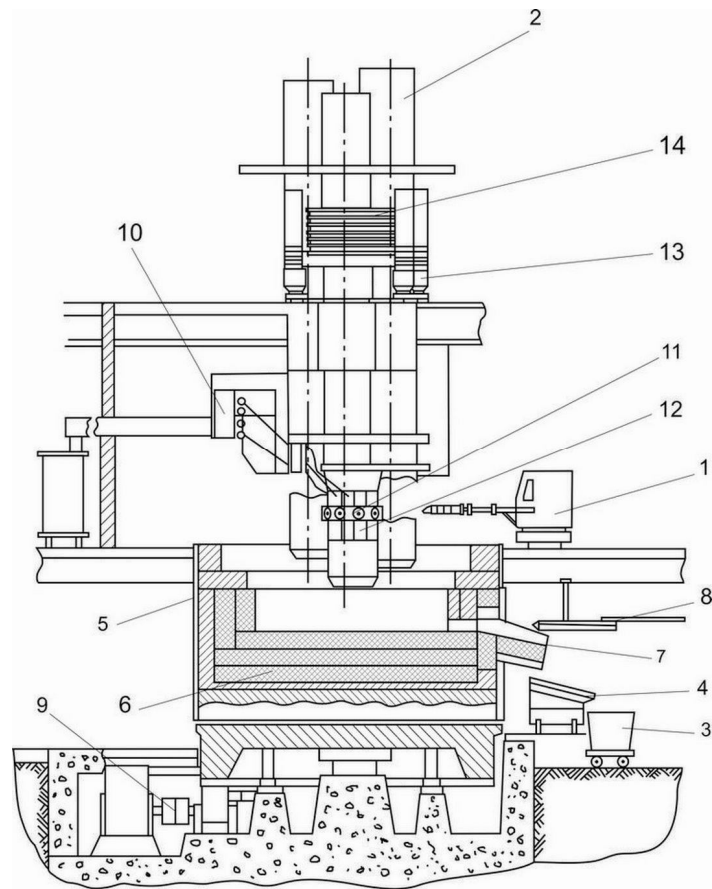
Підвіска й переміщення можуть здійснюватися також і за допомогою трьох гідравлічних плунжерів. Для перепуску само-спікливих електродів використовуються дві сталеві стрічки 5, що приварюються діаметрально до кожуха електрода. Стрічки намотано на барабани 9 і проходять через гальмові пристрої 11, ступінь затиснення яких регулюється маховичками 10. При перепуску зменшують притиск шік до електроду, і під дією власної ваги електрод опускається вниз на сталевих стрічках на деяку глибину. Перепуск звичайно роблять, не вимикаючи піч від мережі, знижуючи лише у два рази силу струму. При цьому слід дотримуватися правил техніки безпеки. У варіанті гідравлічного затискача замість стрічок використовуються затискні щоки, обклеєні гумою, що дозволяє на терті перепускати електрод. Термін служби тримачів з водяним охолодженням становить кілька років.

Для герметизації склепіння в місцях проходу електродів встановлюють чепцеві ущільнення з пісково-азбестовим набиванням.

У деяких випадках руднотермічні печі роблять круглими, що має свої переваги. В них легше добитися герметичності склепіння, потужність, що виділяється в шихті, рівномірно розподіляється по всій ванні, можливе обертання печі. У вітчизняній практиці для виплавки титанових жужелів застосовуються циліндричні триелектродні руднотермічні печі відкритого й закритого типу потужністю від 5 до 14 МВ·А (рис 4.35). Піч має досить високу питому (об'ємну) потужність, що дозволяє здійснювати швидкий прогрів шихти до температури близько 900...1200 °С без помітного її проплавлення, а також забезпечувати підтримку в рідкоплинному стані тугоплавких жужелів на кінцевій стадії процесу.

Днище печі заливають жаротривким залізобетоном таким чином, щоб одержати черень зі зворотним склепінням. У тілі залізобетону розміщуються труби для охолодження череню. На залізобетонну подушку засипають шамотний порошок, а на нього насухо на торець укладають кілька рядів магнезитової цегли. Стінки ванни також викладені магнезитовою цеглою, а між кожухом і бічною футерівкою засипають шар шамотного порошку. У зоні розплаву стінки ванни мають найбільшу товщину. Магнезитові цегли укладаються дуже ретельно, з мінімальними зазорами.

У кладці стінки ванни й череню розміщуються термопари, показання яких безупинно контролюються. При нормальній роботі печі й належному стані футерівки й гарнісажу температура череня звичайно не перевищує 800 °С, а бічної футерівки 500 °С. Льотка для випуску металевого напівпродукту й жужелів розташовується на висоті близько 2,3 м від днища кожуха. Піч встановлюють на стрічковому фундаменті висотою близько 1 м. Це забезпечує гарну аерацію череня й доступ для контролю її стану. Піч оснащена графітованими електродами.



1) машина обробки колошника; 2) електроди; 3) ківш; 4) похилий жолоб; 5) кожух печі; 6) кладка печі; 7) лютка; 8) апарат пропалювання; 9) механізм обертання печі; 10) пакет мідних шин; 11) електродотримач; 12) контактні щоки; 13) гідропідйомник; 14) механізм перепуску електродів

Рисунок 4.35 – Триелектродна руднотермічна піч [7]

У печі є три графітованих електрода діаметром 610 або 710 мм. Електроди втримуються в потрібному положенні за допомогою електродотримача. Водоохолоджувальне кільце електродотримача складається із двох половин, забезпечених спеціальними пружинними або сифонними натискними пристроями. Електродотримачі підвішені на ланцюгах, які виведені на лебідки, що забезпечують їхній підйом і опускання. Лебідки обладнані кінцевими обмежниками, що лімітують максимальне верхнє й нижнє положення електродів. Положення електродів у процесі

плавки регулюється автоматично відповідно до заданого режиму, а якщо буде потреба за допомогою ручного керування.

У міру витрати графітованих електродів необхідно робити їхній перепуск (змінювати положення струмопідвідних щік) і нарощування. Перепуск, як правило, роблять на 300...500 мм протягом плавки після того, як витрачено близько 70...80 % необхідної на процес електроенергії. Піч при цьому вимикають. Електроди нарощують за допомогою нарізного сполучення, яке ущільнюється графітовою пастою. Цю операцію виконують із використанням спеціального пристосування після випуску розплаву з печі.

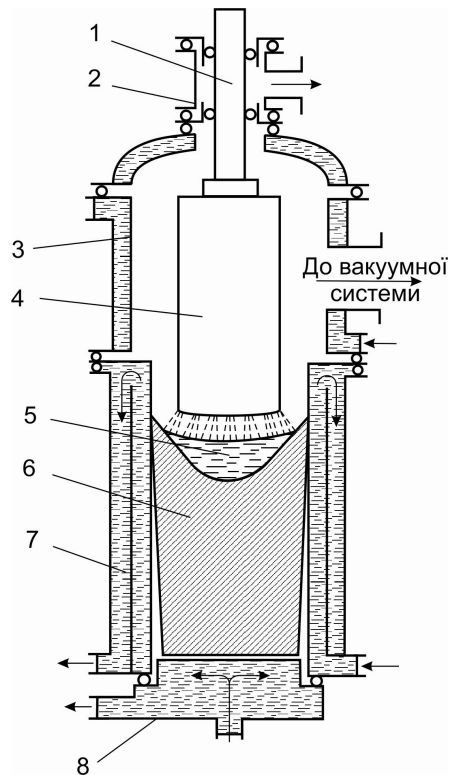
Щільність струму в графітованих електродах становить до  $12 \text{ A/cm}^2$ , питомий електроопір 11...13 мкОм·м, пористість 23...24 %.

#### 4.2.5 Дугові вакуумні печі

Для плавлення тугоплавких реакційно-активних металів (титан, молібден, вольфрам, цирконій, гафній, ванадій, берилій і ін.) і сплавів на їхній основі найбільш підходящою піччю є дугова вакуумна піч (ДВП), що забезпечує високу температуру й додаткове очищення металу від летучих домішок і газів. Одержуваний чистий метал має кращі експлуатаційні властивості. За два з невеликим десятиліття з початку застосування ДВП досягнуті значні успіхи у вивченні теорії роботи цих печей і їх конструюванні. Спочатку одержували злитки в кілька кілограмів, у цей час одержують злитки круглої й прямокутної форми масою до 40 т і фасонні виливки масою до 600 кг.

Схема ДВП із електродом, що витрачається показана на рис. 4.36. Електричний струм до електрода підводить за допомогою електродотримача й струмопідвідного штока 1. Шток проходить через вакуумне ущільнення 2 у верхній частині робочої ка-

мери 3 і з'єднується з електродом, що витрачається, 4 з металу, що зазнає плавлення.



1) шток; 2) вакуумне ущільнення; 3) робоча камера; 4) електрод; 5) ванна рідкого металу; 6) злиток; 7) кристалізатор; 8) охолоджуваний піддон

Рисунок 4.36 – Схема ДВП із електродом, що витрачається [2]

Особливістю конструкції ДВП є використання найчастіше водоохолоджувального кристалізатору 7 з міді, бронзи або стали, у якому формується злиток 6 після перетоплення. На верхньому торці злитка під електродом перебуває ванна рідкого металу 5. На стінках кристалізатору швидко утворюється твердий шар металу, гарнісаж. Наявність гарнісажу охороняє розплав від забруднення матеріалом стінок кристалізатору. Злиток починає формуватися на водоохолоджувальному піддоні 8. Перші краплі металу з електрода швидко твердіють і тільки на деякій висоті, коли вплив охолодження піддона зменшується, на злитку утво-

рюється рідка ванна. Отриманий злиток може безупинно опускати, при цьому ванна металу буде увесь час залишатися на одній висоті.

Інший метод плавки називають плавкою в глухому кристалізаторі. При цьому піддон залишається на місці, а висота злитка увесь час збільшується. У цьому випадку не потрібно механізму для витягування злитка. Плавка у ДВП проводиться на постійному струмі. Це усуває пульсацію горіння дуги змінного струму. Катодом служить електрод, анодом – злиток металу й кристалізатор. Висока температура в міжелектродному просторі приводить до випару металу. Рівноважний тиск його парів значно вище тиску залишкових газів (в  $10^2 \dots 10^3$  раз). Напруга первинної іонізації пару металу менше (близько 8 В), ніж атомів водню, кисню, азоту (близько 14 В) і особливо інертних газів – аргону (15,7 В), гелію (24,5 В). Тому дуга у вакуумі горить у парах металу. Тиск парів металу значно менше в бічних більш холодних поверхнях електрода. Це приводить до того, що горіння дуги локалізоване в міжелектродному просторі. Перехід дуги на стінку кристалізатору можливий при малій відстані електрода від стінки або при підвищенні тиску газів у печі. Виникнення дуги між електродом і стінкою кристалізатору не можна допускати, тому що стінка кристалізатору може розплавитися й вода потрапить на розплавлений метал. При високій температурі металу вода дисоціює на кисень і водень із утворенням вибухонебезпечної суміші газів. Для зниження ймовірності горіння дуги між електродом і стінкою кристалізатору зазор між ними робиться більше, ніж довжина дуги під електродом.

Дуга між електродами горить при низькій напрузі (20...30 В), при цьому довжина дуги становить усього 2...5 см. Для стиску стовпа дуги й запобігання перекидання її на кристалізатор іноді використовують постійне магнітне поле, створюване соленоїдом, розташованим зовні кристалізатору. Такий соленоїд при живленні змінним струмом може бути використаний для електромагнітного перемішування металу у ванні.

При нормальному ході процесу дуга одним кінцем опирається на плоский торець електроду, що переплавляється, а другим – на дзеркало ванни рідкого металу. За рахунок тепла, що виділяється на електроді, утворюється плівка рідкого металу, який у вигляді крапель стікає у ванну. Безперервне плавлення металу на електроді приводить до того, що його температура увесь час підтримується близькою до температури плавлення. На аноді виділяється трохи більше тепла, ніж на катоді, що приводить до перегріву рідкої ванни й кращому проплавленню злитка. При відводі тепла через стінки кристалізатора охолодженою водою відбувається безперервна кристалізація розплаву.

Розплавлений метал у вигляді тонкої плівки на електроді, крапля, що стікає у ванну, і поверхня рідкого металу у ванні в умовах вакууму виділяють розчинені гази й летучі домішки. Завдяки цьому відбувається істотне очищення металу.

На горіння дуги значний вплив має залишкові гази у печі. При залишковому тиску від 0,1 до 100 Па спостерігається рівномірний (дифузійний) дуговий розряд з великим діаметром анодної плями й позитивного стовпа з невеликою яскравістю стовпа, що займає практично весь обсяг міжелектродного простору. При тиску залишкових газів від 0,1 до 10 кПа спостерігається перехідна форма розряду, коли утворюється кілька катодних плям, що переміщуються по нижній і бічній поверхні електрода з великою швидкістю. Це приводить до зменшення швидкості плавлення електрода й збільшенню нагрівання кристалізатору. Спостерігається загальне світіння газів у печі. При тиску залишкових газів від 10 до 25 кПа утворюється розряд, що має яскраво виражений стовп і опорні плями діаметром у кілька міліметрів. Розряд характеризується нестійкістю стану в просторі. У зв'язку із цим вакуумна система печі розраховується на одержання залишкового тиску в холодній печі менш 0,1 Па. Для створення вакууму використовуються механічні форвакуумні й двороторні, а також бустерні пароолійні насоси. Слід мати на увазі, що в початковий період плавки, коли електрод перебуває в кристалізаторі, відведен-

ня газу з-під електродного простору утруднено внаслідок малої пропускної здатності зазору між злитком і кристалізатором. Залишковий тиск газів там може бути вище.

Великим досягненням у розвитку ДВП з'явилося освоєння перетоплення прямокутних злитків. Така форма злитка значно краще для подальшої обробки тиском.

При перетопленні в глухому кристалізаторі на його поверхню попадають бризи металу й осаджуються летучі солі. Це псує зовнішню поверхню одержуваного злитку. Для одержання гарної поверхні злитка й поліпшення якості металу використовують подвійний переплав. Для цього наприкінці плавки залишок електрода занурюють у розплавлену ванну й дають йому застигти. Потім за допомогою механізму підйому електрода злиток виймають із кристалізатору, підставляють новий кристалізатор і плавку повторюють.

Гарні результати дає вторинний переплав під шаром жужелів в атмосфері аргону або гелію. При цьому електрод поринає в розплавлений жужіль й плавлення йде за рахунок тепла, яке виділяється при проходженні струму по жужелю. Досягається рівномірний розподіл температури й повна відсутність бризів.

Іншою модифікацією дугових вакуумних печей є плавка в гарнісажі, використовувана для одержання виливків з реакційних тугоплавких металів. У цьому випадку в кристалізаторі нагрівається необхідна кількість металу, який потім розливається у виливниці. Наплавлення може проходити шляхом завантаження у піч шихт з бункеру й з використанням електрода, що не витрачається (графітового, вольфрамового або сталюого водоохолоджувального). Можливо також комбінування електрода, що витрачається, із завантаженням кускової шихти з бункера. Розлив металу здійснюється проплавленням отвору в дні тигля, нахилом тигля без електрода й нахилом тигля разом з електродом без припинення горіння дуги. Як правило, розлив проводиться без порушення герметичності (під вакуумом). При гарнісажній плавці ви-



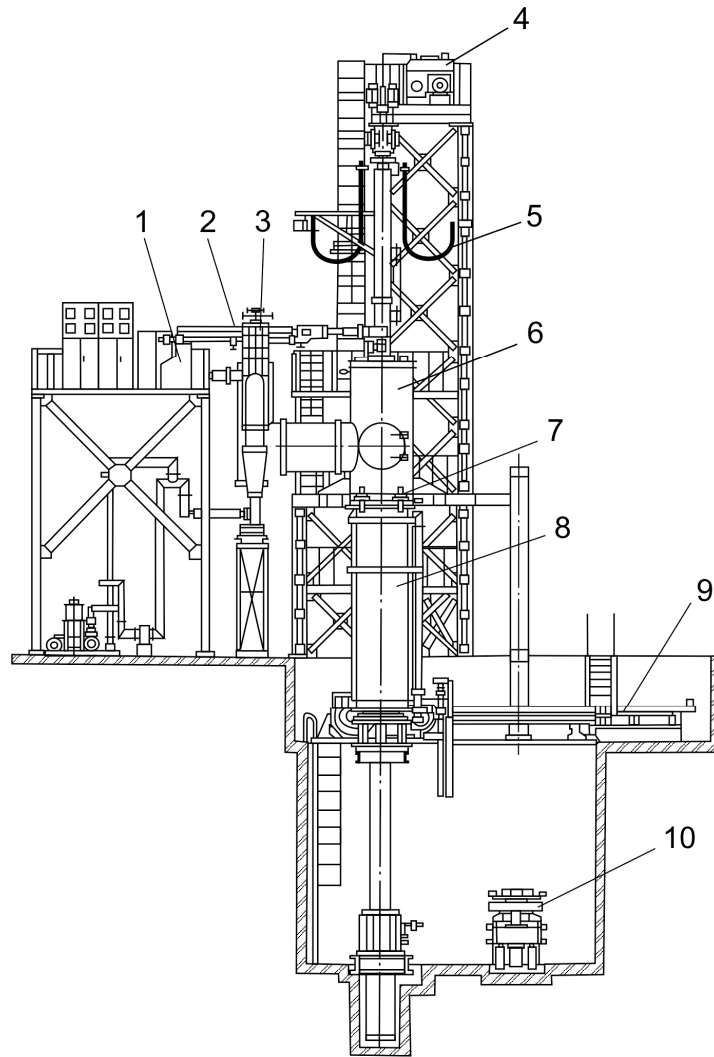
користовуються тиглі металеві з водяним охолодженням, а також графітові, поміщені в сталевий водоохолоджувальний кожух.

Загальний вид дугової вакуумної печі показаний на рис. 4.37. Піч має опорний каркас, на якому монтується всі елементи печі й встановлюються робочі майданчики для обслуговування печі на різних рівнях. Загальна висота печі досягає 15...25 м. Частково вона поглиблена нижче підлоги цеху, і там проводиться розвантаження одержуваних злитків. Висоту печі можна зменшити, застосовуючи робочу камеру, що відсувається. Однак у цьому випадку виникають труднощі струмопідводу й приєднання вакуумної системи.

Основною частиною печі є робоча камера, що має водяне охолодження. Охолодження охороняє корпус камери від деформації й зберігає вакуумні прокладки. Камера має люки для обслуговування, фланці для приєднання вакуумної системи й запобіжний клапан для підбурення тиску при аварії й попаданні води в піч.

Своїм нижнім фланцем камера з'єднується із кристалізатором. У верхній частині є отвір з вакуумним ущільненням для проходу штока – електродотримача. Шток виготовляється з коаксіально розташованих труб. Зовнішня труба робиться мідною й служить для струмопідводу. Внутрішня сталева труба втримує електрод. Підйом і опускання здійснюються звичайно механічним приводом. На кінці штока зміцнюється недогарок електрода (200...300 мм), який зварюється з електродом, що переплавляється. Між трубами циркулює вода для охолодження штока. Швидкість переміщення штока 5...10 мм/хв. Передбачається форсоване переміщення зі швидкістю в 200...400 раз більше ніж звичайна.

Кристалізатор – найбільш відповідальна деталь печі, що випробовує великі теплові навантаження. Він складається із внутрішньої гільзи й зовнішнього сталевих немагнітного кожуха. У зазорі протікає вода для відводу тепла металу, що кристалізується.



1) пульт керування; 2) оптичний спостережливий прилад; 3) вакуумна система; 4) механізм переміщення струмопідвідного штоку; 5) гнучкі кабелі; 6) робоча камера; 7) механізм притиску кристалізатору; 8) кристалізатор; 9) механізм відкоту візка; 10) механізм розвантажувального стола

Рисунок 4.37 – Дугова вакуумна піч типу ДСВ-11.2-Г37 [2]

Внутрішня гільза часто робиться із хромистої бронзи товщиною 30...40 мм. Велика товщина потрібна для збільшення міцності й для розподілу тепла уздовж стінки. Кристалізатор забруднюється й руйнується частково бризами металу, що й визначає його термін служби (кілька сотень плавок). Для охолодження кристалізатору може використовуватися зріджений гелій або рід-

кі метали (калій, натрій). Це усуне можливість вибуху при пропалі стінки кристалізатору, але технічно важко у виконанні й використанні.

Низ кристалізатору закритий піддоном, який витримує велике теплове навантаження при початку плавки (до 50 % потужності дуги). Він виконується з міді товщиною 60...80 мм із водяним охолодженням. Для запобігання пропалу піддона дугою на початку плавки на піддон кладуть шматок злитка товщиною 50...100 мм. Тоді дуга горить між електродом і цим злитком.

Дугові вакуумні печі, що випускаються потужністю від 1400 до 5600 кВт, дозволяють одержувати злитки титану діаметром до 1400 мм, молібдену й ніобію – до 250 мм.

Тепло, яке виділяється в дуговому проміжку між катодом і анодом (електродом і злитком), витрачається на нагрівання й плавлення металу на катоді, перегрів металу у ванні. Це корисне тепло часто становить 40...60 % від підведеної енергії. Втрати тепла визначаються відведенням тепла через електрод до водоохолоджувального штоку й випромінюванням на стінки робочої камери (близько 10 % потужності печі). Слід мати на увазі, що електрод частково нагрівається також за рахунок проходження по ньому струму. Втрати тепла на аноді визначається тепловим випромінюванням розплаву (а також деяким випаром металу) у зазорі між електродом і кристалізатором (15...27 %) і відводом тепла від злитка до кристалізатору теплопровідністю у верхній частині й випромінюванням – у нижній, де внаслідок усадки утворюється зазор між злитком і кристалізатором. Ці втрати становлять 20...25 %.

Дугові вакуумні печі повинні експлуатуватися з дотриманням заходів техніки безпеки. Найбільшу небезпеку представляє розплавлення дуговим розрядом стінки кристалізатору й влучення води на розплавлений метал. Можливість вибуху при плавці металів, що поглинають кисень, потребує розрахунку конструкції печі на силу вибуху, захисту печі спеціальними панцерними камерами зі сталі або залізобетону. Спостереження за процесом

проводиться за допомогою оптичної системи з виносом зображення до пульта керування роботою печі. Перекиданню дуги на стінку печі сприяє збільшення тиску газів у печі більше 10 Па (погіршення вакууму). Позитивний вплив виявляє магнітне поле створюване соленоїдом навколо кристалізатору.

#### 4.2.6 Електронно-променеві печі

В електронно-променевих печах плавлять вольфрам, молібден, ніобій, тантал, цирконій, уран, високоякісну сталь і інші метали. Більш відкрита поверхня ванни металу, висока температура й вакуум створюють умови кращі, ніж при ДВП, для випару домішок з металу й видалення розчинених газів.

Електронно-променеві печі різняться за типом електронної гармати (кільцеві, радіальні, аксіальні й магнетронні), а також за призначенням: для одержання злитків, лиття, зонної перекристалізації, термічної обробки.

На рис. 4.38 показані схеми плавильного обладнання із використанням аксіальної й кільцевої гармат для одержання злитків у водоохолоджувальному кристалізаторі. В плавильному обладнанні, показаному на рис. 4.38, а, б, нагрів проводиться аксіальними пушками, розташовуваними по вертикальній осі установки й під кутом до вертикалі відповідно.

Для підвищення швидкості перетоплення може застосовуватися кілька гармат, встановлених по окружності. Злиток, що переплавляється, розташовується похило так, щоб кінець його обігрівався електронним променем і оплавлявся, стікаючи у ванну кристалізатору. Пучок електронів одночасно зі злитком підігріває й метал у ванні. У якості завантаження можуть бути використані злитки або спресовані порошки й скрап (рис. 4.38, а і в), а також грудковий матеріал у вигляді скрапу, гранул, порошку, що подається в піч рівномірно з бункера (рис. 4.38, б). Печі з кільцевими пушками (рис. 4.38, в) використовують у якості анода метал

у кристалізаторі злиток, що переплавляється. Потік електронів тут розгалужується на злиток і метал у ванні кристалізатору. Кільцевий катод перебуває усередині фокуруючого електроду, що дозволяє сконцентрувати пучок електронів на ванні металу й частково уберігати катод від швидкого руйнування бризами металу. Для одержання виливків плавлення металу може проводитися також у водоохолоджувальному тиглі з утворенням захисного гарнісажу на стінках (рис. 4.39). Для нагрівання використовують переважно аксіальні пушки 1. Розплавлений метал виливається нахилом тигля 2. Окрема гармата ставиться для підігріву металу, що зливається. Застосовується також випуск металу через донний отвір у тиглі 3. Спеціальна гармата пропалює гарнісаж. В останньому випадку для більшої рівномірності плавлення й збільшення

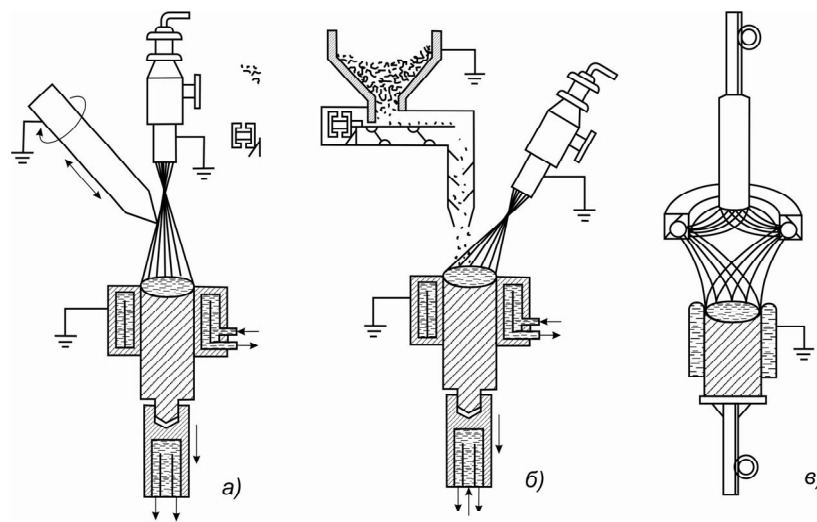
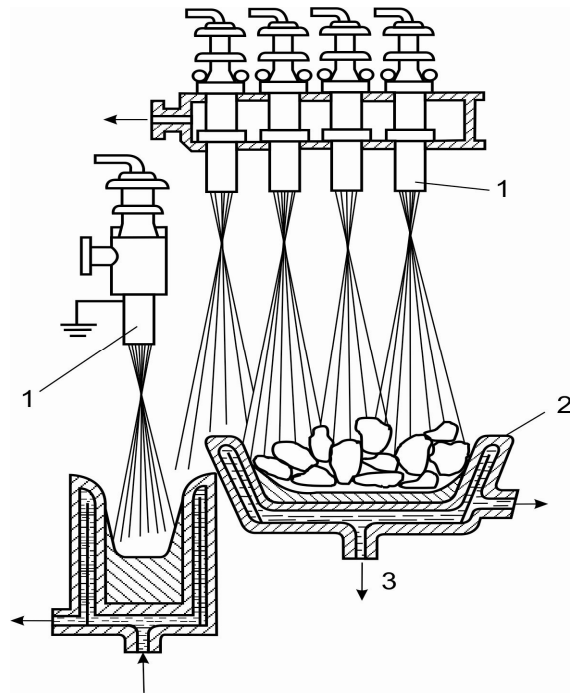


Рисунок 4.38 – Схеми електронно-променевих установок (пояснення в тексті) [2]

Для одержання металів високої чистоти широке поширення знаходить метод зонної перекристалізації. Метод заснований на тому, що уздовж злитка з невеликою швидкістю проходить вузька розплавлена зона. Домішка, що має велику розчинність у розплаві, концентрується в зоні й відтискується до кінця злитка.

Початок злитку, що кристалізується, одержують більш чистим. Таку властивість має більшість домішок. Деякі домішки, навпаки, мають велику розчинність у твердому матеріалі.



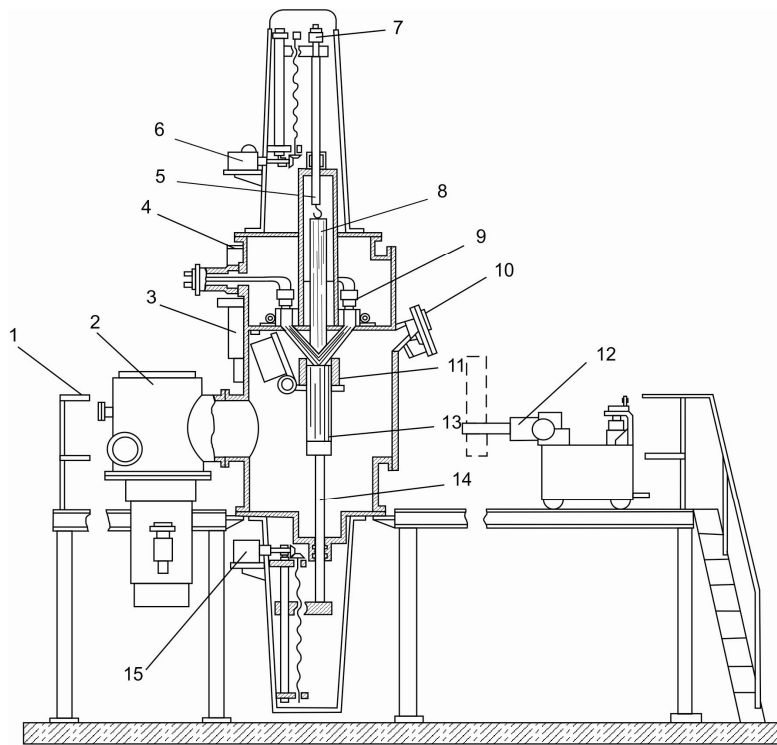
1) електронна гармата; 2) тигель; 3) донний отвір у тиглі

Рисунок 4.39 – Схема електронно-променевої установки для одержання виливків [2]

Це приводить до того, що концентрація домішок до кінця злитка знижується. Особливо ефективний процес зонної перекристалізації в безтигельному варіанті, коли розплавлена зона створюється у вертикально розташованому злитку й завдяки силам поверхневого натягу втримується від розтікання. У цьому випадку виключене забруднення від контейнера, у якому плавиться метал. Для зонного очищення тугоплавких металів успішно використовується електронно-променеве нагрівання з кільцевими пушками, у яких нагріте вольфрамове кільце створює рівномірний потік електронів у бік металу. Злиток (або пушка) переміщається по вертикалі й обертається. Для захисту катода від

летючих домішок використовують формуючі електроди, що дозволяють збільшити термін служби катода. Формуючий електрод (екран) має потенціал катода й при водяному охолодженні практично усуває влучення пару металу на катод.

Електронно-променеве нагрівання знайшло широке застосування для розпилення металу перед нанесенням його на інший матеріал у вигляді плівок і тонких шарів в установках різного типу. Приклад установки з використанням радіальних гармат конструкції Інституту електрозварювання показаний на рис. 4.40.



1) майданчик обслуговування; 2, 3) вакуумні насоси; 4) робоча камера; 5) шток для подачі заготовки, що витрачається; 6) привід механізму подачі; 7) механізм обертання заготовки; 8) заготовка, що витрачається; 9) радіальні пушки; 10) стробоскопічна оглядова система; 11) кристалізатор; 12) маніпулятор для видалення готового злитку; 13) злиток; 14) шток механізму витягування злитку; 15) привід механізму витягування

Рисунок 4.40 – Електронно-променева плавильна установка з радіальними пушками [2]

Печі виготовляються для одержання злитків діаметром до 380 і довжиною до 1200 мм. Потужність 10 радіальних гармат 500 кВт, напруга, що прискорює, 14...17 кВ. Вертикальна заготовка 8 переплавляється при опусканні вниз спеціальним механізмом 6. Готовий злиток витягається штоком 14 і розвантажується маніпулятором 12. Для створення вакууму використовуються пароолійні дифузійні й бустерні насоси, й механічний форвакуумний насос. Замість пароолійних насосів можуть бути використані двороторні. Створені конструкції печей, потужність яких досягає 7,5 МВт при прискорювальній напрузі 30 кВ. На такій печі можна одержати злитки діаметром до 2,0 і довжиною до 4,0 м (маса до 100 т).

Показники роботи електронно-променевої печей залежать від обраної температури перегріву поверхні металу й тривалості витримки металу при цій температурі. Перегрів повинен бути оптимальним, тому що ефективність очищення при занадто високому перегріві може знизитися. З підвищенням температури ростуть втрати тепла випромінюванням з поверхні металу й передача тепла теплопровідністю по злитковій й до стінок кристалізатору.

Електричний к.к.д. усієї установки ( $\eta_e$ ) визначається значенням к.к.д. перетворювача ( $\eta_{in}$ ), електронної гармати ( $\eta_{en}$ ) і перетворення кінетичної енергії прискорених електронів пучка в тепло ( $\eta_n$ ):  $\eta_e = \eta_{np} \cdot \eta_{en} \cdot \eta_n$ .

Звичайно  $\eta_{in}$  досить велике й становить 0,85...0,95;  $\eta_{en}$  для аксіальної гармати великої потужності 0,96...0,98;  $\eta_n$  залежить від втрат на рентгенівське випромінювання (близько 0,1 %), іонізацію пару металу (3...5%), на вторинний і відбитий потік електронів, що залежить від заряду атомного ядра (порядкового номера) елемента  $Z$ . Для титану ( $Z = 22$ )  $\eta_n = 0,92$ , а для урану ( $Z = 92$ )  $\eta_n = 0,76$ . Електричний к.к.д. усієї установки коливається від 0,6 до 0,8.



Мале значення теплового к.к.д. установок електронно-променевого нагрівання приводить до того, що питома витрата електроенергії при плавці металів висока і становить для молібдену 8...15, ніобію 7...10, танталу 6...30, цирконію 2...4, вольфраму 20...40 кВт·година/кг.

Удосконалювання технології плавки й конструкції електронно-променевих печей повинне привести до зменшення питомої витрати електроенергії.

### 4.3 Агрегати хлорування

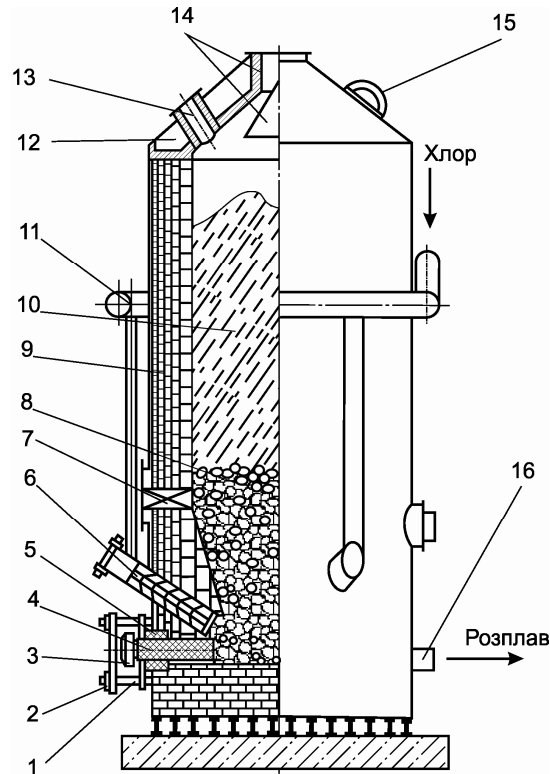
При виробництві деяких кольорових металів (титан, кремній) неможливо одержати чистий метал із заданими властивостями шляхом плавлення вихідної руди. У цих випадках метал з рудної сировини переводять у проміжну сполуку (хлориди, фториди і т.д.), яку очищають від домішок і з якої відновлюють чистий метал. На даний момент у металургії найбільш розвинена хлорна технологія. Розглянемо встаткування для хлорування, застосовуване в металургії титана і кремнію.

У промисловій практиці для хлорування титановмісної сировини застосовують [6]: шахтні електропечі, шахтні хлоратори безперервної дії, печі киплячого шару, сольові хлоратори.

Хлорування титановмісної сировини в *шахтних електропечах* донедавна було одним з основних промислових способів одержання технічного тетрахлориду титану [6]. Цей спосіб слід називати способом хлорування брикетованої титановмісної сировини в шахтній електропечі в нерухливому шарі. Коксовані охолоджені брикети хлорують у шахтній електропечі (рис. 4.41).

По висоті шахтна електропеч умовно розділена на три зони. У нижній зоні накопичуються продукти хлорування: розплав, непрохлорований залишок (недогарок). Для попереднього розігріву печі й підтримки температури в цій зоні в межах 700...750 °С використовується вугільна (криптонова) насадка. Розплав, що

полягає в основному з 60...70 %  $CaCl_2$ , 30...35 %  $MgCl_2$  і 1...2 %  $FeCl_2$ , збирається у вугільній насадці й періодично в рідкому стані випускається через нижню льотку.



1) тяги кріплення електродів; 2) траверси; 3) водоохолоджувальний кесон; 4) електрод; 5) чепцеве ущільнення; 6) фурма; 7) очисний лаз; 8) вугільна насадка; 9) футерівка; 10) шахта печі; 11) хлорне кільце; 12) кришка печі; 13) патрубок для відводу парогазової суміші; 14) розподільний конус; 15) вибуховий клапан; 16) льотка для зливу розплаву.

Рисунок 4.41 – Схема шахтної електропечі [6]

Непрохлорований залишок наступного складу: 20...30 %  $TiO_2$ , 8...15 %  $SiO_2$ , 18...25 %  $C$ , 4...5 %  $Al_2O_3$ , 1,5...2,0 %  $Fe_2O_3$  і 0,5 %  $CaO$  в міру нагромадження через 2...5 місяця видаляють при зупинці процесу хлорування. Це й визначає періодичність процесу хлорування в шахтних електропечах.

Середня зона – місце безпосереднього хлорування, де хло-

рується основна маса брикетів при 1000...1100 °С. Така температура підтримується екзотермічним теплом реакцій. У міру нагромадження непрохлорованого залишку середня реакційна зона поступово переміщається нагору. Висока температура процесу хлорування, обумовлена специфікою шахтної електропечі, приводить до протікання реакцій хлорування оксидів з перевагою вибухонебезпечного оксиду, що утворюється, вуглецю й невеликою кількістю  $CO_2$ . Тому одна з обов'язкових умов роботи електропечі й системи конденсації - застосування надлишкового тиску щоб уникнути підсмоктувань повітря й можливих вибухів. У зоні реакції утворюється розплав, летучі газоподібні хлориди ( $TiCl_4$ ,  $AlCl_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $SiCl_4$ ,  $VCl_3$ ,  $CCl_4$ ,  $CoCl_2$  і ін.) і неконденсовані гази ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $HCl$  і ін.). Розплав стікає в простір між елементами вугільної насадки, а газоподібні продукти, піднімаючись нагору, підігрівають верхній шар шихти до 600...700 °С.

Верхній шар шихти й простір під склепінням створюють верхню зону шахтної електропечі, у якій відбуваються також різні обмінні реакції між компонентами парогазової суміші, що виходить із зони реакції, і шихтою. Зона підігріву брикетів у міру збільшення шару непрохлорованих залишків і підйому зони реакції поступово зменшується, що впливає на протікання вторинних реакцій і сполук парогазової суміші, що відходить.

Однією з ознак зменшення припустимої висоти зони підігріву є різке збільшення кількості хлору в газах, що відходять, і підвищення виходу твердих суспензій з технічним тетрахлоридом титану. Парогазова суміш, що утворюється в шахтній електропечі, надходить у систему конденсації. Конструкція шахтної електропечі нескладна й відносно проста в експлуатації. Вона дозволяє застосовувати різну титановмісну сировину, змінювати в широкому діапазоні продуктивність і швидко зупиняти процес хлорування якщо буде потреба.

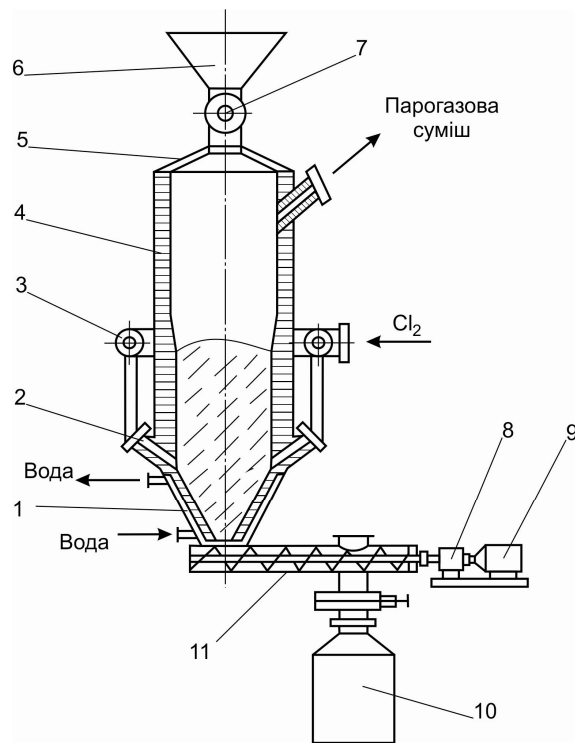
Однак невисока продуктивність, періодичність процесу, ручне вивантаження непрохлорованого залишку (недогарка) і нерідкі випадки утворення локальних вогнищ реакції з великими

проскакуванням хлору й наплавленням шихти потребували створення більш продуктивного й безперервного апарата. На зміну шахтним електропечами прийшли шахтні хлоратори безперервної дії.

*Шахтні хлоратори безперервної дії* для хлорування брикетованої або гранульованої шихти є більш прогресивними в порівнянні із шахтними електропечами, і тому їх застосовують замість шахтних електричних печей. Цій заміні сприяло також підвищення якості титанових жужелів, у яких значно знизився вміст  $CaO$  й  $MgO$ . Шахтний хлоратор (рис. 4.42) являє собою циліндр діаметром 1,5...2,0 м і висотою до 10 м, який футерують шамотною цеглою. Нижня частина циліндра виконана у вигляді конуса з футерівкою, як правило, жаротривким бетоном. У конусну частину трохи вище розвантажувального отвору подають хлор-газ.

Пуск і робота шахтного хлоратора проводиться в наступному порядку. Після сушіння й розігріву футерівки (газом, мазутом, дровами та ін.) у хлоратор завантажують дроблений кокс і підпалюють. Для кращого горіння коксу й підйому температури по хлорних фурмах подають повітря. На шар коксу вантажать титановмісні брикети. У міру горіння коксу з нижньої частини хлоратора безупинно вивантажують золу, а зверху довантажують брикети. При досягненні в шарі брикетів температури 900...1000 °С (зона реакції) замість повітря по фурмах подають хлор, і починається власне процес хлорування.

При нормальній роботі шахтного хлоратора безупинно ведуть завантаження брикетів зверху й вивантаження непрохлорованого залишку знизу. Ці операції ведуть із розрахунку, що всі три зони (підігріву, реакції й непрохлорованого залишку) перебувають на одному рівні. Температурний режим процесу хлорування забезпечується теплом екзотермічних реакцій. Відвід надлишкового тепла й охолодження недогарка, що вивантажується, здійснюють доборою товщини футерівки й водою.



1) водоохолоджувальний конус; 2) фурма; 3) хлорний колектор; 4) корпус; 5) водоохолоджувальне склепіння; 6) бункер; 7) золотниковий живильник; 8) редуктор; 9) електродвигун; 10) кубель для недогарку; 11) розвантажувальний шнек.

Рисунок 4.42 – Схема шахтного хлоратора безперервної дії [6]

Відсутність електрообігрівання, безперервність вивантаження недогарка, регульований відвід тепла дозволяють значно підвищити продуктивність хлорування, механізувати практично всі операції й створити можливість для автоматизації всього процесу. У шахтному хлораторові тривалість кампанії визначається тільки зношуванням футерівки, тобто часом між капітальними ремонтами. Однак шахтному хлораторові властивий один серйозний недолік – необхідність застосування брикетованої або гранульованої, шихти: при цьому до гранул висувають підвищені вимоги по крупності й механічним властивостям.

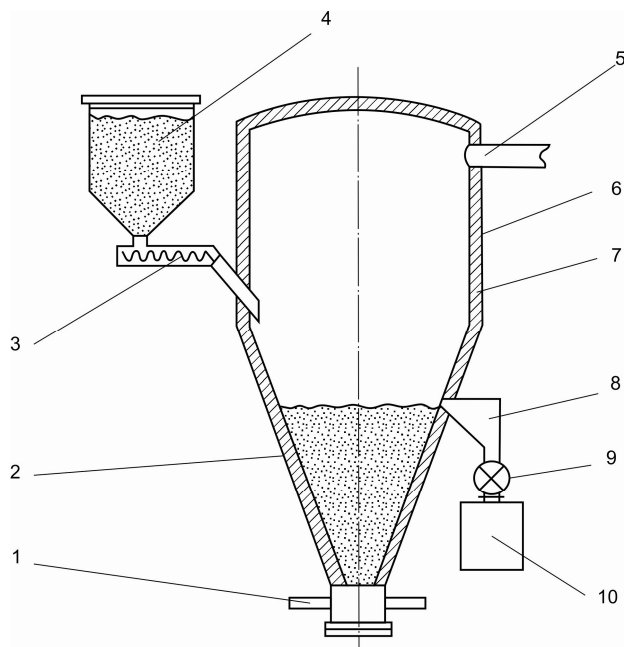
Дозування перед змішанням, змішання складових шихти, брикетування (гранулювання), сушіння й коксування значно ускладнюють технологію й підвищують вартість тетрахлориду тита-

ну. Треба також ураховувати, що технологія хлорування вимагає постійного контролю складу шихти і його оперативного коректування. При застосуванні брикетованої (гранульованої) шихти цю вимогу виконати важко, а в деяких випадках неможливо. Використання сипучої шихти дозволяє швидко змінювати склад суміші, що хлорується, за вмістом  $TiO_2$  і вуглецю й автоматизувати процес хлорування [6].

Використання *киплячого* шару для хлорування титановмісної шихти давно приваблювало вчених і інженерів-виробничників. Із закордонної інформації відомо, що в США широко використовують киплячий шар при хлоруванні рутилу. Відсутність легкоплавких домішок у рутилі й відносно рівномірний гранулометричний склад дозволяють порівняно легко здійснити хлорування в киплячому шарі в промисловому масштабі.

Процес здійснюють при такій швидкості газового потоку по перетину шару шихти, що частки перебувають як би у зваженому стані. Швидкість газового потоку, при якій зважена частка переходить у статичний стан і шар шихти перестає "кипіти", називається критичною швидкістю. Отже, стійкий "киплячий" стан шихти можливий при швидкості вище критичної.

Конструкція хлоратора для хлорування в киплячому шарі (рис. 4.43) представляє ту ж шахтну піч круглого або овального перетину, але з поступово (або східчасто) збільшуючою площею поперечного переріза для збереження по всій висоті шару шихти швидкості газового потоку вище критичної. Зверху на шар або під шар шихти безупинно завантажують, свіжу шихту, знизу з конусної частини, вивантажують недогарок. Для виключення або зменшення пиловиносу із шару шихти перетин внутрішньої шахти над шаром шихти роблять значно більшого розміру, що дозволяє зменшити швидкість газового потоку нижче критичної (для самих дрібних часток пилу). Парогазову суміш, що утворюється при хлоруванні, виводять через склепіння хлоратора [6].



1) фурми; 2) киплячий шар; 3) шнековий живильник; 4) бункер для шихти; 5) газохід для парогазової суміші; 6) кожух хлоратора; 7) футерівка (шамот, динас); 8) тічка для вивантаження недогарка; 9) живильник; 10) збірник недогарка.

Рисунок 4.43 – Схема хлоратора киплячого шару [6]

Для хлорування в киплячому шарі застосовують мелену або гранульовану шихту, що представляє собою суміш титановмісної сировини й коксу. Гранули готують із шихти, що складається із часток малого розміру. Дуже сильне подрібнювання титановмісної сировини й коксу неприпустиме.

Температурний режим і хімізм процесу хлорування в киплячому шарі в основному такі ж, як і в шахтному хлораторові з рухливим шаром. Але в порівнянні із шахтним хлоратором хлорування в киплячому шарі має такі переваги, як більш висока швидкість процесу, більш рівномірна температура процесу по перетину через кращу масу й теплообмін шихти й газу.

Наявність у титановмісній сировині оксидів магнію й кальцію ускладнює створення стійкого киплячого шару. Легкоплавкі хлориди, що утворюються, обволікають шихту (сплавляють), приводять до свищів у шарі шихти й великому "проскакуванню"

хлору. Для створення стійкого киплячого шару знижують температуру, значно збільшують частку коксу в шихті.

Киплячий шар має наступні специфічні недоліки:

- при кипінні шару шихти має місце переміщення непрохлорованих часток шихти в нижню зону, у результаті чого в недогарку, що вивантажується, утримується підвищена кількість  $TiO_2$ ;
- підвищене зношування футерівки стінок;
- розтягнута по висоті зона реакції через більш інтенсивний теплообмін по висоті.

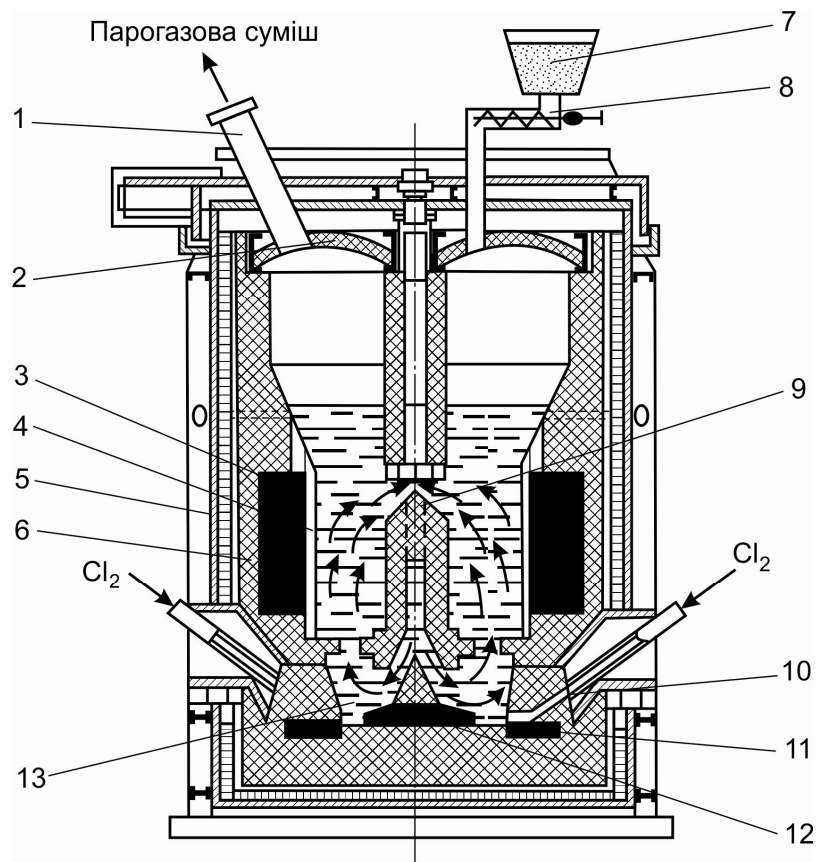
Через перераховані та інші недоліки хлорування в апаратах киплячого шару не знайшло широкого застосування. Однак дослідження в цьому напрямку тривають як у нашій країні, так і за кордоном.

Широке застосування одержав метод хлорування здрібної шихти в *розплаві хлоридів лужних металів*. Цей спосіб у порівнянні з іншими має ряд переваг:

- спрощується технологічна схема підготовки шихти завдяки виключенню переділів брикетування й коксування;
- інтенсивне барботування забезпечує ефективні масо- й теплообмін, і високу питому продуктивність. Найпростіше вирішується питання терморегулювання процесу;
- спрощується процес конденсації тетрахлориду титану за рахунок збільшення його парціального тиску в парогазовій суміші;
- через можливість ведення процесу при більш низькій температурі технічний  $TiCl_4$  менше забруднюється хлоридами алюмінію, заліза, кремнію, сірки й вуглецьвмісними органічними домішками, що полегшує наступне його очищення;
- пред'являються менш жорсткі вимоги до титанової сировини за вмістом оксидів натрію, калію, магнію й кальцію;
- процес хлорування в розплаві йде переважно з утворенням  $CO_2$ , а не  $CO$ , що виключає утворення вибухонебезпечних сумішей і спрощує експлуатацію встаткування.

Сольовий хлоратор (рис. 4.44) являє собою сталевий кожух, який футерують шамотною цеглою.





1) газохід; 2) склепіння; 3) графітовий електрод; 4) водоохолоджувальна штанга; 5) кожух; 6) шамотна футерівка; 7) бункер із шихтою; 8) шнековий живильник; 9) перегородка для створення циркуляції розплаву; 10) фурма; 11 і 12) донні графітові електроди; 13) нижній злив розплаву.

Рисунок 4.44 – Схема сольового хлоратора [6]

У бічних стінках хлоратора забиті графітові електроди, у середину яких вставлені порожні водоохолоджувальні штанги. У період пуску хлоратора електроди підключають до трансформатора змінного струму для розігріву залитого в хлоратора розплаву. У нижній зоні хлоратора є спеціальні фурми й розподільники для подачі хлору.

Для зливу розплаву служать нижні й верхні льотки. У якості робочого середовища використовують хлориди лужних металів. Зверху у склепінні хлоратора є отвори для відводу парогазової

суміші й подачі розмеленої сухої шихти. Кількість подаваної шихти автоматизоване за допомогою спеціального дозуючого обладнання.

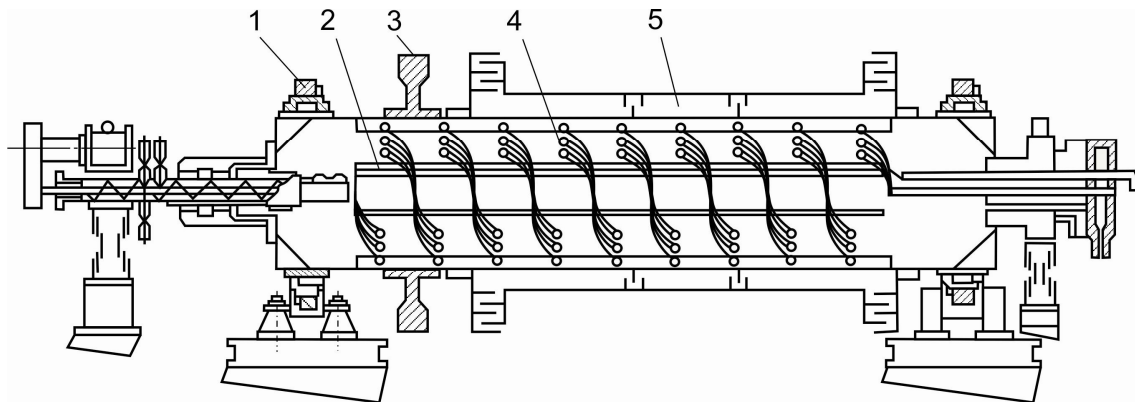
Процес хлорування ведуть в інтервалі температур 700...800 °С. При досягненні нормальної температури в штанги електродів подають воду для відводу надлишкового тепла екзотермічних реакцій хлорування. Після встановлення нормального режиму електроди відключають від трансформатору. Безперервний відвід надлишкового тепла, періодичне виведення з відпрацьованим розплавом недогарка дозволяють значно інтенсифікувати процес і забезпечити рівномірну безперервну роботу хлоратора. Кількість газів, що відходять, при хлоруванні в розплаві значно менше, чим при інших способах, внаслідок того, що кисень оксидів шихти й анодного хлоргазу зв'язується вуглецем переважно до  $CO_2$ . Це сприятливо впливає на роботу конденсаційної системи [6].

При хлоруванні в розплаві хлоридів титановмісна сировина й кокс перебувають у зваженому стані рівномірно по всьому об'єму розплаву. Хлор, що подається в нижню зону при надлишковому тиску  $\sim 70$  кПа під кутом до череню, дробиться на дрібні пухирці, які сорбуються на поверхні вуглецю й, взаємодіючи з оксидами, сприяють безперервному барботуванню розплаву. Цю же роль виконують виділяючі газоподібні продукти реакцій хлорування. Рівень розплаву в хлораторові підтримують таким, щоб хлор встигнув повністю прореагувати в об'ємі розплаву. В основному хлор використовується повністю.

У виробництві монокристалів кремнію для хлорування технічного кремнію застосовують агрегати горизонтального й вертикального типу.

Реактор горизонтального типу (рис. 4.45) – циліндричний обертовим апарат із хромонікелевої нержавіючої сталі, встановлений під невеликим кутом до обр'ю, що опирається на ковзанки. Він приводиться в обертання за допомогою приводу й зубчастого колеса, закріпленого на циліндричній частині реактора. Привід

складається з редуктора й електродвигуна [4]. Реактор змонтований на цегельному фундаменті й укладений у кладку із шамотної цегли, посилену сталевими куточками.



1) бандаж; 2) перекидні полки; 3) зубчастий вінець; 4) гвинтові поверхні; 5) обертовий барабан

Рисунок 4.45 – Реактор горизонтального типу для одержання трихлорсилану [4]

У середині реактора є перекидні полки, на які потрапляє кремній і з яких він зсипається при обертанні. Полки виконані таким чином, що кремній при пересипанні з полиць поступово переміщається уздовж реактора. Спеціальне чепцеве обладнання забезпечує введення в передню крайку реактора нерухливої трубки подачі хлористого водню й кремнію.

Кремній з розміром часток 5...10 мм завантажують у реактор за допомогою спеціального шнеку, через який також вводять термopару в чоxлі. Крім того, на передній кришці реактора є завантажувальний люк, через який здійснюють первісне завантаження кремнію. Система пиловловлення з'єднана із задньою кришкою реактора за допомогою чепцевого або сифонного обладнання.

У зв'язку з тим, що синтез трихлорсилану протікає з виділенням значної кількості тепла, у реактор подається повітря на охолодження. У той же час для забезпечення пуску реактора є

обладнання, яке діє доти, поки, виділяюче тепло реакцій не виявиться достатнім для підтримки процесу.

Обігрів реактора при старті здійснюється теплом газів, що утворюються при згоранні мазуту. Топкові гази обмивають реактор, нагріваючи його до 573...673 К.

Після завантаження кремнію в обертовий реактор вдмухують гарячий азот і по досягненню кремнієм температури 563 К починають подавати хлористий водень.

При обертанні реактора кремній пересипається з перекидних полиць; при цьому він перебуває у зваженому стані, що сприяє теплообміну кремнію з газовою фазою, інтенсифікує теплопередачу й масообмін. Крім того, частки кремнію перебувають у постійному русі, у результаті поверхня часток кремнію оновлюється.

По довжині апарата температура (оптимальна 563...573 К) значно змінюється, що накладає певний відбиток на склад газової фази, що надходить надалі на конденсацію й виділення хлорсиланів.

Концентрація трихлорсилана в конденсаті становить 80...85 %, ступінь конверсії хлористого водню < 85...90 %, пиловинос 8...10 %.

До недоліків реактора горизонтального типу відносять те, що вони громіздкі, містять у своїй конструкції частини, що рухаються, мають спеціальне топлення, відрізняються підвищеним пиловиносом. У цих реакторах важко зменшити проскакування хлористого водню, що збільшує навантаження на систему нейтралізації. У промисловості вони застосовувалися до 1963 р.

Інший тип апаратів – це вертикальний шахтний реактор у вигляді циліндру, виготовлений із хромонікелевої нержавіючої сталі. У нижній частині реактор закінчується конічним днищем з патрубком для вивантаження кремнію. У верхній частині реактор має кришку, яка кріпиться за допомогою фланцевого з'єднання. У кришку введені електронагрівачі, розміщені в нержавіючій трубі із глухим закінченням.

Реактор розділений по висоті на кілька зон. У нижній частині кожної зони є фурма, до якої підведена лінія подачі хлористого водню. Фурма – кільцевий тороїдальний патрубок з отворами діаметром 2,0...2,5 мм по всій окружності кільця, виконаний з нержавіючої сталі. Цей вузол часто виходить із ладу, тому його іноді виконують із керамічних трубок.

Кожна зона охолоджується повітрям, яке спеціальним вентилятором подається в сорочку реактора. Подачу повітря регулюють залежно від температури зони, вимірюваної в кожній зоні термометрами, які вставляються в спеціальні чохла з нержавіючої сталі.

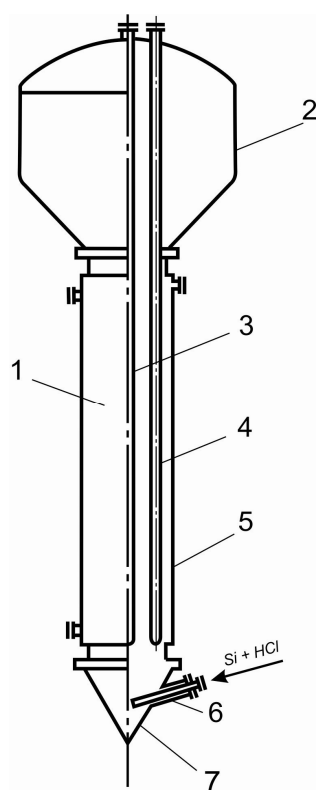
Кремній фракцій 30...40 мм завантажують із контейнерів через спеціальний патрубок. Одиначне завантаження < 1,2 т. Реактор працює періодично. Після завантаження кремнію реактор герметизують, продувають азотом і включають електронагрівачі. Обігрів ведуть до досягнення температури 573 К у всіх зонах апарата. Потім вводять хлористий водень і включають повітряне охолодження.

У міру витрати кремнію реактор довантажують і процес триває. У реакторі залишаються продукти, які не гідрохлоруються, вони можуть утворювати легкоплавкі евтектики із кремнієм і пасивувати його поверхню. Про закінчення процесу судять за збільшенням проскакування хлористого водню й зменшенню наробки готового продукту. Вміст трихлорсилану в продуктах конденсації 35...50 %.

Вертикальні шахтні реактори не надійні в роботі, важко здійснити рівномірний розподіл хлористого водню по перетину й висоті апарата, що приводить до великих градієнтів температури в об'ємі апарата й утворенні конгломератів спечених часток, часто виникають місцеві перегріви, що ведуть до підвищеного утворення тетрахлорсилану й зниженню виходу трихлорсилану. Ці апарати мають обмежене застосування.

Інший тип вертикальних апаратів, який знайшов застосування в промисловості, – це реактор із псевдозрідженим шаром

кристалічного кремнію (рис. 4.46). Процес гідрохлорування в цих апаратах проводиться безупинно. У реактор безупинно подають кремній з розміром часток 1,6...0,1 мм і хлористий водень, з реактора відбираються продукти реакції у вигляді парогазової суміші, яку потім піддають сухому і мокрому очищенням і направляють на конденсацію. Після конденсації рідкий продукт – конденсат трихлорсилану, як і в усіх інших випадках, піддають ректифікації, а газу проходять систему додаткової низькотемпературної конденсації й подаються на нейтралізацію.



1) корпус; 2) розширювач; 3) чохол термопари; 4) нагрівач; 5) сорочка охолодження; 6) інжектор; 7) конусне днище

Рисунок 4.46 – Реактор киплячого шару [4]

Реактор має циліндричну або конічну форму з розширювачем у верхній частині, у нижній частині - конусне днище з патрубком для зсипання кремнію й інжектором для подачі кремнію з потоком хлористого водню. Через верхню кришку в реактор вво-

дяться чотири електричні нагрівачі й три термопари в чохлі, що змінюють температуру в нижній, середній і верхній частинах псевдозрідженого шару.

Для відводу тепла, що виділяється в результаті екзотермічних реакцій гідрохлорування кремнію, реактор охолоджують водою, яку подають на його стіни у вигляді плівки через тороїдальну кільцеву трубку, розташовану у верхній частині порожнини охолодження. Порожнина охолодження виконана у вигляді кесонованої сорочки, розташованої по висоті реактора від конусного днища до розширника. Розширник призначений для підтримки швидкості газів нижче швидкості ширяння пиловатих часток кремнію, що виносяться із шару.

При певній швидкості (початкова швидкість псевдозрідження) хлористого водню здрібнений кремній утворює псевдозріджений шар, відбувається інтенсивне перемішування кремнію, що значно поліпшує тепло- і масообмін.

Реактори псевдозрідженого шару мають цілий ряд переваг у порівнянні з реакторами інших типів:

- висока продуктивність ( $\geq 1,5 \dots 2,0$  т/година) при порівняно невеликих розмірах;
- одержуваний конденсат трихлорсилану містить 85...92 % трихлорсилану;
- порівняно низькі питомі норми витрати кремнію 0,22...0,23 т/т конденсату;
- процес легко можна автоматизувати й він не вимагає великої кількості операторів для обслуговування.

#### **4.4 Апарати ректифікаційного очищення сполук**

Ректифікація є основним методом очищення проміжних сполук від домішок, які перейшли в ці сполуки з вихідної сировини (технічного кремнію, титанових жужелів і т.д.). По мірі очищення вміст домішок зменшується й досягає такої величини,

коли їх вплив вже не позначається на властивостях системи основний продукт - домішка. У цьому випадку молекули домішок хаотично розподілені в основному продукті й ще більше розведення не змінює енергії взаємодії молекул домішки з навколишніми її молекулами основного продукту, тобто по суті має місце ідеальний розчин, зміна в якому кількості домішкової речовини супроводжується значним тепловим ефектом або зміною об'єму. Кількість домішки, відповідної до такого стану (граничному розведенню), одержала назву мікродомішка.

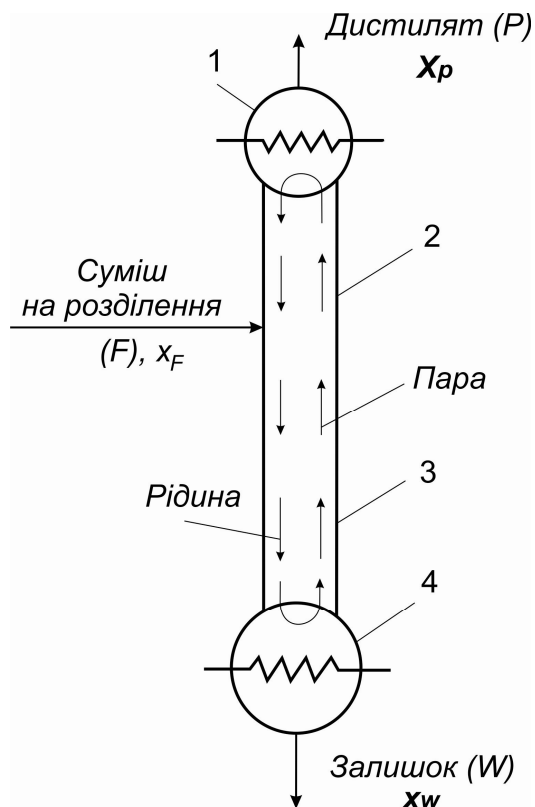
У технології глибокого очищення речовин велике поширення одержали методи, пов'язані з використанням двофазних систем (наприклад, рідина - пар). Поява поверхні розподілу фаз полегшує не тільки процес поділу домішки між фазами, тобто різними частинами загального об'єму системи, але й відділення збагаченої домішками частини фазового простору. Наприклад, перехід рідини в пару зв'язаний також з перерозподілом домішки між парою й рідиною.

Процес часткового википання рідкого розчину або конденсації парової суміші різних за летючістю речовин з метою одержання одного продукту більш, а іншого - менш летучого, ніж вихідний розчин, називається перегонкою. Багаторазове повторення процесу перегонки по суті є основою всіх сучасних багатоступінчастих процесів очищення речовини й лежить в основі процесу ректифікації. Ректифікація бінарних систем є процесом поділу розчинів на різні за складом суміші (або чисті речовини) шляхом здійснюваного в ректифікаційній колоні багаторазового двостороннього масообміну між парами, що рухаються протитечією, і рідиною.

У процесі ректифікаційного очищення відбувається багаторазове повторення процесу перегонки (рис. 4.47). Пара, що утворюється при кипінні рідини в кубі колони, піднімається нагору по колоні в конденсатор, конденсат стікає вниз, де знову випаровується. Таким чином, у ректифікуючій частині колони здійснюється протитечія рідини й пари, між рідиною й паром здійснює-



ться масообмін, тобто відбувається міжфазовий перерозподіл компонентів – багаторазово повторювані процеси випару й конденсації.



1) конденсатор (дефлегматор); 2) зміцнювальна частина; 3) вичерпна частина; 4) куб колони

Рисунок 4.47 – Схема дії ректифікаційної колони [4]

На кінцях колони в конденсаторі й кубі відбувається збагачення домішками. У кубі концентруються домішки з високою температурою кипіння, у конденсаторі (дефлегматорі) концентруються домішки з низькою температурою кипіння. Висока або низька температури кипіння оцінюються в порівнянні з температурою кипіння речовини, що очищається. Чим ефективніше контакт між рідиною й паром у ректифікуючій частині колони, тим вище швидкість процесу міжфазового масообміну й ефект поділу. У результаті ректифікації вихідної суміші в кількості  $F$

(кмоль/с) при вихідній концентрації  $x_F$  домішки компонент із більш низькою температурою кипіння (нижчекиплячий) концентрується у верхній частині колони й у вигляді дистилату (конденсату) може відбиратися звідти в кількості  $P$  (кмоль/с) з концентрацією домішки  $x_P$ . У цьому випадку рідина в конденсаторі, що утворюється із потрапляючої туди пари, ділиться на дві частини. Одна (менша) частина  $P$  відбирається як продукт, а інша (більша) частина  $\Phi$  вертається в колону в протитечію пари у вигляді зрошення – флегми. Відношення кількості флегми до кількості відбору називається флегмовим числом:  $f = \Phi / P$ .

У промислових умовах, як правило, ректифікація здійснюється у вигляді безперервного процесу. Розділяючу суміш – живлення  $F$  (з концентрацією  $x_f$ ) – подають у середню частину колони. Нижчекиплячі компоненти  $x_P$  концентруються у верхній частині колони й відбираються звідти в кількості  $P$ . Місцем введення живлення колона ділиться на дві секції. Секція, у якій концентрується компонент, який цікавить, називається зміцнювальною частиною колони. Інша секція називається вичерпною. З куба відбирається продукт у кількості  $W$  з концентрацією  $x_w$ .

У промисловості зустрічаються ректифікаційні колони різної конструкції. В основному вони відрізняються один від одного розмірами й контактним обладнанням, на якому здійснюється ефективна взаємодія парової й рідкої фаз. Умовно за характером контакту між рідиною й паром усі ректифікаційні колони можна розділити на три типи:

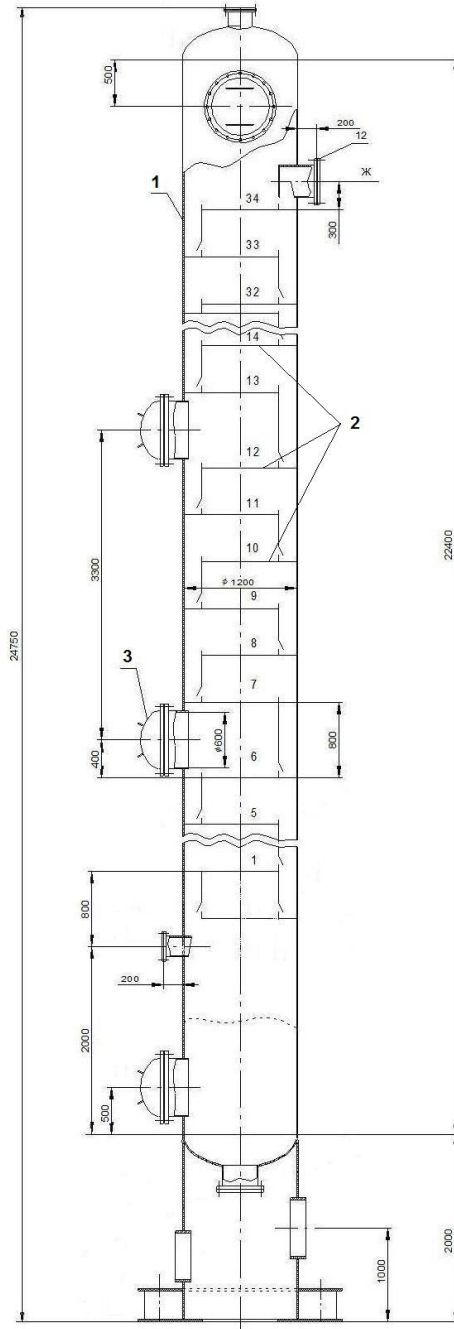
- тарілчасті – контакт між рідиною й паром здійснюється стрибкоподібно на спеціальних, горизонтально встановлених у різних перетинах колони тарілках;
- насадові – рідина в цих колонах стікає по поверхні насаду, і контакт між рідиною й паром здійснюється безупинно по всій висоті колони;
- плівкові – у цих колонах рідина стікає у вигляді плівки постійної товщини. Контакт між рідиною й паром відбувається на поверхні плівки безупинно по всій висоті колони.

Найбільше поширення в промисловій практиці очищення хлорсиланів одержали тарілчасті колони (рис. 4.48). Відомі до теперішнього часу класифікації дозволяють розділити тарілчасту масообмінну апаратуру на чотири класи: барботувальні тарілки; струминні тарілки; плівкові тарілки; секційні тарілки. Основним розподілом на класи прийнятий характер взаємодії пари з рідиною на тарілках, оскільки саме він визначає умови масоперенесення.

Так, на барботувальних тарілках пар проходить (барботує) через шар рідини у вигляді пухирців, при цьому рідина є суцільною фазою, а пара - дисперсною. У результаті взаємодії фаз на тарілках утворюється парорідинний шар. Повна висота шару і його складові залежать від геометрії тарілки, співвідношення матеріальних потоків і фізико-хімічних властивостей системи. Особливістю струминних тарілок є диспергування рідини парою у початковий момент їх взаємодії й наступний їхній спільний прямоструминний і перехресно-прямоструминний рух у напрямку, який визначений геометрією тарілки. Клас плівкових тарілок характеризується специфічною взаємодією пари з рідиною плівкою, що рухається. Секційні тарілки включають особливості всіх попередніх класів, але вони вимагають конструктивного оформлення, характерного для тарілчастого обладнання.

Найбільш представницьким за конструктивним оформленням є клас барботувального контактного обладнання, серед яких особливе місце займають ковпачкові й сітчасті тарілки. Барботувальні тарілки знайшли широке застосування в промисловості. У технології одержання й очищення трихлорсилану використовуються ректифікаційні колони із сітчастими тарілками.

На кожній тарілці відбувається перерозподіл компонентів суміші (домішок) між рідиною й парою. Чим краще умови контакту (адіабатичність, швидкість потоків, кількість рідини на тарілці, час контакту і т.д.), тим ближче буде співвідношення між складом рідини й пари на тарілці до рівноважного.



1) колона; 2) тарілки; 3) кришка люка

Рисунок 4.48 – Ректифікаційна тарілчаста колона  $\varnothing 1200$  мм [6]

Ефективність тарілчастих ректифікаційних колон прийнято характеризувати числом теоретичних тарілок  $n$ . Величина  $n$  ви-

значається з рівняння Фенске-Ундервуда, яке справедливо для колони, що працює в стаціонарному режимі без відбирання:

$$F_0 = \frac{x_n}{x_0} = \alpha^{-n},$$

де  $F_0$  – фактор розподілу в режимі без відбирання;  $x_0$  і  $x_n$  – концентрація домішки в рідкому продукті у вихідній суміші й після очищення відповідно;  $\alpha$  - коефіцієнт розподілу.

За фактором поділу судять про роздільну здатність колони при очищенні конкретних речовин. Чим більше  $F_0$  відрізняється від  $n$ , тим більший ефект поділу в порівнянні з однократною перегонкою. У дійсності рівноважні умови на практиці не досягаються й поділ, одержуваний на реальній тарілці, завжди менше теоретичного.

Практично міжфазовий розподіл на реальних (фізичних) тарілках у колоні становить лише частку (50...80 %) від того розподілу, який відповідає теоретичній тарілці. Цю частку називають коефіцієнтом корисної дії тарілки (к.к.д.), який суттєво різниться для тарілок різної конструкції. Тому для оцінки розділової здатності тарілчастої колони необхідно визначити к.к.д. тарілки при конкретних умовах. Для цього за допомогою розгону стандартної суміші з відомим  $\alpha$  визначають  $n$  колони. Визначивши  $F_0$ , що досягається при ректифікації суміші, що цікавить, на цій же колоні, за тих самих умов можна за рівнянням Фенске-Ундервуда визначити для цієї суміші. Цей метод дуже приблизний, оскільки к.к.д. тарілки залежить, крім усього іншого, від природи суміші, що розподіляється.

#### 4.5 Апарати відновлення

Після очищення сполук кольорових металів від домішок здійснюється відновлення потрібного металу в апаратах віднов-

лення. У виробництві полікристалічних кремнієвих стрижнів найбільше промислове поширення одержали методи водневого відновлення хлорсиланів, а у виробництві титану – магнійтермічне відновлення.

Основними елементами установки для одержання стрижнів кремнію є власне реактор, газовий пульт, блок електроживлення, блок керування.

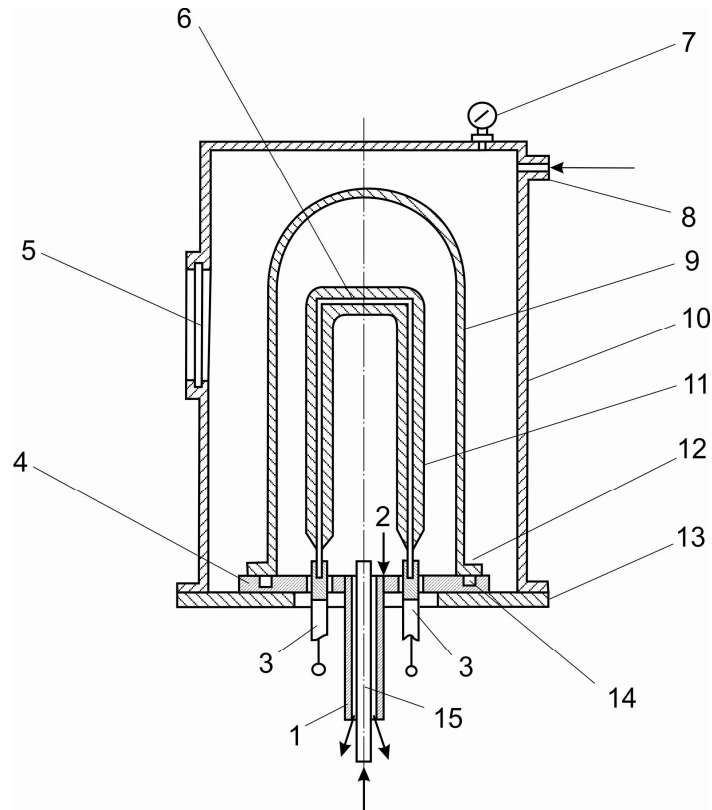
У реакторі проводять осадження кремнію на розігрівуючому електричним струмом стрижні-підложки. Газовий пульт служить для забезпечення подачі вихідних реагентів – хлорсиланів і водню в реакційний об'єм у заданому співвідношенні й кількості, а також для виконання проміжних операцій – продувки реактора інертним газом (азотом), забезпечення герметичності реакційної камери і т.д.

Призначення блоку електроживлення - підвід електричної потужності до стрижнів кремнію й забезпечення необхідної температури осадження. Блок керування дозволяє підтримувати оптимальні параметри процесу.

Застосовують реактори або з кварцовим, або з металевим ковпаком. Схема реактора із кварцовим ковпаком представлена на рис. 4.49 [4]. У простір між зовнішнім металевим автоклавом і кварцовим реактором (ковпаком) подається інертний газ, який притискає кварцовий ковпак до піддону й забезпечує герметичність реакційного простору. Основа реактора (піддон) вкрита шаром срібла; струмопідводи також виготовляють із срібла. Для зменшення впливу реакційних газів основу реактора додатково покривають шаром кварцових пластин. Використання в конструктивних елементах реактора таких матеріалів, як кварц, срібло, високочистий графіт, забезпечує високу якість одержуваного полікристалічного кремнію.

У реакторах даного типу вдається одержувати кремнієві стрижні до 2 м довжини й діаметром до 0,18 м, при цьому швидкість осадження кремнію становить 0,3...0,4 кг/година (при ви-

користанні в якості вихідної сировини трихлорсилану); витрата електроенергії 430...540 МДж/кг.



1) труба для виводу газів; 2) срібне покриття; 3) струмопідводи; 4) металева основа; 5) вікно для спостереження; 6) кремнієвий стрижень; 7) манометр; 8) патрубок для подачі ущільнюючого газу; 9) кварцовий ковпак; 10) автоклав; 11) кремнієві стрижні-підложки; 12) фланець кварцового ковпака; 13) металевий піддон; 14) кільцеве гумове ущільнення; 15) сопло для подачі парогазової суміші

Рисунок 4.49 – Схема реактора із кварцовим ковпаком для одержання кремнієвих стрижнів [4]

Основними труднощами при експлуатації реакторів із кварцу є створення умов рівномірного охолодження ковпака під час осадження кремнію. Крім цього, на стінках ковпака осідає тонкий шар кремнію, який ускладнює контроль процесу. У зв'язку із

цим через певний час ковпак необхідно знімати й чистити. Істотними недоліками кварцових ковпаків є їхня висока вартість і низька механічна міцність.

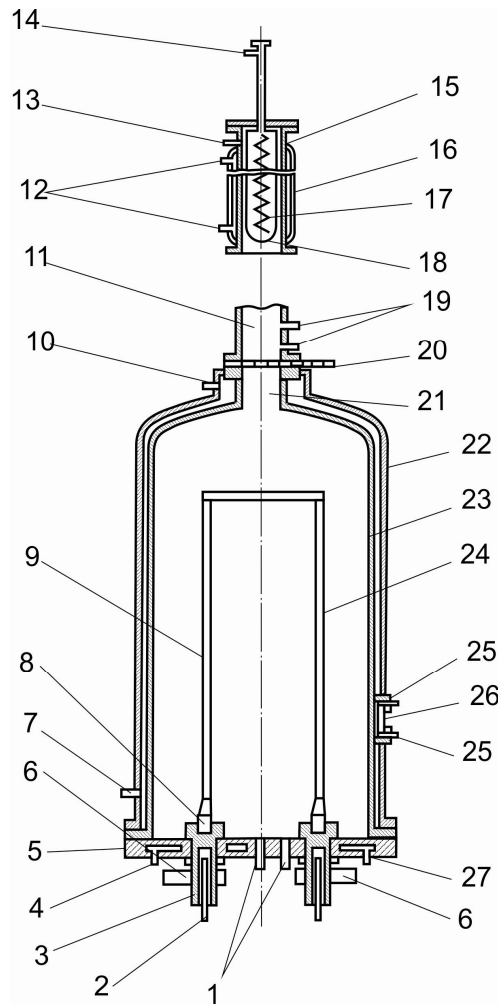
Габарити вироблених у цей час кварцових ковпаків обмежують розміри реакційної камери й число стрижнів у реакторі водневого відновлення трихлорсилану. Внаслідок цього в сучасній технології одержання полікристалічного кремнію все більше поширення одержують реактори з металеві водоохолоджувальної камери. За даними, отриманими у роботі [4], вміст мікродомішок у кремнії, одержуваному в металевому водоохолоджувальному реакторі, не вище, ніж у кремнії, одержуваному в реакторі із кварцу, хоча витрата електроенергії трохи більше (до 720...980 МДж/кг).

На рис. 4.50 представлена принципова схема металевого водоохолоджувального реактора, запатентованого фірмою "Вакер" (ФРН). Подібна конструкція реактора дає можливість одержувати стрижні діаметром до 0,2 м і довжиною до 2 м. Швидкість осадження кремнію при цьому досягає 5,4 кг/год.

Існує модифікація металевого реактора, у якому реакційна камера охолоджується за допомогою масла, а стінки камери дзеркально відполіровані. Така конструкція дозволяє виключити ймовірність попадання вологи в реакційний об'єм і виникнення внаслідок цього аварійної ситуації, а також сприяє зниженню енерговитрат. Витрата електроенергії при цьому < 250 МДж/кг.

Для одержання рівномірного теплового поля в реакторі й виробництва щільних стрижнів кремнію великого діаметра із дрібнокристалічною структурою прагнуть створити такий реактор, щоб стрижні якнайдалі знаходились оди від одного. Для зниження теплового впливу запропоновано між стрижнями встановлювати екран, покривати внутрішню поверхню реактора шаром золота або срібла та ін. Завдяки цьому знижується різниця температур між периферійною й центральною частинами реактора й поліпшується геометрія стрижнів.

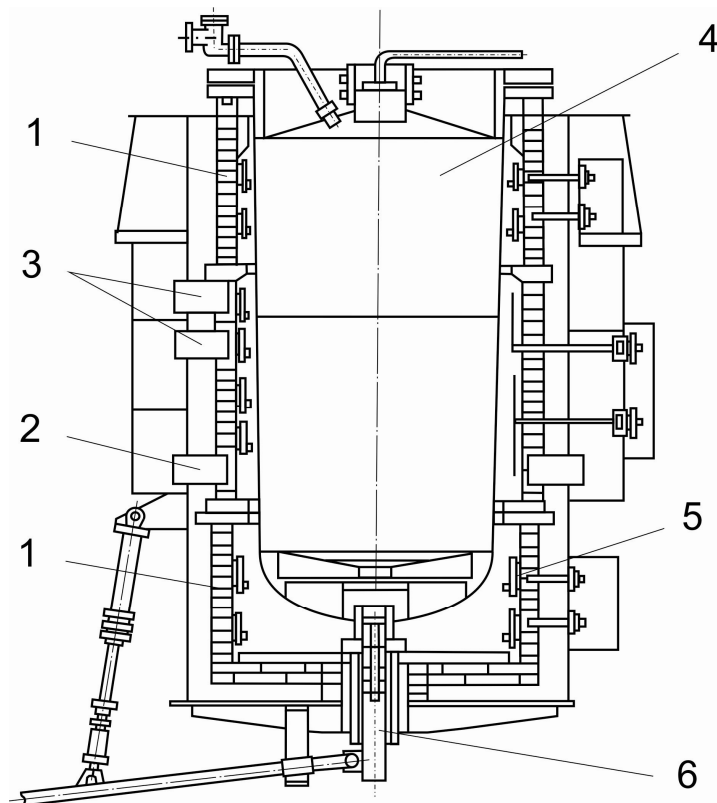




1) патрубки для подачі й відводу парогазової суміші; 2) патрубков для підведення води для охолодження; 3) штуцер для відводу води; 4, 27), відводячий та підводячий штуцери для охолоджуваної води; 5) металева підстава, вкрита сріблом; 6) контакти для підведення електричної потужності; 7, 10) введення й виведення води для охолодження реактора; 11) охолоджуючий горщик; 12) штуцери для охолоджуючої води; 13) штуцер для виводу газу; 14) штуцер для подачі аргону; 15) сталевая циліндрична сорочка; 16) охолоджуюча сорочка; 17) електрична спіраль; 18) кварцовий циліндр; 19) подача й відвід охолоджуючої води; 20) шибер; 21) горловина; 22) зовнішня сталевая сорочка; 23) внутрішня сорочка реактора; 24) кремнієвий міст; 25) підведення й відвід води для охолодження; 26) кварцовий ілюмінатор

Рисунок 4.50 – Металевий водоохолоджувальний реактор [4]

Схема установки відновлення тетрахлорида титану представлена на рис. 4.51. Установка складається з електричної шахтної печі, апарата відновлення, комунікацій підведення  $TiCl_4$ , аргону, води, обладнання для контролю й регулювання процесу. Піч, яку футерують вогнетривкою й теплоізоляційною цеглою, використовується для нагрівання апарата.



1) електропіч; 2) канал для відводу гарячого повітря; 3) фурми для підведення холодного повітря; 4) апарат для відновлення; 5) нагрівачі; 6) зливальна труба

Рисунок 4.51 – Схема апарата відновлення тетрахлорида титану [7]

На внутрішній поверхні футерівки підвішені ніхромові нагрівачі, які розподіляються по двом – чотирьом зонам. У печі є система охолодження, що полягає з обладнання для подачі холодного й відводу гарячого повітря. У нижній частині печі є от-

вір для проходження зливального обладнання. Там же розташовано два кронштейни для кріплення важеля й пневмоциліндру приводу вузла зливу хлористого магнію. Для виміру температури поверхні зовнішньої стінки реактора на рівні кожної електричної зони є отвори для введення термопар. Основний елемент апарата відновлення – реторта – являє собою циліндр, виготовлений, як правило, з нержавіючої сталі марки 12X18H10T товщиною 15...25 мм зі сферичним днищем і водоохолоджувальним фланцем. На фланці реторти є кільцевий лаз для розміщення гумової прокладки. До днища реторти приварений патрубковий фланець для приєднання зливального обладнання. Кришка апарата служить для його герметизації. На ній розміщені вузли подачі в апарат вихідних речовин і інертного газу. Кришку заглиблюють в реторту на 250...350 мм, що виключає наявність в апараті холодної зони й знижує тим самим можливість утворення нижчих хлоридів титану.

Несправжнє днище апарата служить опорою для блоку губчастого титану. Воно запобігає влученню титану, що утворюється, в отвір зливального обладнання й створює простір між днищем реторти й блоком губчастого титану, у якому накопичується хлористий магній. Несправжнє днище являє собою металевий диск зі сталі 12X18H10T товщиною 20...50 мм, посилений знизу ребрами жорсткості.

Зливальне обладнання – один з найбільш важливих вузлів апарата відновлення. Основні вимоги, які висуваються до зливального обладнання, – надійність і зручність в обслуговуванні. У міру збільшення габаритів апаратів здійснений перехід до розміщення зливального обладнання внизу реторти.

На більшості підприємств конденсація магнію й  $MgCl_2$  при вакуумній сепарації реакційної маси проводиться в оборотну реторту [6, 7]. Тому в підготовленому до складання апарату вже перебуває частина необхідного для процесу відновлення магнію. Зібраний апарат відновлення встановлюють у піч, приєднують до комунікацій і нагрівають до 673...773 К з одночасним вакууму-

ванням для зневоднювання конденсату. Потім апарат заповнюють аргоном до тиску 0,005...0,03 МПа й нагрівають до 1073...1093 К. Після розплавлення конденсату хлористий магній зливають із апарата. Потім за допомогою вакуумного ковша доливають необхідну кількість рідкого магнію. Після нагрівання апарата зі знову введеним магнієм до 1073 К в апарат починають подавати тетрахлорид титану з одночасним охолодженням стінок реактора повітрям. Через кожні 150...300 кг поданого тетрахлориду титану з апарата зливають відповідну кількість утвореного хлориду магнію.

Режим зливів хлористого магнію – важливий параметр процесу відновлення, тому що він визначає розташування реакційної зони, кількість утвореного гарнісажу, впливає на розподіл температур і на тиск в апараті. Якщо маса злитого хлористого магнію відповідає масі утвореного, то рівень розплаву, а отже, і реакційної зони буде поступово знижуватися. Для підтримки рівня магнію на висоті, відповідної до розташування зони охолодження печі, необхідно коректувати кількість хлористого магнію, що віддаляється з апарата, з урахуванням відмінності питомих ваг металевого магнію і утвореного титану. Збільшення кількості хлористого магнію, що зливається, понад оптимального приводить до утворення великої кількості гарнісажу, що ускладнює витяг блоку з реактора, знижує якість титанової губки. Зменшення кількості хлористого магнію, що зливається, спричиняє переміщення зони реакції у верхню частину апарата й, як наслідок, утворення тут значної кількості титанової губки, що ускладнює відділення від неї хлористого магнію на наступному технологічному переділі – вакуумної сепарації. Крім того, протікання реакції у верхній частині може викликати перегрів кришки апарата, тобто оплавлення й забруднення титанової губки залізом.

Іншим важливим технологічним параметром процесу відновлення є режим подачі тетрахлориду титану, тому що він значною мірою визначає структуру утвореної титанової губки і її якість.

Після припинення подачі  $TiCl_4$  апарат витримують у печі протягом 1 години при 1123 К, потім, як можна більш повно, зливають хлористий магній. У печі апарат прохолоджують до 873...923 К, після чого його витягають і встановлюють у холодильник. Апарати відновлення так званого напівсполученого типу після охолодження в печі відразу направляються на спеціальний стенд для монтажу на процес вакуумної сепарації. Це дає можливість зберегти частину акумульованого реактором тепла й за рахунок цього значно знизити витрати електроенергії при наступному процесі вакуумної сепарації.

При проведенні процесу відновлення необхідно підтримувати в заданому діапазоні температуру зовнішніх стінок реторти, тиск у ній і стабілізувати витрати тетраоксида титану.

#### **4.6 Установки одержання монокристалів**

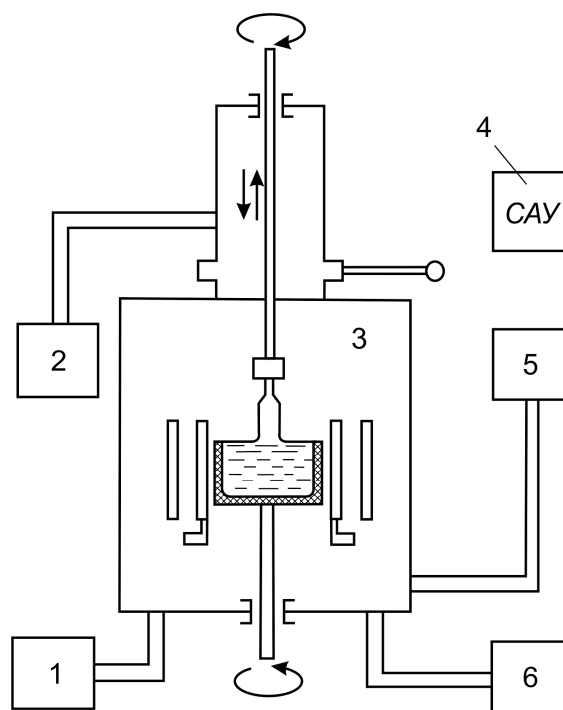
Вирощування монокристалів кремнію з розплаву в промислових умовах здійснюють за методом Чохральського й безтигельною зонною плавкою. В 1988 р. ~ 85 % від загального обсягу виробництва монокристалів кремнію було вирощено за методом Чохральського й 15 % безтигельною зонною плавкою [4].

Сучасна установка для вирощування монокристалів кремнію за методом Чохральського є складним комплексом технічних засобів, які складаються з камери з механізмами обертання верхнього й нижнього штоків, вакуумного агрегату, системи електроживлення, блоку очищення, подачі й регулювання витрати інертного газу, блоку водяного охолодження й системи автоматичного керування процесом.

Установки вирощування класифікують за масою матеріалу, що завантажується в тигель (10 кг; 10...20; 20...60; > 60); за методом роботи установки: періодичні – за один цикл проводять один процес, напівнеперервні – послідовно проводять від трьох до п'яти процесів; за конструкцією приводу обертання й перемі-

щення кристала: підвіска запалу на гнучкому елементі або трубчастий порожній водоохолоджуваний шток, довжина якого порівнянна з довжиною кристала; за конструкцією нагрівача: однофазні, трифазні.

Основні тенденції в розвитку конструкцій установок (рис. 4.52) одержання монокристалів з розплаву пов'язані зі збільшенням маси одиничного завантаження до 69 кг та більше, повною автоматизацією процесу вирощування починаючи із закриття камери печі після її завантаження й закінчуючи охолодженням вирощеного монокристала.



1) вакуумний агрегат; 2) блок подачі й регулювання інертного газу; 3) камера із шибєрним устаткуванням; 4, 5) системи автоматичного керування й електроживлення відповідно; 6) блок водяного охолодження

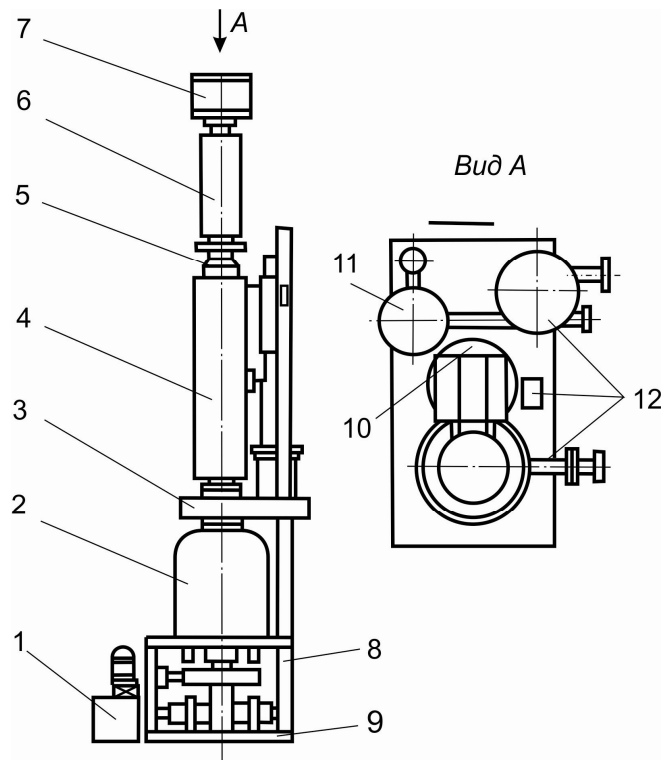
Рисунок 4.52 – Блок-схема установки вирощування монокристалів з розплаву за методом Чохральського [4]

Збільшення маси завантаження, автоматизація процесу дозволяють суттєво підвищити економічну ефективність процесу в цілому. Встановлена залежність собівартості вирощуваних монокристалів від величини завантаження й діаметру монокристала. Виявилось, що собівартість монокристалів мінімальна при вирощуванні їх діаметром 150 мм із завантаження 60 кг.

Найпоширенішими вітчизняними установками є "Редмет-15" і "Редмет-30", які призначені для одержання монокристалів у періодичному або напівнеперервному режимі вирощування із завантаження 16...30 кг. Основні технічні параметри установок: потужність встановлена 160 кВт, споживана < 90 кВт, максимальна температура на нагрівачі 1870 К, довжина монокристалу  $\leq 1500$  мм. Принципова схема компонування основних вузлів установки представлена на рис. 4.53.

Нижня камера циліндричної форми, виготовлена із хромо-нікелевої нержавіючої сталі марки 1Х18Н9Т або сталь 20, має сорочку водяного охолодження. Камера складається із трьох основних частин: ковпака, корпусу й піддону. В отворах на піддоні кріпляться вакуумно-ущільнені струмопідводи, у центрі піддона розміщений вузол ущільнення штока тигля. На сферичній частині ковпака розміщений майданчик, призначений для кріплення оптичного блоку системи автоматичного регулювання діаметра кристалу. Усі елементи камери ущільнюються прокладками з вакуумної гуми. На верхній і нижній частинах установки розміщені механізми приводів обертання й переміщення штоків тигля й затравки. Колона призначена для механізованого монтажу й демонтажу камери печі.

Вакуумно-газова система складається з вакуумного агрегату, трубопроводу із сильфонним компенсатором, фільтра, вентиля вакуумного запірною, датчиків тиску й клапана, що служать для запобігання камери печі від внутрішнього надлишкового тиску. Фільтр призначений для вловлювання монооксиду. У якості фільтруючого матеріалу застосовується тканина типу "Нітрон".



1) гідравлічний привід; 2, 4) нижня й верхня камери відповідно; 3) шибер; 5) кришка; 6, 7) механізми обертання й переміщення затравки відповідно; 8) механізм обертання й переміщення тигля; 9) рама; 10) колона; 11) система охолодження; 12) вакуумно-газова система

Рисунок 4.53 – Схема компонування основних вузлів установки "Редмет" [4]

Інертний газ надходить через стабілізатор тиску в блок подачі аргону, що складається із запірних і регулюючих вентилів, ротаметру й манометру, призначених для виміру тиску й регулювання витрати аргону, котрий подають в камеру електропечі.

Шибер розташований між нижньою й верхньою камерами й призначений для реалізації способу напівнеперервного вирощування кристалів. Електропіч монтують на індивідуальному фундаменті з метою зменшення вібрації розплаву.

Вимір, контроль, автоматичне регулювання температури й напруги на нагрівачі, діаметру вирощуваного монокристала здій-



снюються комплексом керування технологічним процесом вирощування кристалів типу КМ 3111. Комплекс забезпечує вирощування монокристалів в автоматичному режимі.

Тепловий вузол містить у собі підставку для тигля, нагрівач, систему екранів. Конструкція теплового вузла практично багато в чому визначає особливості кристалізації, макро- і мікроструктуру вирощуваного монокристала, розподіл у ньому легуючих домішок. Тепловий вузол як технологічна система містить взаємозалежні елементи, тобто варіюючи конструкцію декількох елементів, можна одержувати практично ідентичні умови вирощування монокристалів.

Розглянемо вплив основних конструктивних елементів теплового вузла на особливості одержання монокристалів кремнію за методом Чохральського.

Екранування – це система теплових екранів і елементів, які активно впливають на градієнти температури в розплаві й зростаючому кристалі. Екранування виконує дві функції: з одного боку, суттєво зменшує втрату теплоти, з іншого боку – забезпечує створення заданих температурних градієнтів у зоні росту кристала й розплаву з метою одержання заданих властивостей вирощуваних монокристалів. Усі системи застосовуваних екранувань умовно підрозділяються на два типи: відкриті й закриті. При вирощуванні монокристалів з відкритого екранування у зоні кристалізації створюються більш високі температурні градієнти, ніж при вирощуванні в закритій системі. Вибір екранування і його особливості обумовлені залежністю якості одержуваних монокристалів від умов вирощування.

Бічне екранування, як правило, складається з першого, близького до нагрівача, графітового екрана, за яким розташовуються ще два або три графітові або молібденових екрани. Раніше для цих цілей використовували екрани зі спеченого кварцу. В останні роки у зв'язку з розробкою нових видів високотемпературних матеріалів на основі графіту використовується наступне екранування. На перший екран намотуються кілька шарів вуглеграфітової

тканини або повсті, що володіють високими теплоізоляційними властивостями. Донна частина екранування складається з декількох графітових екранів, на яких розташовується вуглеграфітова повсть, яка у випадку протоки розплаву кремнію захищає від ушкодження піддон камери печі. На верхньому торці бічного екрану розташовують якщо буде потреба плоский (або іншої форми) стельовий екран.

В установках з резистивним нагріванням використовують два основні типи нагрівачів різної модифікації: з бічним і донно-бічним нагріванням.. Нагрівачі з донно-бічним нагріванням, як правило, застосовуються при завантаженні в тигель до 4...6 кг; при великих завантаженнях використовуються нагрівачі з бічним нагріванням. Постійний або змінний електричний струм до нагрівача подають по водоохолоджувальним струмопідводам, що проходять через піддон камери.

Використання трифазного змінного струму для живлення нагрівача приводить до додаткового сильного перемішування розплаву, при якому різко збільшується концентрація кисню й зростають розкиди питомого електричного опору в поперечних перерізах монокристалів. Тому найбільше поширення одержали джерела постійного струму.

На сучасних установках вирощують монокристали в потоці інертного газу при абсолютному тиску  $(0,27...4) \cdot 10^3$  Па. Інертний газ, найчастіше аргон або гелій, подається в камеру вирощування на поверхню розплаву через газоподавальну трубу, встановлену коаксіально вирощуваному монокристалу. Інертний газ захоплює частки випареного з поверхні розплаву монооксиду кремнію й несе їхніми потоками, створюваними вакуумним агрегатом. Головна вимога до подаючої та системи, що відводить газ, – запобігти осіданню монооксиду на деталях екранування, тому що протягом процесу вирощування можливе відшаровування часток монооксиду й влучення їх у розплав. Потрапляючи на фронт кристалізації, такі частки можуть бути причиною утворення дисло-

кацій у зростаючому бездислокаційному монокристалі, появи двійників та ін.

В установках "Редмет-15" і Редмет-30" для створення вакууму використовуються форвакуумні насоси НВЗ-75, агрегати АВР-150. Верхній і нижній шток ущільнюються за допомогою манжетів.

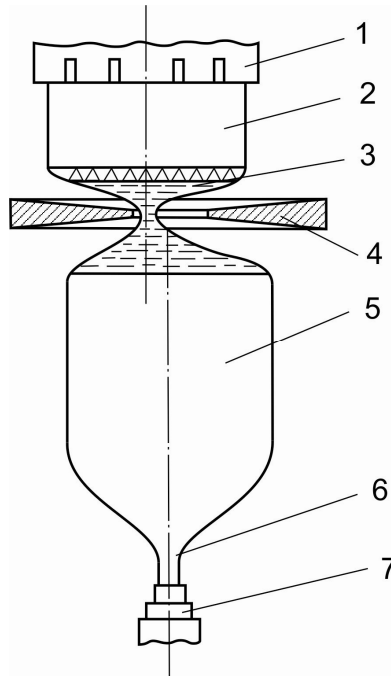
Вакуумний агрегат, відкачуючий повітря із плавильної камери перед початком процесу або інертний газ із продуктами плавки (монооксид кремнію) протягом процесу, повинен у холостому режимі (без плавлення) створювати в камері розрідження  $< 4$  Па. Важливим показником нормальної роботи вакуумного агрегату є стабільність, що перевіряється перед кожною плавкою, вакууму, фіксованого за показниками приладу, що вимірює тиск у камері. Після відкачки повітря з камери вирошування перевіряють натікання, що є найважливішим показником стану встаткування. Натікання повинне становити  $< (1,33 \dots 6,65) \cdot 10^4$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup> $\cdot$ с<sup>-1</sup>. При більш високих значеннях натікання необхідно знайти (за допомогою гелієвих шукачів течій різної конструкції) і усунути течу. Крім вакуумних теч, можливо також утворення мікроплинів води по внутрішній поверхні камери, які виявляються візуально.

Система подачі інертного газу в камеру повинна бути герметичною й перебувати під тиском до  $1,72 \cdot 10^5$  Па. Вона не повинна мати течу; її справність перевіряється намілюванням вузлів і з'єднань. В електроприводах установки використовуються безвібраційні двигуни. Система автоматичного керування (САК) процесом вирошування на установках типу "Редмет" містить у собі мікропроцесори, завданням яких є узгодження температурних і швидкісних параметрів процесу за заданою програмою для забезпечення постійного діаметру кристалу. Датчиком діаметра є електронно-оптична система із чутливим фотоелементом, на який подається сигнал, відбитий від меніска стовпчика розплаву.

Одним з основних недоліків одержання монокристалів кремнію за методом Чохральського є забруднення розплаву матеріалом кварцового тигля, що частково розчиняється. При цьому в

розплав у значних кількостях переходять кисень і ряд інших домішок, наявних у кварцовому тиглі.

Для усунення цього явища був запропонований метод безтигельної зонної плавки, відмінна риса якого – створення в стрижню зони розплаву без застосування контейнера. Схема методу безтигельної зонної плавки наведена на рис. 4.55.



1) затиск для кріплення полікристалічного стрижня (заготовки); 2) полікристалічний стрижень (заготовка); 3) розплавлена зона; 4) індуктор; 5) зростаючий монокристал; 6) монокристалічна затравка; 7) затиск для кріплення затравки

Рисунок 4.55 – Схема безтигельної зонної плавки [4]

Кремнієвий стрижень закріплюють вертикально в камері установки в спеціальному тримачі. З боку одного з кінців стрижня розташовують затравочний кристал. Зону розплаву створюють у вертикально розташованому стрижні. У якості джерел нагрівання при створенні зони розплаву можуть бути використані: радіаційний, електронно-променевий, електродуговий, індукційний і ін. Необхідною умовою при виборі джерела нагрівання є ви-

ключення (або мінімальна) можливості забруднення стрижня кремнію.

Із зазначених методів промислове поширення одержав високочастотний (індукційний) метод нагрівання, коли стрижень кремнію охоплюється кільцевим індуктором (рис. 4.54), по якому пропускають електричний струм високої частоти. Створюване цим струмом змінне магнітне поле викликає в зразку вторинний струм, який нагріває й розплавляє частину стрижня кремнію. Так як струм, що пропускають через індуктор, високочастотний, то вторинний струм у зразку створюється лише в поверхневому шарі стрижня в області індуктора. За рахунок цього вдається сконцентрувати електромагнітне випромінювання на вузькій ділянці стрижня й розігріти його.

Високочастотний струм виявляє ще й електродинамічний вплив (тиск) на поверхню, що нагрівається, що також необхідно враховувати при створенні зони розплаву й проведенні процесу плавки.

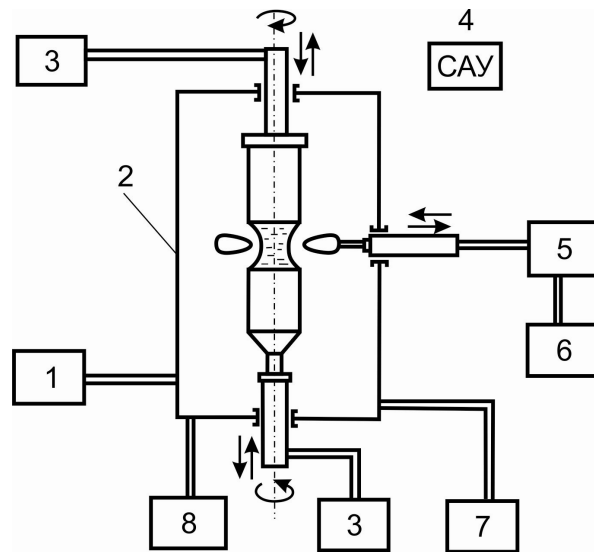
Таким чином, на стійкість зони розплаву виявляють вплив три сили: гідростатичний і електродинамічний тиск і поверхневий натяг. Для вирощування кристалів дуже важливо визначити оптимальне співвідношення цих сил, тому що при цьому не тільки процес плавки буде стійкий, але й з'явиться можливість одержання кристалів кремнію із заданими властивостями.

Визначальною при розробці індукційних систем для плавки кристалів кремнію різних діаметрів є наведена максимально припустима величина висоти зони розплаву. Для стрижнів  $< 30$  мм застосовують індуктори, діаметри яких більше діаметра кристала. Однак уже при діаметрі 30 мм на вихідному кристалі, що плавиться, утворюється конус, вершина якого втоплена в розплаві. Це викликане збільшеним тепловідведенням з поверхні зони розплаву (у порівнянні із плавкою кристала меншого діаметра) і погіршенням умов плавлення вихідного кристала через видалення від індуктору. Подальше збільшення діаметра кристалу (відповідно й індуктору) приводить до збільшення висоти конусної

частини на вихідному кристалі до сполуки її із частиною кристала, що кристалізується. У результаті виникає неповне проплавлення зони й процес плавки припиняється.

Для забезпечення повного проплавлення вихідного кристала в області зони розплаву можна змістити вихідний стрижень у площині, перпендикулярній напрямку вирощування, і тим самим наблизити індуктор до осі злитка. За рахунок такого розташування стрижня й індуктора підсилюється прогрів центральної частини стрижня. Недоліком такого прийому плавки є викривлення форми зони розплаву й зниження її стійкості.

Обладнання для індукційної безтигельної зонної плавки – це комплекс складних, тісно взаємозалежних систем. Установка (рис. 4.56) складається з механічної, вакуумної, газової, високочастотної й контрольно-вимірювальної систем.



1) блок подачі й регулювання потоку газів; 2) камера; 3) блок керування приводами; 4) система автоматичного керування процесом; 5) високочастотний генератор; 6) блок керування генератором; 7) блок водяного охолодження; 8) вакуумний блок

Рисунок 4.56 – Блок-схема установки безтигельної зонної плавки [4]

Механічна система установки забезпечує переміщення й обертання тримачів, стрижнів, що плавиться й зростаючого, а також індуктора. При цьому вузли приводів, що забезпечують задані рухи, повинні забезпечувати високу точність параметрів як у статичному, так і в динамічному режимах роботи. Крім цього, механічна система повинна виключати можливість виникнення вібрації, тому що остання приводить до значного погіршення процесу плавки.

Вакуумна система повинна забезпечувати проведення процесу плавки при тиску  $\leq 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. При плавці в газовому середовищі в камері вирощування створюється тиск до  $1,72 \cdot 10^5$  Па й при необхідності забезпечується потік газу в кількості до 50 л/хв. Найбільш важливим завданням вакуумно-газової системи є забезпечення максимальної чистоти процесу вирощування кристалів.

Високочастотна система установки включає силовий блок (блок живлення) і високочастотний генератор, вихідним елементом якого є індуктор. Звичайно використовувані в промисловості генератори працюють у діапазоні частот 1,7...5,3 МГц (основних складових високочастотного струму генератора).

Вибір режиму й забезпечення надійності роботи генератора мають першорядне значення. При цьому надзвичайно важливо досягти такої роботи генератора, при якій потрапляючий на індуктор струм переважно містить основну частоту. Особливо важливо не допускати в робочому струмі індуктора вищих гармонійних складових (максимальне їхнє втримування в струмі не повинне перевищувати 5 %).

Потужність високочастотного генератора, необхідна для проведення плавки, визначається тепловою потужністю, затрачуваною на розплавлення стрижнів кремнію певного діаметра, і втратами в електричній схемі генератора (к.к.д.).

Враховуючи (на основі експериментальних даних), що сумарно для індуктора й системи коливальних контурів

к.к.д.  $\approx 0,25$ , для оцінки потужності генератора необхідно теплову потужність плавки збільшити в 4 рази.

Контрольно-вимірювальна й регулююча системи установки є найважливішою складовою частиною. З її допомогою забезпечується необхідна точність регульованих параметрів процесу плавки. При вирощуванні кристалів керують наступними основними параметрами: потужністю, що виділяє індуктор, швидкостями вирощування й обертання тримачів стрижня.

У ході плавки потужність може мінятися через коливання в живильному генератор електричної мережі й змін характеристик елементів схеми генератора. Коливання потужності приводять до впливів, що обурюють, на зону розплаву й, як наслідок, на параметри вирощуваного кристала. Для виключення коливань потужності застосовують стабілізацію живильну генератор напругу електричної мережі й напругу на індукторі.

Таку ж обурюючу дію на зону розплаву виявляє й зміна швидкості вирощування й обертання тримачів кристала. При цьому змінюються висота й форма зони розплаву, форма фронту кристалізації й плавлення, потоки в зоні розплаву. Промислові установки для вирощування монокристалів обладнані спеціальними стабілізуючими пристроями, що забезпечують коливання зазначених параметрів  $< 0,5 \%$  від заданої величини.

Одним з важливим параметрів плавки є автоматична підтримка в процесі вирощування постійного діаметра кристалу. Це дозволяє збільшити продуктивність праці апаратника (оператора) за рахунок збільшення кількості обслуговуючих установок, стабілізувати умови кристалізації й знизити кількість відходів при обробці монокристалу. Для контролю й стабілізації діаметра вирощуваного кристала в цей час розроблене досить багато пристроїв. Принцип роботи цих пристроїв заснований на прямому вимірі величини діаметра за допомогою оптичних систем або непрямою вимірі частоти й напруги високочастотного контуру генератора. При відхиленні вимірюваних характерних величин в пристрої виробляється відповідний сигнал, який подається на



блоки керування приводами установки або генератора. Для забезпечення надійності система керування в сучасних установках забезпечується електронно-обчислювальними комплексами, за допомогою яких програмується процес плавки.

Використовувані в цей час установки мають принципово різні схеми: з рухливим і стаціонарним індукторами. При стаціонарному індукторі верхній і нижній штоки поступально переміщуються для просування злитка щодо індуктора. Для оперативного керування процесом плавки індуктор може зміщуватися в горизонтальній площині.

При використанні схеми з рухливим індуктором один шток (звичайно нижній) залишається нерухливим, а верхній має невелике осьове переміщення для можливості регулювання параметрів зони розплаву. У цій схемі індуктор також може зміщатися в горизонтальній площині.

При вирощуванні монокристалів великих діаметрів й довжини виникає проблема механічної стабільності кристала на тонкій затравці. При масі кристалів  $> 4$  кг необхідно застосовувати спеціальний пристрій, що підтримує вирощуваний кристал. По вирощуванню кристала певної довжини цей пристрій піднімається уздовж кристала й своїми окремими елементами фіксує його у вертикальному положенні. Застосування таких пристроїв дозволяє одержати кристали практично будь-якої маси.

Враховуючи основне призначення процесу безтигельної зонної плавки, до вибору матеріалу для виготовлення камери, штоків і іншого оснащення, що перебуває в камері, висувають особливі вимоги: низька пружність власного пару при температурі процесу, висока корозійна стійкість і відсутність феромагнітних властивостей. Крім цього, матеріал камери повинен витримувати багаторазові знакозмінні температурні й механічні навантаження. Це пояснюється тим, що плавка проводиться при 1700 К. Попередньо камера перед плавкою й після неї вакуумується й заповнюється інертним газом до надлишкового тиску.

Так як джерелом нагрівання кремнію є електромагнітне випромінювання, застосування феромагнітних матеріалів повинне бути виключене, оскільки вони нагріваються самі й забруднюють атмосферу вирощування. Усім цим вимогам задовольняє нержавіюча сталь марки 1Х18Н10Т, з якої виготовляють камеру, штоки, кріпильні елементи й технологічне оснащення.

### **Питання для самоконтролю**

- 1) Класифікація металургійних печей за джерелом тепловиділення.
- 2) Назвіть два класи паливних печей.
- 3) Особливості роботи автогенних металургійних печей.
- 4) Конструкція відбивних плавильних паливних печей.
- 5) Конструкція рафінуючих печей, що нахиляються.
- 6) Конструкція двокамерної відбивної печі.
- 7) Де в основному застосовують двокамерні відбивні печі?
- 8) Конструкція полум'яних нагрівальних печей.
- 9) Конструкція шахтних печей.
- 10) Конструкція трубчастих обертових печей.
- 11) Конструкція печей киплячого шару.
- 12) Конструкція КИЗЦЕТ-агрегату.
- 13) Конструкція нагрівальних електричних печей опору.
- 14) Конструкція плавильних електричних печей опору.
- 15) Конструкція індукційних каналних печей.
- 16) Конструкція індукційних тигельних печей.
- 17) Конструкція дугових руднотермічних печей.
- 18) Конструкція дугових вакуумних печей.
- 19) Конструкція електронно-променевих печей.
- 20) Конструкція агрегатів хлорування.
- 21) Конструкція апаратів ректифікаційного очищення.
- 22) Конструкція апаратів відновлення.
- 23) Конструкція установок вирощування монокристалів.

## 5 ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТІВ

Конструкція металургійного агрегату визначає: положення джерела тепловиділення, спосіб передачі тепла й економічність цього способу; тепловим режимом, що впливає на інтенсивність і розподіл тепловиділення; температурним режимом, що характеризує зміну температури робочої камери в часі й просторі, і газодинамічним режимом., що включає розподіл швидкостей і тиску в рухомому грубному середовищі. Теплова робота печей, таким чином, характеризується продуктивністю, питомою витратою енергії, тепловою потужністю, середнім тепловим навантаженням, витягом металу в готову продукцію, тепловим і температурним режимами. Ці теплотехнічні характеристики необхідні для порівняльної оцінки ефективності роботи печей, а також з'ясування значення мінливих умов експлуатації. Визначення зазначених характеристик, неможливо без розгляду матеріального й теплового балансів, а також теплових режимів, властивих печам вторинної кольорової металургії.

### 5.1 Теплова потужність

Тепловою потужністю називають найбільшу кількість тепла, яку можна подати в піч за одиницю часу за умови ефективного його використання. Одиницею виміру потужності є Вт (1 Вт = 1 Дж/с). Частина потужності, споживана піччю, витрачається на здійснення корисної роботи – нагрівання матеріалів. Вона поглинається матеріалами й тому називається засвоєною потужністю  $M_{зас}$ , інша частина вимушено губиться в навколишнє середовище –  $M_{втр}$ . Тому прийнято називати теплову потужність печі загальною потужністю:  $M_{заг} = M_{зас} + M_{втр}$ .

Для паливних печей безперервної дії

$$M_{\text{заг}} = B \cdot Q_H^P, \text{ кВт}, \quad (5.1)$$

де  $B$  – витрата палива, кг/с або м<sup>3</sup>/с;  $Q_H^P$  - нижча теплота згорання палива, кДж/кг або кДж/м<sup>3</sup>.

Для електричних печей:

$$M_{\text{заг}} = P(1 - \psi) \cdot 10^3, \text{ кВт}, \quad (5.2)$$

де  $P$  – споживана електрична потужність агрегату, Вт;  $\psi$  - коефіцієнт, що враховує втрати електричної енергії.

Якщо піч складається з декількох температурних зон (камер) і кожна із цих зон має автономне опалення, у розрахунках теплової потужності зони враховують кількість тепла, що надходить із сусідньої зони, і теплообмін випромінюванням між зонами.

При підігріві компонентів горіння палива й підвищення початкової температури оброблюваного матеріалу необхідна теплова потужність печі знижується.

У печах періодичної дії споживана теплова потужність змінюється в часі залежно від зміни теплосвоєння матеріалом і акумуляції тепла захисних засобів. Теплову потужність, споживану при виконанні тієї або іншої операції в печі періодичної дії, називають тепловим навантаженням. Відношення максимальної теплової потужності до мінімального теплового навантаження називають коефіцієнтом форсування  $K_{\text{фор}}$ :  $K_{\text{фор}} = M_{\text{max}} / Q_{\text{min}}$ . Максимальна потужність, мінімальне теплове навантаження й коефіцієнт форсування необхідні при виборі горілочних приладів.

Теплову потужність печі для оцінки інтенсивності виділення тепла й теплообміну часто характеризують теплонапругою вільного об'єму  $q_v$  (Вт/м<sup>3</sup>) і питомим теплосвоєнням  $q_{\text{пит}}$  (Вт/м<sup>2</sup>):

$$q_V = \frac{B \cdot Q_H^P \cdot 10^3}{V_{\text{віль}}}, \quad (5.3)$$

$$q_{\text{нм}} = \frac{B \cdot Q_H^P \cdot 10^3}{F_M}, \quad (5.4)$$

де  $V_{\text{віль}}$  – вільний об'єм робочого простору, у якому відбувається горіння палива, м<sup>3</sup>;  $F_M$  – ефективна (теплоприймаюча) поверхня матеріалу, м<sup>2</sup>.

## 5.2 Питома витрата тепла

Найважливішим показником теплової роботи печей є питома витрата тепла на одиницю придатної продукції (Дж/кг):

$$b = \frac{(M_{\text{заг}} + P) \cdot \tau}{G}, \quad (5.5)$$

де  $\tau$  - період роботи, година;  $G$  – маса придатної продукції, кг. Для агрегатів періодичної дії чисельник у формулі (5.5) – витрата енергії за цикл теплової обробки.

У практиці планування й аналізу витрати енергії прийнято користуватися питомою витратою умовного палива з теплотою згорання  $Q_{\text{см}}^P = 29310$  кДж/кг на одиницю випуску товарної продукції. Питому витрату умовного палива знаходять розподілом питомої витрати тепла палива на стандартну теплоту згорання умовного палива  $Q_{\text{см}}^P$  й виражають у кілограмах умовного палива на тонну товарної продукції (кг у.п./т).

Для переведення хімічного тепла натурального палива в умовні одиниці часто користуються тепловими еквівалентами  $K_E$ :

$K_E = \frac{Q_H^P}{Q_{cm}^P}$ . Тепловий еквівалент природного газу 1,16, рідкого палива (мазуту) 1,37.

При експлуатації печей, крім витрати енергії на випуск товарної продукції, мають місце витрати енергії на розігрів після гарячих і холодних ремонтів, на підтримку в печах високої температури при гарячих простоях. У деяких випадках технологічно необхідно повторювати теплову обробку (наприклад, при випуску підготовчих сплавів або при металургійному обробленні складного лома в печах).

Оцінку ефективності використання енергії й планування її споживання в металургійних печах ведуть на основі середньорічних норм витрати паливно-енергетичних ресурсів. Норма витрати палива або електроенергії – це плановий показник витрати у виготовленні одиниці продукції встановленого якості. У задачу нормування входить розробка на основі аналізу теплового балансу печі технічно й економічно обґрунтованих прогресивних норм витрати енергоресурсів. При розробці середньорічних норм витрати застосовують розрахунково-аналітичний метод (основний), а також експериментальний і розрахунково-статистичний методи. Розрахунково-аналітичний метод передбачає визначення норм витрати на основі розрахунків статей теплового балансу з урахуванням прогресивних показників використання енергоресурсів у проведенні витрат на розігрів печі після ремонту.

З урахуванням сезонної зміни погодних умов підприємства диференціюють середньорічні норми по кварталах року. Диференційовані норми витрати палива й електроенергії є основою для поточного аналізу ефективності використання енергоресурсів і для квартальної звітності. В основі сезонного диференціювання норм лежить аналіз змін прибуткової й видаткової частин теплового балансу. Дійсно, при сезонному зниженні температури дуття, палива й шихти нестача тепла для виконання технологічного процесу в печі повинен бути компенсований додатковим хімічним теплом палива або електричної енергії. Сезонна зміна тем-

ператури середовища, що оточує піч, улітку викликає зменшення, а взимку збільшення питомої витрати енергії за рахунок втрат тепла огороженням.

### 5.3 Продуктивність

Продуктивність – це кількість металу, що випускається з печі в одиницю часу (доба, рік) при повному дотриманні встановленої технології плавки. Продуктивність печей часто характеризують питомими показниками - тривалістю однієї плавки (у годинах) або питомим зніманням металу з 1 м<sup>3</sup> череню в добу, т/(м<sup>3</sup>·доба):

$$g = \frac{G}{F}, \quad (5.6)$$

де  $G$  – об'єм виробництва в добу, т/доба;  $F$  – площа череню, м<sup>2</sup>.

Оцінка продуктивності на основі геометричних розмірів печі найчастіше недостатньо надійна через невірогідність розмірів у кожному окремому випадку. Справа в тому, що об'єктивне порівняння печей по зніманню металу з одного квадратного метра череню буде мати місце тільки в тому випадку, якщо продуктивність віднесена до дійсної площі фактичного дзеркала ванни. Але фактична площа дзеркала ванни металу залежить від повноти завантаження ванни, її форми й зміни місткості в результаті відкладання настилу або зношування футерівки. Однак показник питомого знімання металу не стимулює збільшення площі череню полум'яних ванних печей, у яких передача тепла пропорційна поверхні нагрівання. Цей показник не може бути застосований також до електричних дугових і індукційних печей, до печей із заглибними пальниками та ін.

Тому кращим параметром є питома продуктивність, що визначається, як відношення абсолютного випуску продукції в одиницю часу до місткості агрегату:

$$g = \frac{G}{m}, \quad (5.7)$$

де  $m$  – місткість агрегату, т.

Продуктивність печі пропорційна кількості тепла, внесеного в робочий простір, а також залежить від величини теплових втрат. Тому оптимізація продуктивності – важливий фактор поліпшення техніко-економічних показників. Оптимізація може бути здійснена за мінімальної витраті палива, електроенергії, мінімальному окисненню металу, мінімальному переходу шкідливих компонентів шихти в розплав, по стійкості окремих елементів конструкції печі, по найменших витратах на переробку вторинної сировини й ін.

У багатьох випадках реальна продуктивність лімітується випадковими факторами організації виробництва, обмеженнями споживаної потужності, недостатньою продуктивністю допоміжного устаткування (наприклад, завантажувальних пристроїв, розливних машин та ін.) конструктивними недоліками агрегату й т.п.

Причинами зниження продуктивності можуть стати недостатня тяга або потужність дугтьових вентиляторів, підсмоктування повітря в робочий простір печі через незадовільний розподіл тисків, недостатній термічний опір футерівки й пов'язані із цим більші втрати тепла і т.д.

## 5.4 Тепловий дефіцит

Тепловий дефіцит - це кількість теплоти, яку потрібно повідомити вихідним матеріалам, щоб перетворити їх в 1 кг (або 1 т)



кінцевого продукту. В умовах постійного тиску середовища ця кількість теплоти дорівнює збільшенню питомої ентальпії

$$\Delta i = i_{кін} - i_{поч}, \quad (5.8)$$

де  $i_{кін}$  – ентальпія кінцевого продукту на виході з печі, кДж/кг;  $i_{поч}$  – ентальпія матеріалу при завантаженні в піч, кДж/кг кінцевого продукту.

Чим більше  $\Delta i$ , тим більше майбутня теплова робота печі, тим триваліше час теплової обробки, тим нижче продуктивність печі. Наприклад, при нагріванні холодних злитків і заготовок перед обробкою тиском  $\Delta i = 800 \dots 900$  кДж/кг, у мартенівській або дуговій сталеплавильній печі  $\Delta i = 1500 \dots 1900$  кДж/кг рідкої сталі, у доменній печі  $\Delta i = 10500 \dots 12500$  кДж/кг (МДж/т) рідкого чавуну.

Щоб зменшити витрату палива або електрики, потрібно прагнути до зменшення теплового дефіциту шляхом збереження ентальпії, отриманої матеріалом у попередньому металургійному переділі: рідкий чавун при виплавці сталі, гарячі злитки з рідкою серцевиною при нагріванні їх перед прокаткою і т.д.

## 5.5 К.К.Д печі

Знаючи продуктивність печі  $P$  і тепловий дефіцит  $\Delta i$ , можна знайти засвоєну потужність, тобто кількість теплоти, поглинену матеріалами в печі за одиницю часу (кВт):

$$M_{зас} = P \cdot \Delta i. \quad (5.9)$$

Відношення засвоєної теплової потужності  $M_{зас}$  до загальної потужності, споживаною піччю  $M_{заг}$ , називають коефіцієнтом корисної дії печі (к.к.д.)  $\eta_{кд}$ . При цьому не враховуються витрати

електроенергії на привід механізмів, що обслуговують піч: вентиляторів, димососів, завантажувальних і транспортуючих пристроїв. Тому  $\eta_{кд}$  показує тільки ступінь корисного використання енергії в робочому просторі агрегату. При економічній оцінці різних печей необхідно враховувати всі витрати енергії на їхню експлуатацію.

Величина  $\eta_{кд}$  коливається в широких межах. Найбільш низький це показник у печах, де доводиться витримувати нагрітий або розплавлений метал для здійснення технологічних процесів протягом тривалого часу. Наприклад, у термічних печах  $\eta_{кд}$  може бути на рівні 8...10 %, а в сучасних нагрівальних печах він може становити 50...85 %.

Крім поняття к.к.д. печі існує поняття коефіцієнт використання теплоти палива (к.в.т.) – для теплотехнічної оцінки палива й економічності його використання в печах. К.в.т. показує, яка частина загальної теплової потужності печі залишається в робочому просторі печі й використовується на здійснення корисної роботи й на покриття втрат теплоти в робочому просторі:

$$\eta_{вт} = \frac{Q_{зас} + Q_{nn}}{Q_{заг}} = \eta_{кд} + \frac{Q_{nn}}{Q_{заг}}, \quad (5.10)$$

де  $Q_{зас}$  – тепло, засвоєне матеріалом, кВт;  $Q_{nn}$  – тепло, що залишилося в робочому просторі печі, кВт;  $Q_{заг}$  – загальна кількість тепла, що потрапило в металургійну піч, кВт.

Таким чином, к.в.т. більше к.к.д. на величину відносних втрат теплоти в робочому просторі печі.

Мінімальне значення к.в.т. має піч, що працює на холостому ході, без матеріалів, що нагріваються. Максимальне значення к.в.т. мають електричні печі, у яких уся теплота залишається в робочому просторі. У паливних печах завжди є втрати теплоти з газами, що йдуть в атмосферу, тому в цих печах к.в.т. < 1. У теоретичній межі, якщо вся теплота димових газів, що йдуть, буде використана на підігрів повітря й палива, які повернуть їй у піч,

к.в.т. = 1,0. У сучасних паливних печах можна досягти значення  $\eta_{BT} \approx 0,9$ , тобто 90 % споживаною пиччою енергії залишиться в робочому просторі, а інша частина буде викинута в атмосферу.

Введення поняття к.в.т. дає можливість розділити загальну потужність печі на дві складових: робочу потужність  $M_{роб} = Q_{зас} / \eta_{BT}$  і потужність холостого ходу  $M_{хх} = Q_{nn} / \eta_{BT}$ . Робоча потужність забезпечує виконання пиччою корисної теплової роботи, потужність холостого ходу забезпечує підтримку печі при робочій температурі, коли в ній немає матеріалів, тобто ця потужність компенсує втрати теплоти.

### Вопросы для самоконтроля

- 1) Назовите основные теплотехнические характеристики работы металлургических печей.
- 2) Как определяют тепловую мощность металлургической печи?
- 3) Удельный расход теплоты.
- 4) Тепловые эквиваленты топлива.
- 5) Производительность металлургического агрегата.
- 6) Коэффициент полезного действия печи.
- 7) Коэффициент использования тепла.

## ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

1. Що є робочим видом енергії металургійних печей?

- а) тепло;
- б) електрика;
- в) плазма;
- г) тепло й електрика.

2. На які групи поділяють металургійні печі за технологічною ознакою?

- а) плавильні;
- б) нагрівальні;
- в) випалювальні;
- г) паливні;
- д) електричні.

3. У яких печах вихідна сировина змінює свій агрегатний стан?

- а) плавильних;
- б) нагрівальних;
- в) випалювальних;
- г) сушильних.

4. У яких печах вихідна сировина не змінює свій агрегатний стан?

- а) нагрівальних;
- б) плавильних;
- в) випалювальних;
- г) сушильних.

5. Електричні печі за принципом перетворення електричної енергії в теплову діляться на ...

- а) дугові;
- б) індукційні;
- в) печі опору;

- г) каналні;
- д) тигельні;
- е) шахтні.

6. Робоча камера печі містить у собі ...

- а) робочий простір;
- б) пристрій для одержання тепла;
- в) пристрій для утилізації тепла;
- г) димососи й пристрої газоочищення.

7. Що входить до складу допоміжного устаткування металургійної печі?

- а) дугтьові вентилятори;
- б) димососи;
- в) газоочищення;
- г) горілки;
- д) форсунки;
- е) електроди.

8. Що прагнуть забезпечити при розробці й експлуатації металургійних печей?

- а) максимальний тепловий потік до поверхні матеріалу;
- б) максимальне засвоєння тепла матеріалом;
- в) велику витрату палива;
- г) високу витрату матеріалів;
- д) низьку швидкість кристалізації розплаву.

9. Що мають на увазі під поняттям «зовнішнього завдання» стосовно до металургійних агрегатів?

- а) умови теплообміну між зовнішнім середовищем і матеріалом, що нагрівається;
- б) умови теплообміну між зовнішнім середовищем і металургійним агрегатом;
- в) умови теплообміну усередині металургійного агрегату;

г) умови теплообміну усередині матеріалу, що нагрівається.

10. Що мають на увазі під поняттям «внутрішнього завдання» стосовно до металургійних агрегатів?

- а) умови теплообміну усередині матеріалу, що нагрівається;
- б) умови теплообміну між зовнішнім середовищем і матеріалом, що нагрівається;
- в) умови теплообміну усередині металургійного агрегату;
- г) умови теплообміну між зовнішнім середовищем і металургійним агрегатом.

11. Які види теплообміну характерні для умов «внутрішнього завдання»?

- а) теплопровідність;
- б) конвекція;
- в) теплове випромінювання;
- г) теплоємність.

12. В основі матеріального балансу в металургійному агрегаті лежить ...

- а) закон збереження матерії;
- б) закон збереження енергії;
- в) тепловий баланс процесу;
- г) розрахункові формули.

13. Матеріальний баланс можна скласти на ...

- а) одиницю часу;
- б) один цикл;
- в) одиницю готової продукції;
- г) одиницю вихідної сировини.

14. З якою метою складають тепловий баланс металургійного агрегату?

- а) щоб установити витрату енергії на процес;

- б) щоб скласти рівняння матеріального балансу;
- в) щоб оптимізувати витрату вихідної сировини;
- г) щоб визначити час роботи агрегату.

15. Тепловий баланс може бути складений на ...

- а) одиницю вихідних матеріалів;
- б) одиницю часу;
- в) період роботи агрегату;
- г) одиницю кінцевого продукту.

16. Яка основна стаття приходу тепла в тепловому балансі?

- а) тепло, що виділилося при спалюванні палива;
- б) фізичне тепло, внесене повітрям на спалювання;
- в) фізичне тепло, внесене паливом;
- г) тепло, що виділилося в результаті хімічних реакцій в оброблюваному матеріалі.

17. Як називають кількість металу, що випускається з печі в одиницю часу при повному дотриманні встановленої технології?

- а) продуктивністю печі;
- б) тепловою потужністю печі;
- в) питомою витратою тепла;
- г) робочою місткістю печі.

18. Як називають найбільша кількість тепла, яку можна подати в піч за одиницю часу за умови ефективного його використання?

- а) тепловою потужністю печі;
- б) продуктивністю печі;
- в) питомою витратою тепла;
- г) теплоємністю печі.

19. Що необхідно зробити, щоб знизити необхідну теплову потужність печі?

- а) підігріти компоненти горіння палива;

- б) підігріти оброблюваний матеріал;
- в) видаляти газу, що відходять при максимальній температурі;
- г) зменшити час знаходження матеріалу в печі;
- д) зменшити видаток палива.

20. Як називають відношення максимальної теплової потужності печі до мінімального теплового навантаження?

- а) коефіцієнтом форсировки;
- б) коефіцієнтом теплової потужності;
- в) коефіцієнтом теплового навантаження;
- г) коефіцієнтом торкретування.

21. Тепловим навантаженням називають теплову потужність, яка ...

- а) виділяється при плавці сировини в печах періодичної дії;
- б) споживається при плавці сировини в печах періодичної дії;
- в) виділяється при плавці сировини в печах безперервної дії;
- г) споживається при плавці сировини в печах безперервної дії.

22. Для переведення хімічного тепла натурального палива в умовні одиниці застосовують ...

- а) теплові еквіваленти;
- б) хімічні еквіваленти;
- в) фізичні еквіваленти;
- г) теплові показники роботи печі.

23. Який метод розрахунків є основним при розробці середньорічних норм витрати паливно-енергетичних ресурсів?

- а) розрахунково-аналітичний метод;
- б) дослідний метод;
- в) розрахунково-статистичний метод;
- г) регресійний метод.

24. У яких печах застосовують прямий спрямований радіаційний теплообмін?



- а) відбивних печах;
- б) індукційних тигельних печах;
- в) індукційних каналних печах;
- г) печах опору;
- д) сушильних печах.

25. У якому режимі роботи печі теплообмін здійснюється тільки конвекцією?

- а) конвекційному режимі;
- б) радіаційному режимі;
- в) радіаційно-конвекційному режимі;
- г) електричному режимі;
- д) шаровому режимі.

26. До якої температури зберігається конвекційний режим роботи печі при нагріванні кольорових металів?

- а) 500...600 °С;
- б) 400...500 °С;
- в) 600...700 °С;
- г) 600...650 °С.

27. Від якого параметру в першу чергу залежить інтенсивність конвекційного теплообміну?

- а) швидкості руху теплоносія;
- б) щільності теплоносія;
- в) теплового коефіцієнта розширення теплоносія;
- г) ступені чорності матеріалу, що нагрівається.

28. Для якого теплового режиму роботи печі характерно спільна дія трьох видів теплопередачі: випромінювання, конвекції, теплопровідності?

- а) шарового режиму;
- б) радіаційно-конвекційного режиму;
- в) непрямого радіаційного режиму;

г) змішаного режиму.

29. У якому виді звичайно задаються теплові режими зовнішнього теплообміну при експлуатації металургійних печей?

- а) таблиць;
- б) графіків;
- в) рівнянь;
- г) блок-схем;
- д) алгоритмів.

30. За яким основним параметром визначають ефективність теплової роботи печі в методі зворотного теплового балансу?

- а) теплосасвоєння;
- б) тепловтрати;
- в) тепловипромінювання;
- г) тепла потужність.

31. Що визначає теплосасвоєння при певних технологічних умовах?

- а) продуктивність печі;
- б) витрату палива;
- в) витяг металу;
- г) геометричні розміри печі;
- д) ємність печі.

32. Чим вище теплосасвоєння, тим ...

- а) вище витяг металу;
- б) вище температура газів, що відходять;
- в) нижче продуктивність печі;
- г) нижче теплопровідність футерівки печі.

33. У чому полягає мета відбивної плавки?

- а) у розплавленні вихідної сировини;
- б) у нагріванні вихідної сировини для видалення вологи;

- в) у спіканні вихідної сировини із флюсами;
- г) випалі вихідної сировини.

34. З яких компонентів полягає шихта відбивної плавки у вторинній кольоровій металургії?

- а) лому й відходів;
- б) стружки;
- в) флюсів;
- г) руди;
- д) концентрату;
- е) лігатури.

35. Які операції не входять у попередню підготовку сировини до відбивної плавки?

- а) видова класифікація;
- б) магнітна сепарація;
- в) брикетування;
- г) спікання;
- д) агломерація;
- е) різання.

36. Виберіть характеристики, які відносяться до однокамерних відбивних печей.

- а) проста конструкція;
- б) легке обслуговування;
- в) низька продуктивність;
- г) дешевий ремонт;
- д) висока продуктивність;
- е) займають багато місця.

37. З яких матеріалів складається шихта індукційних печей?

- а) чистого металу;
- б) концентрату;
- в) лігатур;

г) неопрацьованої стружки.

38. Метал, вироблений індукційними печами, має...

- а) низьку газонасиченість;
- б) мінімальний вміст неметалевих включень;
- в) високу газонасиченість;
- г) містить земляне засмічення;
- д) велику кількість неметалевих включень.

39. Що виконує роль вторинного витка в схемі індукційної печі?

- а) розплавлений метал;
- б) індуктор;
- в) тверда шихта;
- г) газу, що відходять.

40. Вкажіть недоліки індукційних каналних печей.

- а) тяжкі умови роботи футерівки каналу;
- б) необхідність тримати в печі певну кількість розплаву;
- в) жужелі мають низьку температуру;
- г) жужелі мають дуже високу температуру;
- д) можливість повністю зливати розплав;
- е) відсутність циркуляції розплаву.

41. Виберіть вузли, які входять до складу індукційних печей.

- а) трансформатор печі;
- б) індуктор;
- в) механізм нахилу;
- г) дуттьові сопла;
- д) електроди;
- е) електродотримач

42. Вкажіть позитивні якості індукційних печей.

- а) виділення енергії безпосередньо в завантаженні;
- б) електродинамічна циркуляція розплаву;

- в) зручність в обслуговуванні печі;
- г) низькі витрати відновника;
- д) високе споживання електроенергії;
- е) можливість переробляти тільки незабруднену шихту.

43. Яким фактором обмежується застосування індукційних печей?

- а) економічним;
- б) технічним;
- в) адміністративним;
- г) кадровим.

44. Найбільш складним вузлом руднотермічної печі є ....

- а) електродотримач;
- б) коротка мережа;
- в) гідропідйомник;
- г) механізм обертання;

45. Як називають ділянка струмопроводу від виводів вторинної сторони грубого трансформатора до затисків електродів?

- а) коротка мережа;
- б) шина;
- в) нерухлива ділянка на електродах;
- г) гнучкі провідники.

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКЖЧИК

Агрегати хлорування .....	168	ІГТ .....	142
Азбест .....	31	ІЛК.....	135
Апарати відновлення		ІЛТ.....	142
з кварцовим ковпаком.....	190	ІМВ.....	142
з металевим реактором .....	192	ІСВ.....	142
тетрахлорида титану .....	193	ЩК .....	135
Аптейк .....	78	К.В.Т. печі.....	217
Будівельна цегла .....	32	К.К.Д печі .....	216
Будівельний бетон .....	32	Каркас	
Бутовий камінь .....	32	жорсткий .....	16
вермикуліт .....	31	комбінований.....	16
Відцентровий ефект .....	53	рухливий.....	16
Вогнетриви		Кесон печі .....	108
алюмосилікати .....	22	КИЗЦЕТ-Агрегат.....	123
високовогнетривкі .....	23	Кристалізатор .....	160
вищої вогнетривкості.....	23	лежак печі .....	19
вогнетривкі .....	23	Металевий каркас.....	15
вуглецеві .....	22	Нагрів	
карбідні.....	23	дуговий .....	60
кремнеземисті .....	22	електричний.....	41
магнезійні .....	22	електронно-променевиий .....	64
нітридні .....	23	індукційний.....	51, 56
окисні.....	23	плазмовий.....	60
хромисті .....	22	Нагрівач	
цирконисті .....	22	металевий .....	45
Вогнетривкість .....	24	неметалевий .....	45
газонасичення.....	139	Паливо	
Газопроникність .....	28	газоподібне.....	36
Діатоміт .....	31	рідке .....	36
електродотримач .....	151	тверде.....	36
Електропровідність.....	27	Перепускний пристрій .....	152
Жароміці сталі.....	33	Печі	
Зоноліт .....	31	автогенні.....	75
ІАК .....	135	відбивні плавильні .....	78
ІАТ .....	142	дугові вакуумні.....	155

дугові руднотермічні.....	148	Стіни печі.....	11
електричні.....	76	Теплова потужність.....	210
електронно-променеві.....	163	Тепловий дефіцит.....	215
індукційні каналні.....	135	Теплоємність .....	27
індукційні тигельні.....	142	Теплопровідність.....	26
киплячого шару.....	117	Теплота згорання палива ....	38
опору нагрівальні.....	125	Термічна стійкість.....	25
опору плавильні.....	127	Трепел .....	31
паливні.....	74	Установки одержання	
полум'яні нагрівальні .....	97	монокристалів.....	196
полум'яні .....	74	безтигельною плавкою.....	203, 205
трубчасті обертові .....	114	за методом Чохральського	197, 199
шарові.....	74	Фундамент печі .....	7
шахтні.....	105	Фурма печі.....	109
Піч опору		Хімічна стійкість .....	25
контактного нагріву .....	43	Хлоратор	
непрямого нагріву .....	43	вертикального типу .....	179
Питома витрата тепла .....	212	горизонтального типу .....	177
Пористість .....	27	киплячого шару.....	173
Продуктивність .....	214	сольовий.....	175
Реактор киплячого шару...	181	шахтний.....	168
Ректифікаційні колони		шахтний безперервної дії..	171
насадкові.....	185	Циндростійкі сталі .....	33
плівкові.....	185	Черінь печі.....	8
тарілчасті.....	185	Жужелестійкість.....	26
Склепіння печі.....	13		
Спінк .....	115		
Стискаючий ефект .....	52		

## ЛИТЕРАТУРА

- 1) Шкляр М.С. Печи вторичной цветной металлургии / М.С. Шкляр. – М.: Металлургия, 1987. – 216 с.
- 2) Всеволод В.К. Печи для цветных и редких металлов / В.К. Всеволод. – М.: Металлургия, 1980. – 392 с.
- 3) Бредихин В.Н., Маняк Н.А., Кафтаненко А.Я. Медь вторичная: [монография] / Бредихин В.Н., Маняк Н.А., Кафтаненко А.Я.– Донецк: ДонНТУ, 2006. – 416 с.
- 4) Технология полупроводникового кремния / [Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоний И.Ф. и др.] – М.: Металлургия, 1992. – 408 с.
- 5) Индукционные тигельные печи: [учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп.] / [Иванова Л.И., Грובהва Л.С., Сокунов Б.А., Сарапулов С.Ф.] – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 87 с.
- 6) Байбеков М.К. Производство четырёххлористого титана / М.К. Байбеков, В.Д. Попов. - М.: Металлургия, 1987. – 128с.
- 7) Гармата В.А. Титан / Гармата В.А., Петрунько А.Я., Галицкий Н.В. и др. – М.: Металлургия, 1983. – 560 с.
- 8) Фарбман С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 1968. – 496 с.
- 9) Теория, конструкция и расчет металлургических печей. Т. 2. Расчеты металлургических печей / Б.С. Мастрюков – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.
- 10) Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1972. – 368 с.
- 11) Кохан Л.С. Механическое оборудование по производству цветных металлов: [учебное пособие для вузов] / Кохан Л.С., Навроцкий А.Г. - М.: Металлургия, 1985. – 312 с.
- 12) Койбаш В.А., Оборудование предприятий вторичной цветной металлургии / В.А. Койбаш, В.П. Резняков. – М. Металлургия, 1976. – 367 с.
- 13) Худяков И.Ф. Оборудование металлургических заводов / И.Ф. Худяков, В.П. Голдобин. – Свердловск, УПИ, 1987. – 510 с.
- 14) Гребенник В.М. Расчет металлургических машин и механизмов / Гребенник В.М., Иванченко Ф.К., Ширяев В.И. – Киев, Выща школа, 1988. – 448с.