

## АГРЕГАТИ КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ.

Обладнання для переробки побічних продуктів переплаву.

Тема 1. Газохідна систем кольорової металургії.

Тема 2. Обладнання для переробки шлаків, кеків, шламів металургійного виробництва.

Плавилисьні печі кольорової металургії.

Тема 3. Конструкція електропечей.

Тема 4. Шахтна, відбиваюча, руднотермічна печі.

Обладнання для випалу.

Тема 5. Агломашина та піч киплячого шару.

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 електродами. 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 вогнетривких 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.

### **Паливні печі**

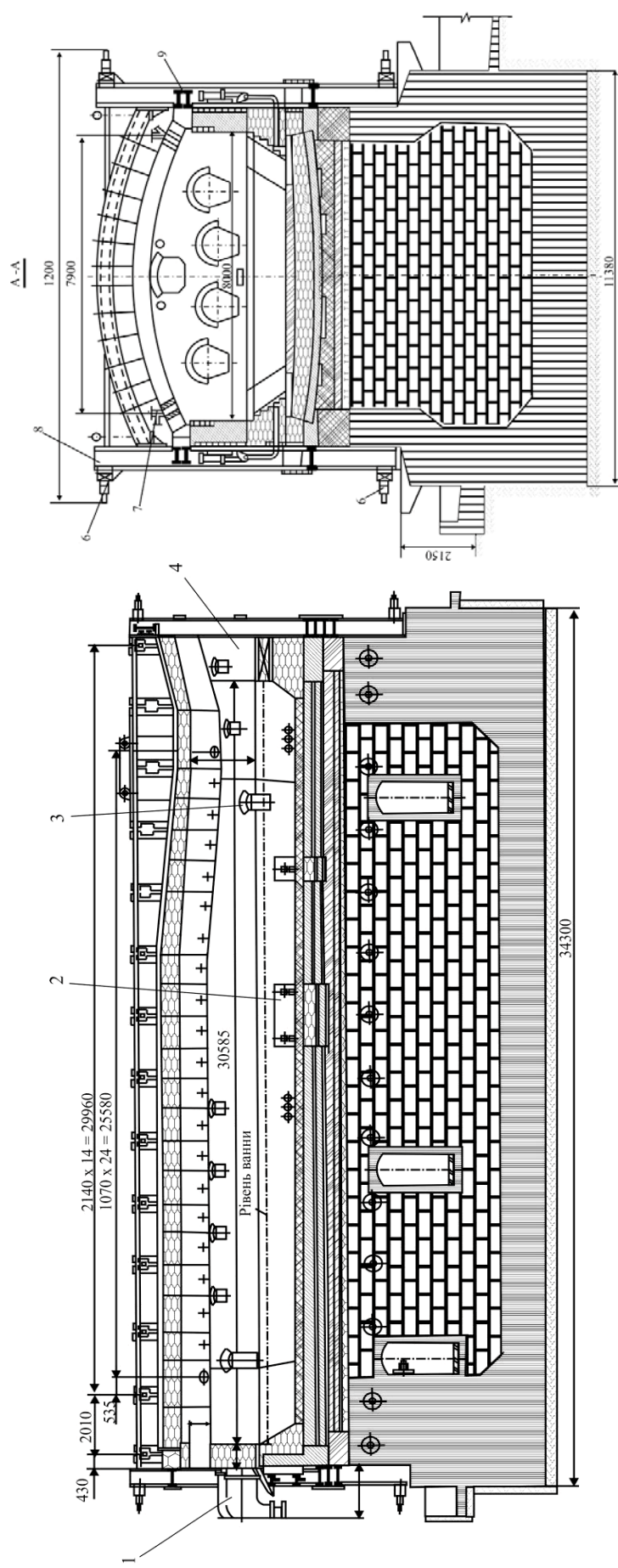
При розгляді основних типів печей кольорової металургії зупинимося на найпоширеніших і відмінних одна від одної головним чином принципом нагрівання. Печі одного типу можуть знаходити застосування при одержанні різних металів, що приводить до деякої різноманітності конструкцій у відповідності із властивостями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

**Відбивні плавильні печі.** Відбивні печі використовуються для плавки дрібнорозмелених матеріалів (концентратів), а також металів при виробництві міді, олова, цинку, алюмінію, вторин-

них 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  $240 \dots 280 \text{ м}^2$ , довжину  $31 \dots 35 \text{ м}$ , ширину  $7 \dots 10 \text{ м}$ , висоту від череня до склепіння  $3,0 \dots 4,0 \text{ м}$ .

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 ( $1100 \dots 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 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. Черинь печі робиться звичайно набивний із кварцового піску з добавкою  $5 \dots 10 \%$  глини, яка спікається на місці перед пуском печі. Між черенем й фундаментом прокладені шари динасової, шамотної й теплоізоляційної цегли. З успіхом використовується черинь із цегли, при цьому верхній шар у вигляді зворотної арки товщиною  $0,46 \text{ м}$  робиться з магнезитохромітової цегли. Стіни до рівня ванни викладаються магнезитохромітовою цеглою товщиною  $0,75 \dots 1,0 \text{ м}$ , 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 стіні 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.

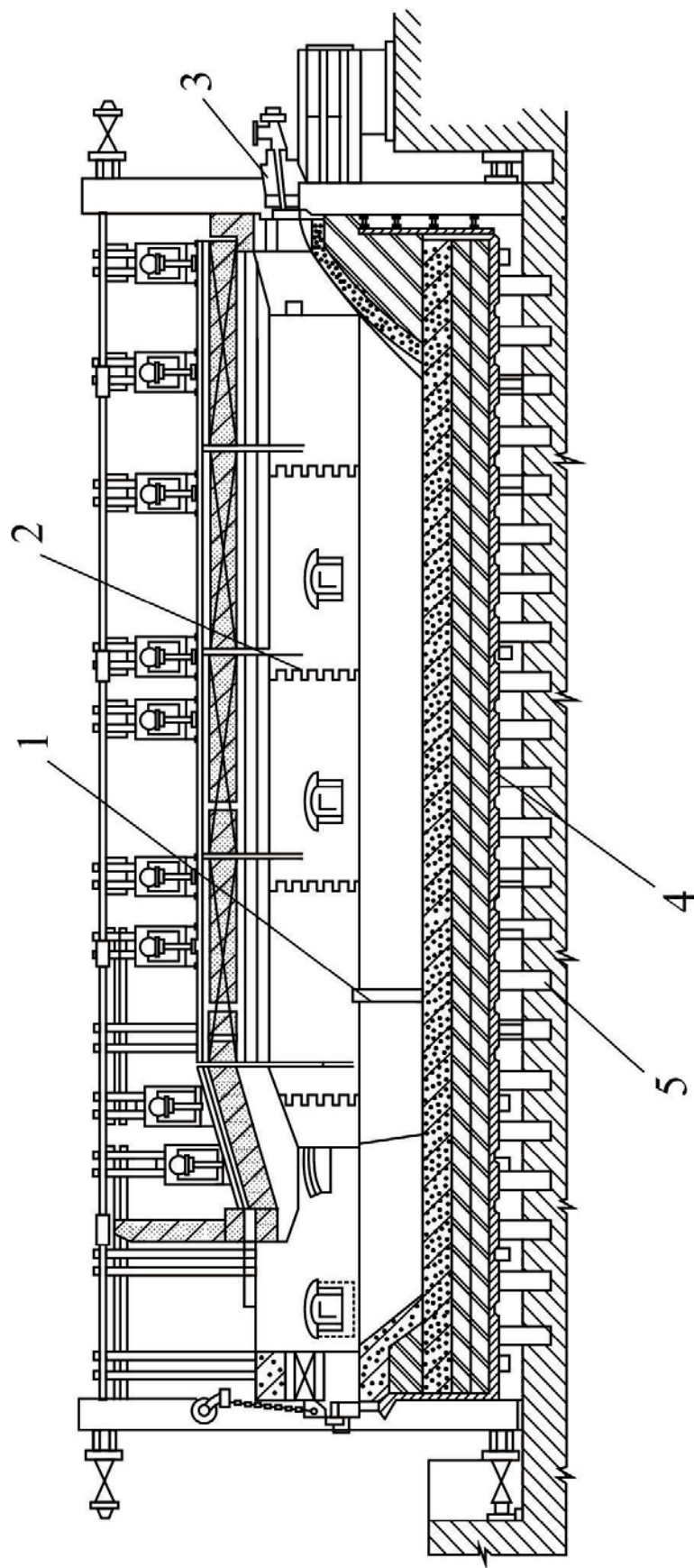
На рис. 4.2 показана відбивна піч, яка використовується для плавлення й рафінування міді. При рафінуванні мідь розплавляють у печі при температурі 1500 °С і вище, а потім окиснюють присутні домішки в окисній атмосфері з одночасним зниженням температури печі до 1200...1400° С. Розлив роблять у відновному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

Стаціонарні 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 хромомагнезитової 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 хромомагнезитової цегли передбачена постіль із шару сухого піску.

Стіни викладають також у два шари: усередині хромомагнезитою цеглою, а зовні шамотною. Хромомагнезитове 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 жухелі. Вікна обрамляють охолоджувані водою рами й закривають кришки з механічним підйомом

Черінь має ухил у бік льотки  $17^\circ$ . У місці обладнання льотки 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.

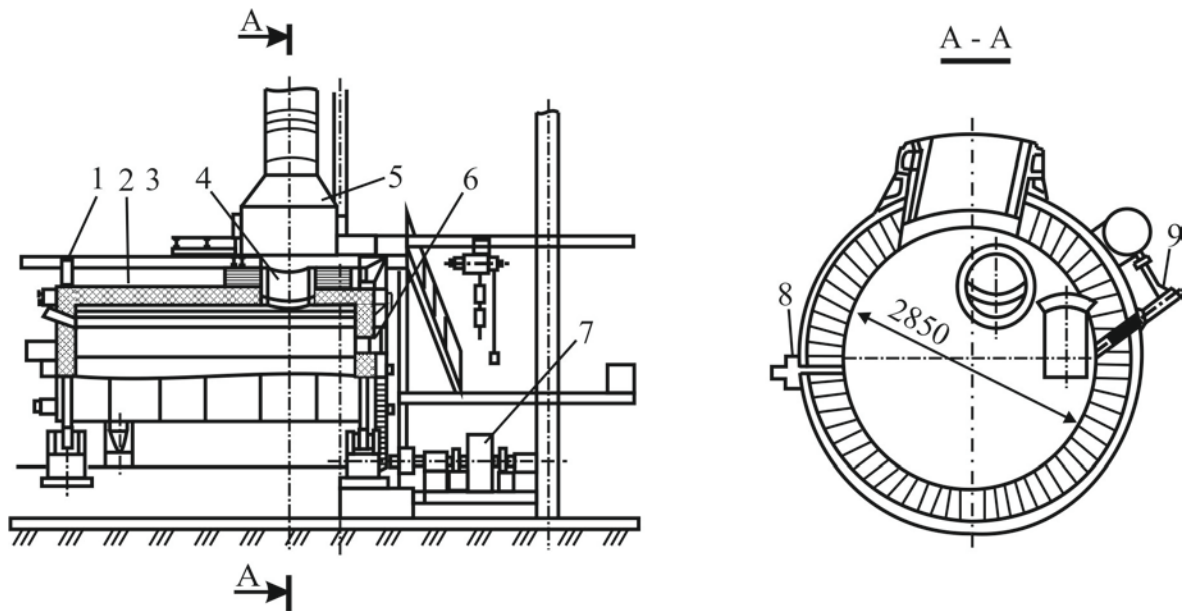
Щоб уникнути нещасних випадків і виходу з ладу розливної машини при прориві льотки в підлозі цеху близько льотки передбачений аварійний приямок. Для того, щоб метал, який потрапив у приямок, після його застигання було зручніше витягти й обробити на частини, приямок повинен складатися з відсіків.

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.



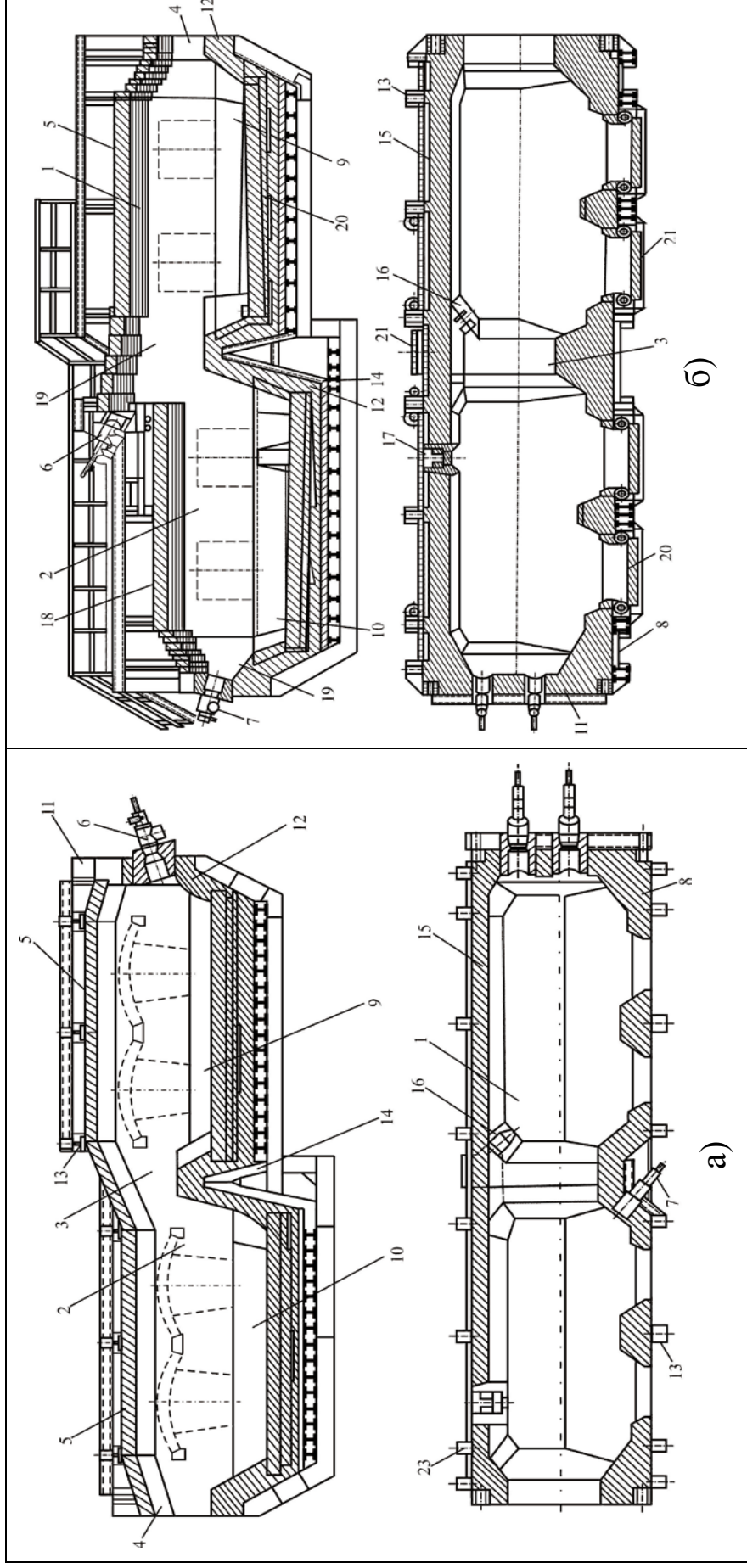
1) вікно для пальника; 2) кожух печі; 3) футерівка; 4) горловина; 5) уловлювач пилу; 6) вікно для «дражнення»; 7) привід повороту печі; 8) лютка; 9) фурма

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) переструмінне 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 холододілильник; 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 протиструмінної двокамерної відбивної 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 багатоканалним 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 газозодів.

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.

Двокамерні відбивні печі встановлюють на східчасті монолітні фундаменти. Різниця рівнів щаблів дорівнює різниці рівнів черенів у робочих камерах. Однак при такому фундаменті неможливий огляд металоконструкцій 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 переструмних (для багатоканалних 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 завалочного вікна, виконують у формі плавного укусу, 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, черінь 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 мульдозавалочної машини. Для забезпечення повноти спуска металу з верхньої ванни в нижню лютка верхньої ванни повинна бути розташована вище максимального рівня металу в ни-

жній 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 працюю-

чих 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 неохолоджувальною – 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 хромомангезитової або магnezитохромітової 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 переструмінного 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 переструмінного 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, короби 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 черевних 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 вентиляваним 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. Стій-

ки закріплені на кінцях поперечних балок, розташованих під ванною, і зв'язані по висоті на двох-трьох рівнях кільцевою об'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 важкої 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 вентилязовані 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'єдна-

ні 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: газошільність, 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.

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, конве-

ерів, крокуючих балок та ін.). При цьому нагрівання може здійснюватися за спеціальною програмою, як, наприклад, у методичних печах. До камерних печах 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 взаємодівав 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 виробах 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 виробів. Час нагрівання мінімальний в одиничного злитка (круглого й квадратного перетинів), що обігрівається з усіх боків. При одно-

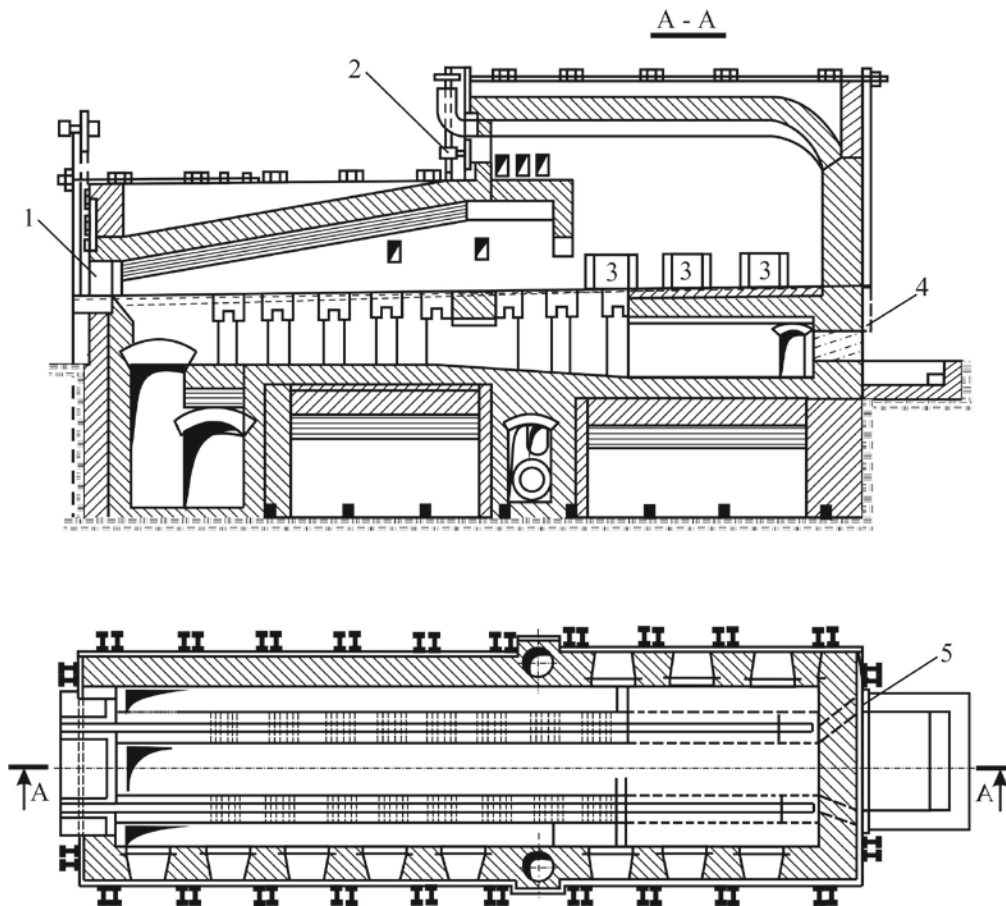


бічному нагріванні щільно покладених один до одного злитків квадратного перетину час нагрівання збільшується в чотири рази, у зв'язку зі зменшенням поверхні теплообміну злитка в чотири рази. Для коротких злитків, що мають відношення довжини до товщини менше трьох, слід ураховувати нагрівання через торці, 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 протиструмний 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 ураховувати 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 через 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

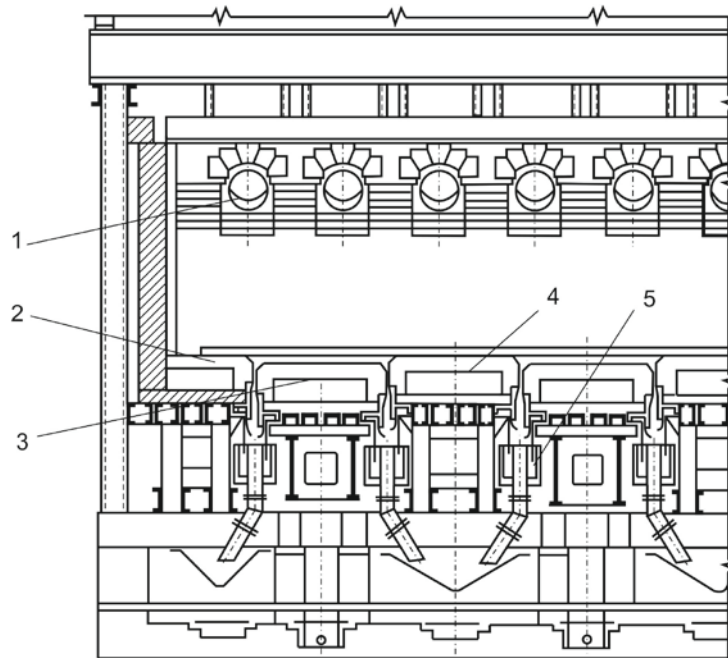
Рисунок 4.5 – Схема методичної печі для нагрівання мідних або алюмінієвих злитків [2]

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 нагріванні мідних злитків 37,4 кг, при нагріванні алюмінієвих злитків 52,6 кг. Злитки в розглянутій печі переміщуються 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 розміщати заготовки будь-якої довжини й будь-якого профілю.

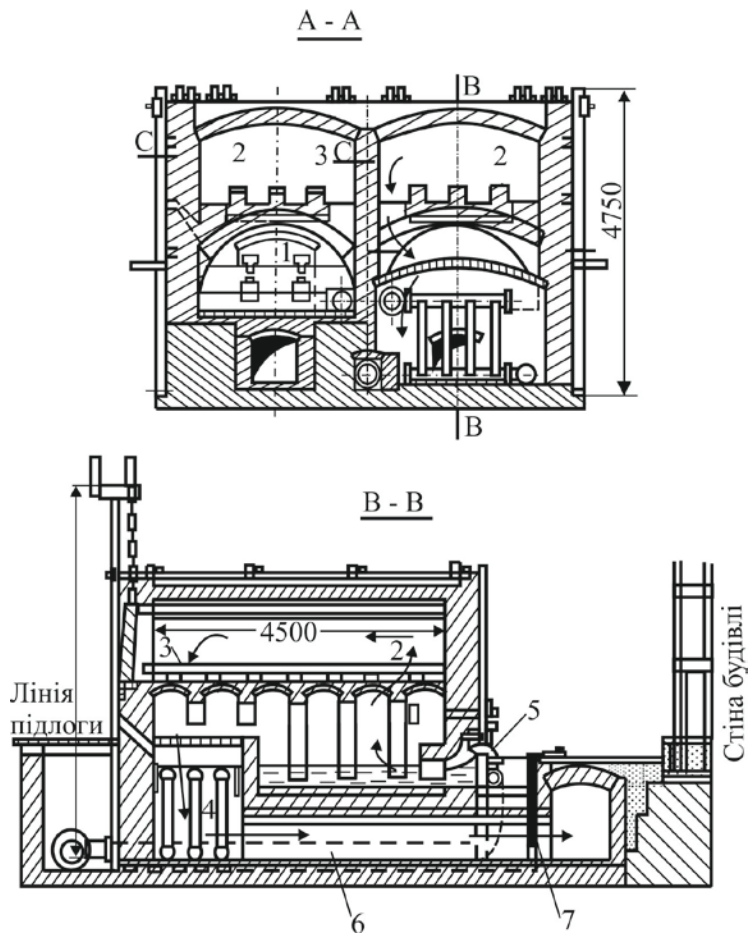
При нагріванні круглих заготовок можна використовувати похилий черінь із самостійним перекочуванням злитків у печі. Однак практика показала малу ефективність таких печей. Підвищене тертя злитків і удари один об одного збільшують утворення окалини. Періодично доводиться затрачати велику фізичну працю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



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

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

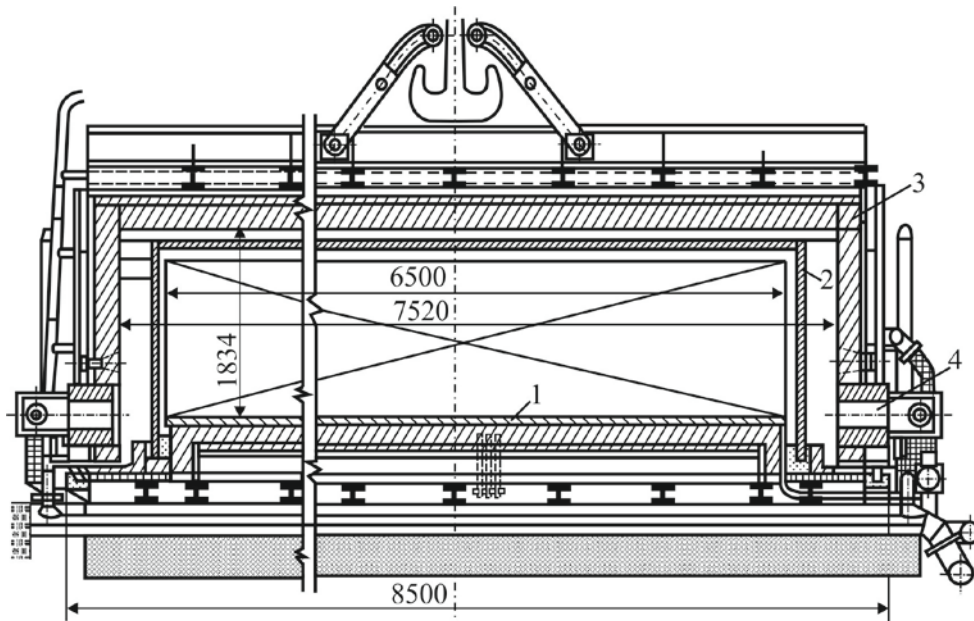
Камерні печі найчастіше використовуються для термічної обробки металів (загартування, нормалізація, випал), коли потрібне точне дотримання необхідної температури нагрівання металу. Тому основною вимогою, пропонованою до печей для термічної обробки, є можливість точно регулювати температуру в робочому 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) черінь; 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 черінь 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  $0,5 \dots 0,95$  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.

### 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).

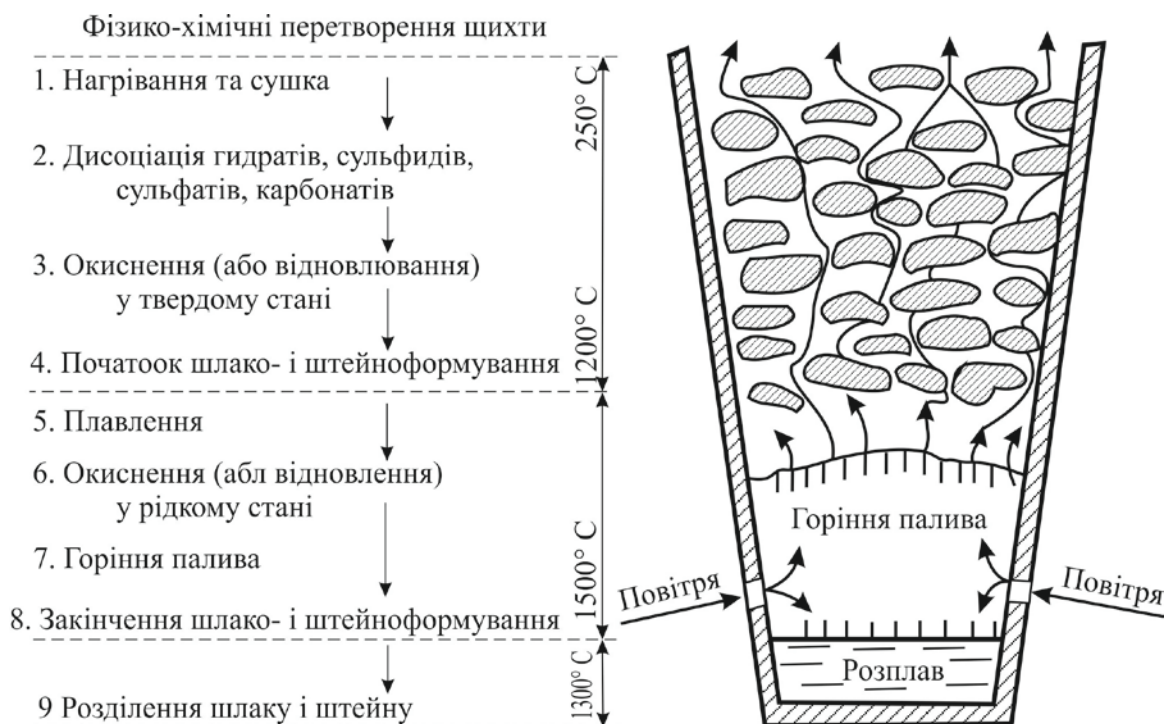


Рисунок 4.9 – Схема руху матеріалу й газів у шахтній печі

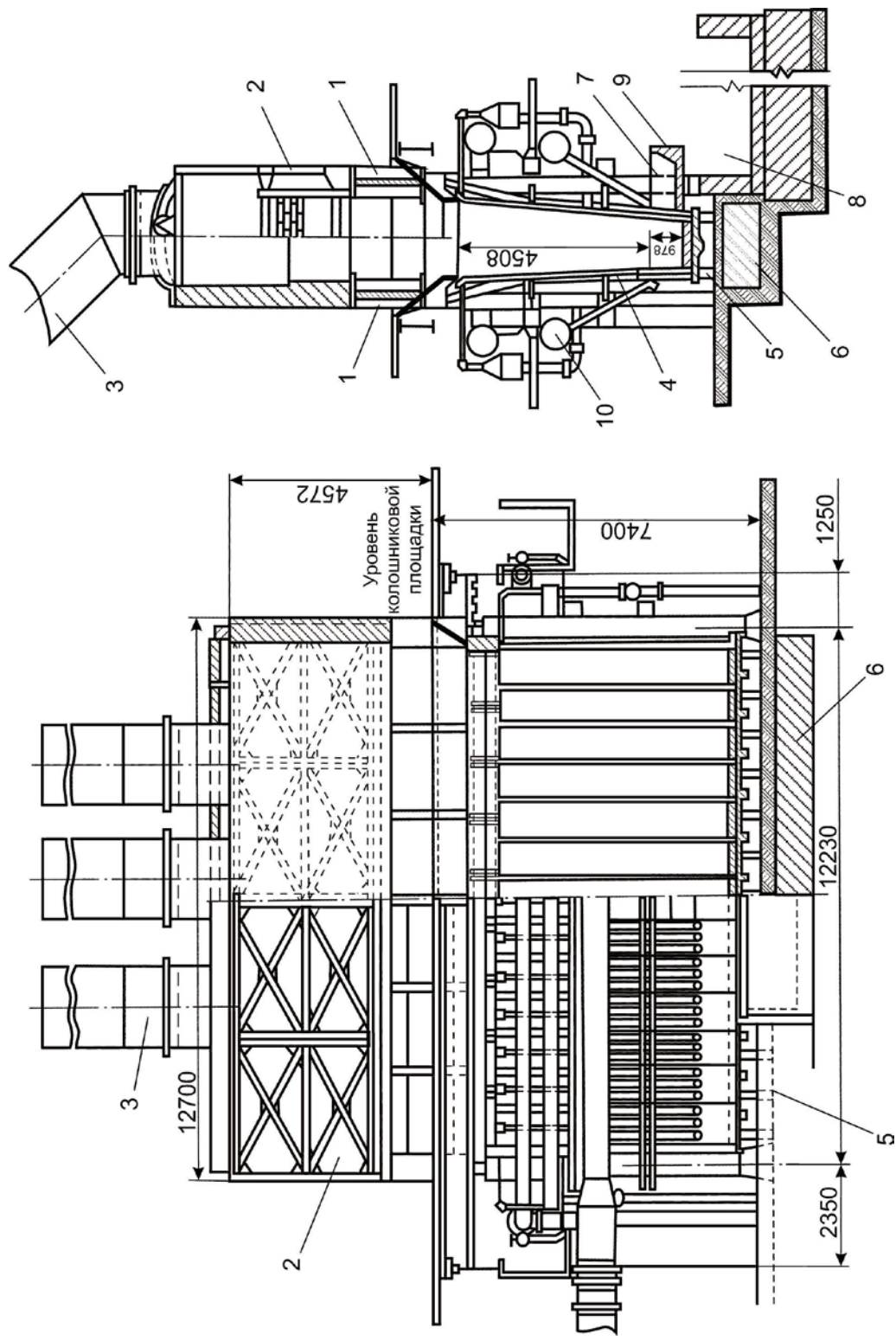
У нижню частину печі через фурми подають повітря для горіння коксу. Гарячі гази піднімаються нагору назустріч шихті. Рухаючись протитечією, гази віддають своє тепло шихті й охоложені йдуть із печі у верхню її частину. Матеріал, що завантажується, рухаючись зверху вниз, проходить різні температурні зони, 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) напілок; 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 повітряпідводи печі. Кесони виготовляються з листів товщиною 12...16 мм із вогневої сторони (у середині 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.

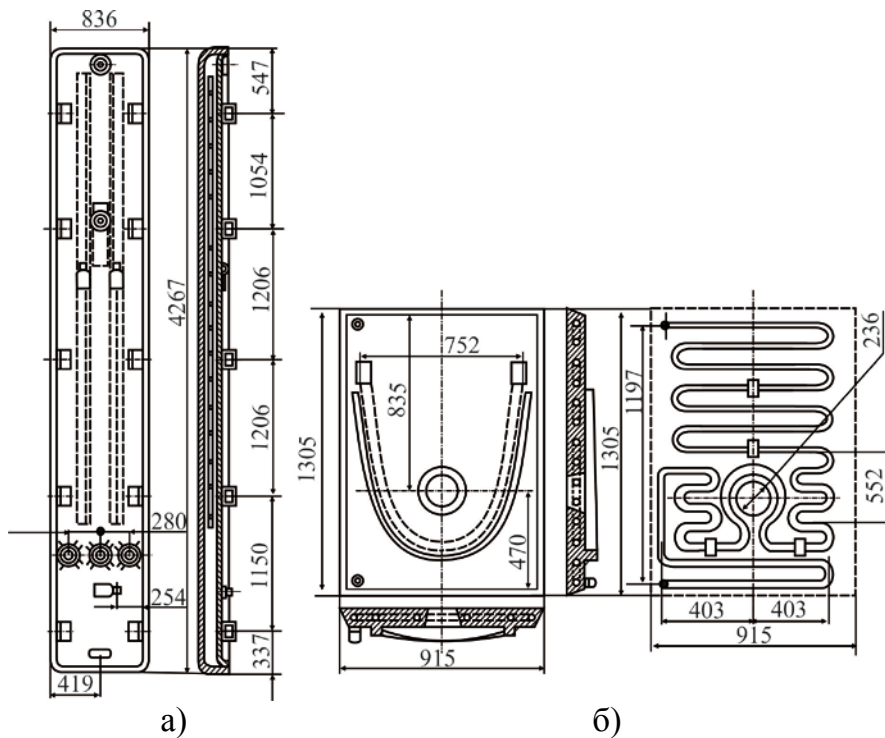


Рисунок 4.11 – Кесони шахтної печі: а) фурменний кесон; б) випускний мідний кесон [2]

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 заглишкою, 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 змійовик, 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 відлитої із чорнової міді й прохолоджується змійовиком. Усередині жолоб футерують магнезито-

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

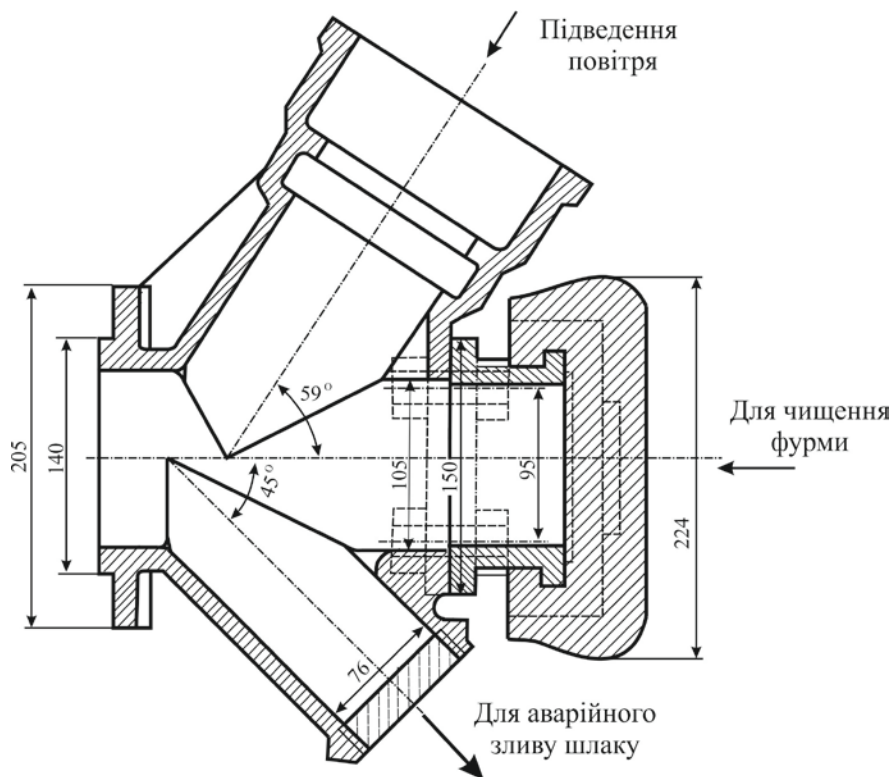


Рисунок 4.12 – Фурма шахтної печі [2]

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.

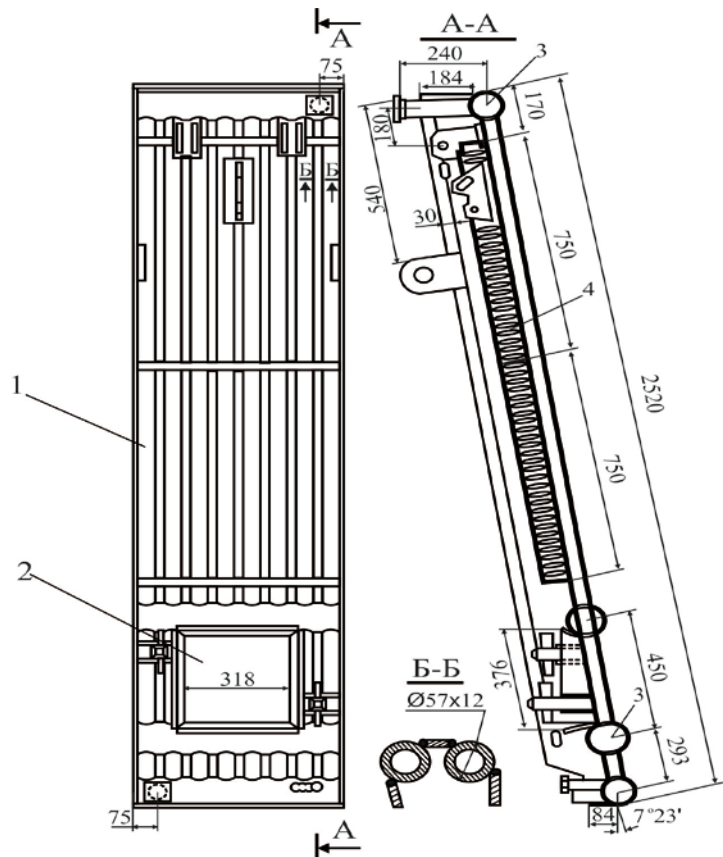


Рисунок 4.13 – Кесон з випарним охолодженням [2]

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. Приймавши 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 багаті 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 реакції	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 відно-

вній 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 газоході ухвалюється 3...7 м/с.

#### Трубчасті обертові печі

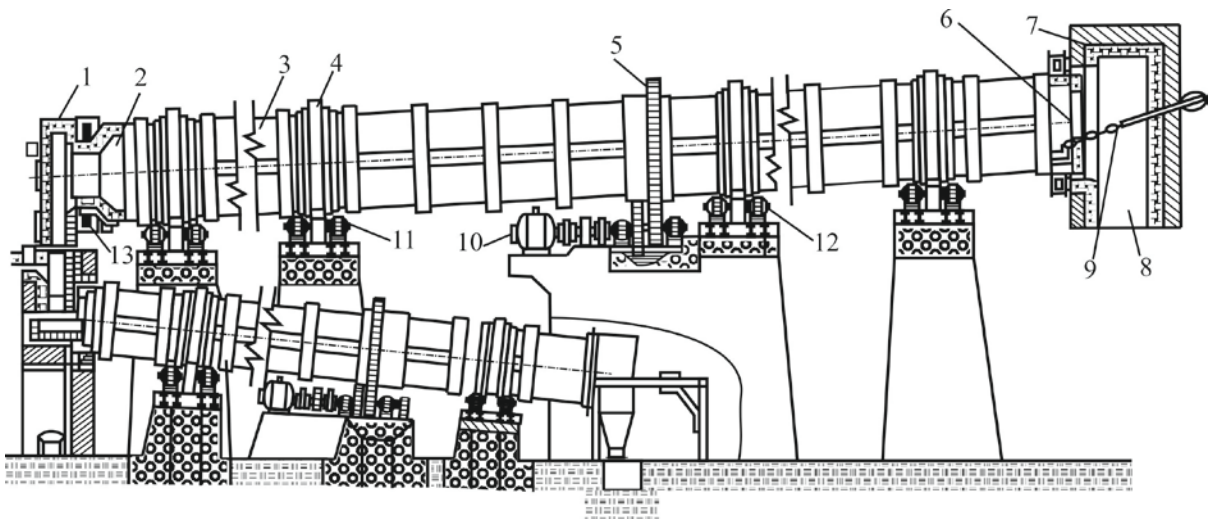
Переробка дрібного сипучого матеріалу без його розплавлення з успіхом проводиться в трубчастих обертових печах. У довгій футерувальній трубі найчастіше протитечією рухаються нагріваючий матеріал і продукти горіння палива. Рух матеріалу відбувається завдяки невеликому нахилу труби убік вивантаження й 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 високоглинозестистою 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 переміщається 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 монтується із ухилом в 3...6°. Щоб уникнути сходу барабану з опор використовуються завязані 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 патрубка, 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 борові 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.

#### 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 здрібненого 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 ( $w_{min}$ ), при якій починається зрідження шару, і максимальна ( $w_{max}$ ), при якій шар починає переходити у зважений стан (рух часток у газі). При цьому під швидкістю газу розуміють швидкість  $w_{cv}$ , віднесену до вільного перетину печі без врахування матеріалу. При проведенні процесу в киплячому шарі повинна зберігатися умова  $w_{min} < w_{cv} < w_{max}$ .

Дійсна швидкість газу в даному перетині:

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

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:

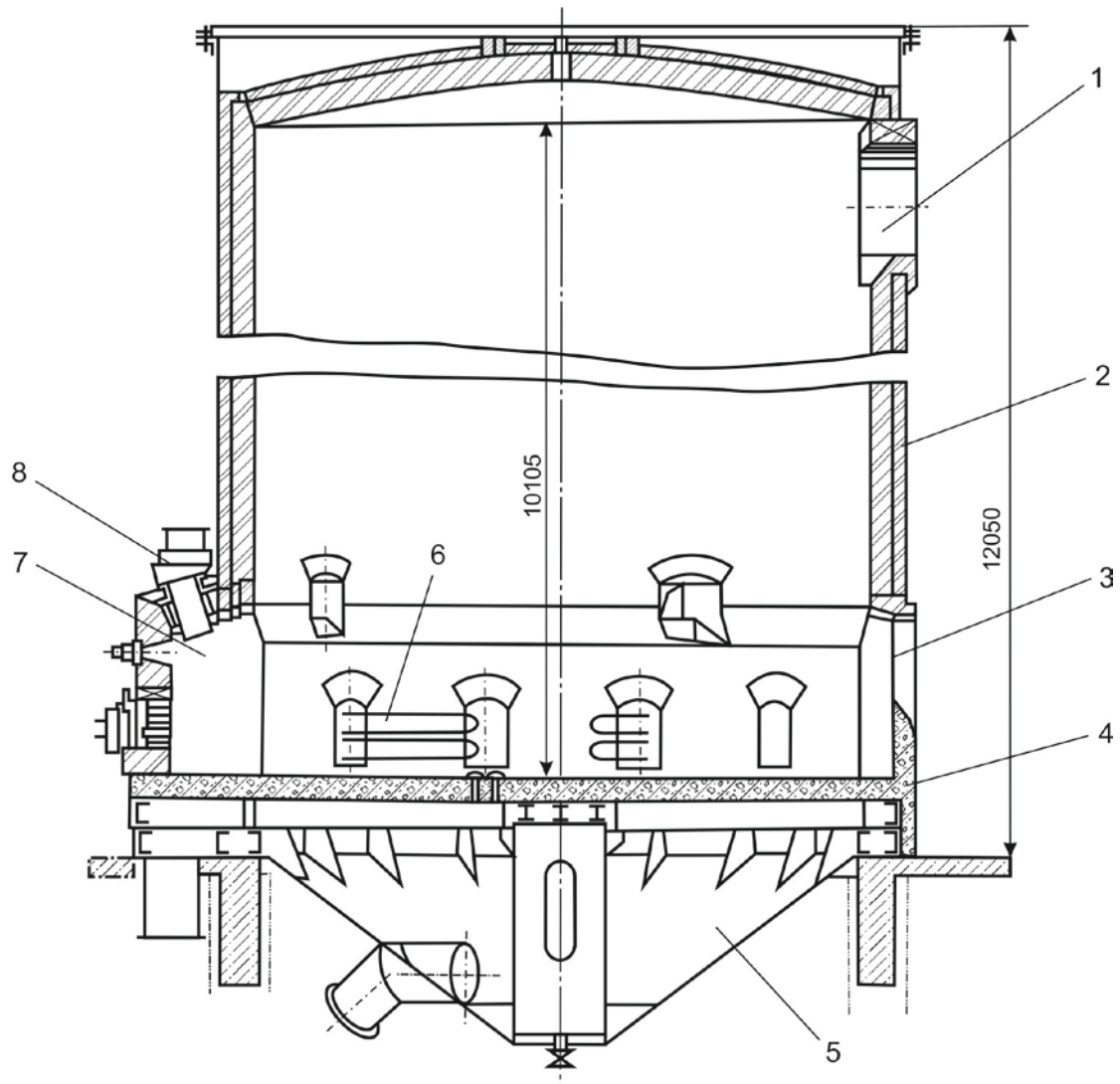
$$Ar = \frac{g \cdot d^3 (\rho_M - \rho_{\Gamma})}{\nu_t^2 \cdot \rho_{\Gamma}}, \quad (4.5)$$

де  $d$  – діаметр часток матеріалу (прийнятих у вигляді кулі);  $\rho_M, \rho_G$  – щільність матеріалу й газу;  $\nu_t$  – 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 черену печі зросла приблизно в 20 разів у порівнянні з питомою продуктивністю багаточереневих перегрібних печей. При випалі цинкових концентратів з наступною гідрометалургійною переробкою вона досягає  $5,5 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{доб})$ .

На рис. 4.15 показано піч для випалу цинкових концентратів у киплячому шарі із площею черену  $34 \text{ м}^2$ . Робляться печі із площею черену до  $90 \text{ м}^2$ . Робоча камера печі в горизонтальному перетині може мати круглу й прямокутну форму.

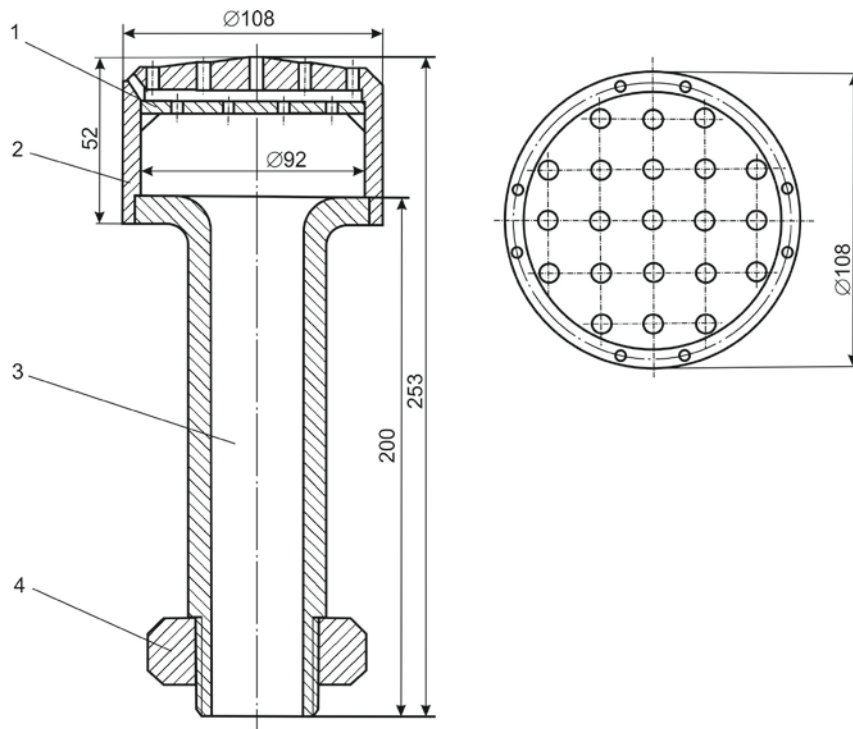
Іноді печі виготовляють багатокамерними. У камерах можна підтримувати різні температури, і матеріал проходить через усі камери послідовно. Склепіння і стіни роблять із шамотної цегли. У якості зовнішньої ізоляції використовують діатомітову або легковагову цеглу. Тепла, що виділяється за рахунок окиснення сульфідів, досить для підтримки заданої температури ( $930 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 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  $600 \dots 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .



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

Рисунок 4.15 – Схема печі киплячого шару [2]

Найбільш відповідальною деталлю печі є черинь робочої камери, через який підводиться повітря, необхідне для процесу. При цьому потрібний його рівномірний розподіл по перетину печі без розсипання матеріалу у повітря. Найчастіше черинь 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.

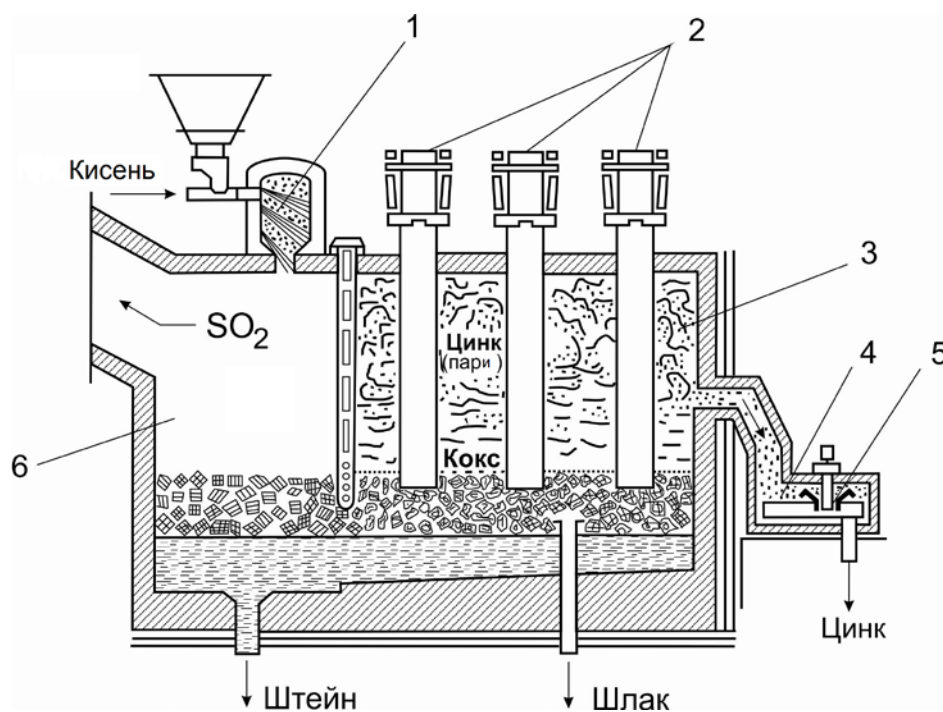
У таблиці 4.4 приводиться тепловий баланс печі для випалу цинкових концентратів у киплячому шарі. З наведеного балансу видно, що найбільша кількість тепла губиться з газами, що відходять газами й водою холодильників. Для використання тепла газів, що відходять, застосовують казани-утилізатори. При цьому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

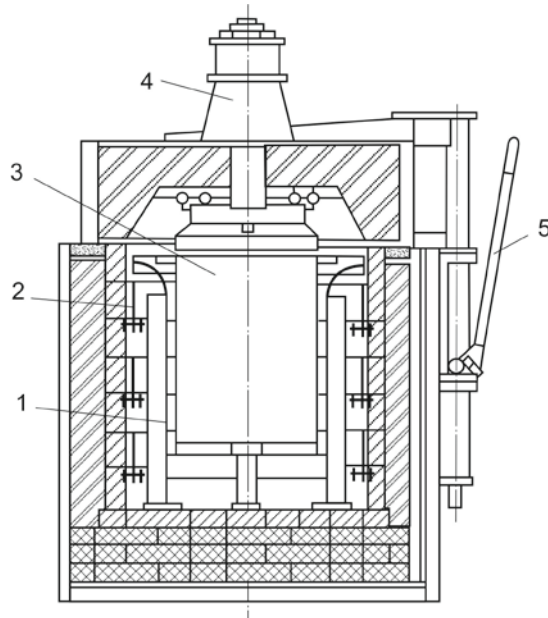
## **4.2 Електричні печі**

### **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.

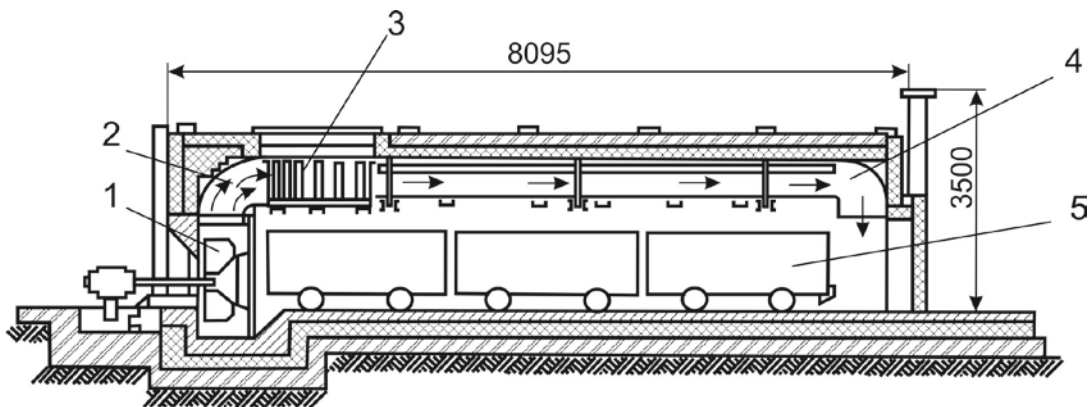


1) металевий екран; 2) нагрівальні елементи; 3) металевий кошик; 4) вентилятор; 5) важільне обладнання

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 ( $\pm 5$  К) напрямок 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 електропіч 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  $440$  °С витрата електроенергії становить  $0,4$  кВт·година на  $1$  кг металу.



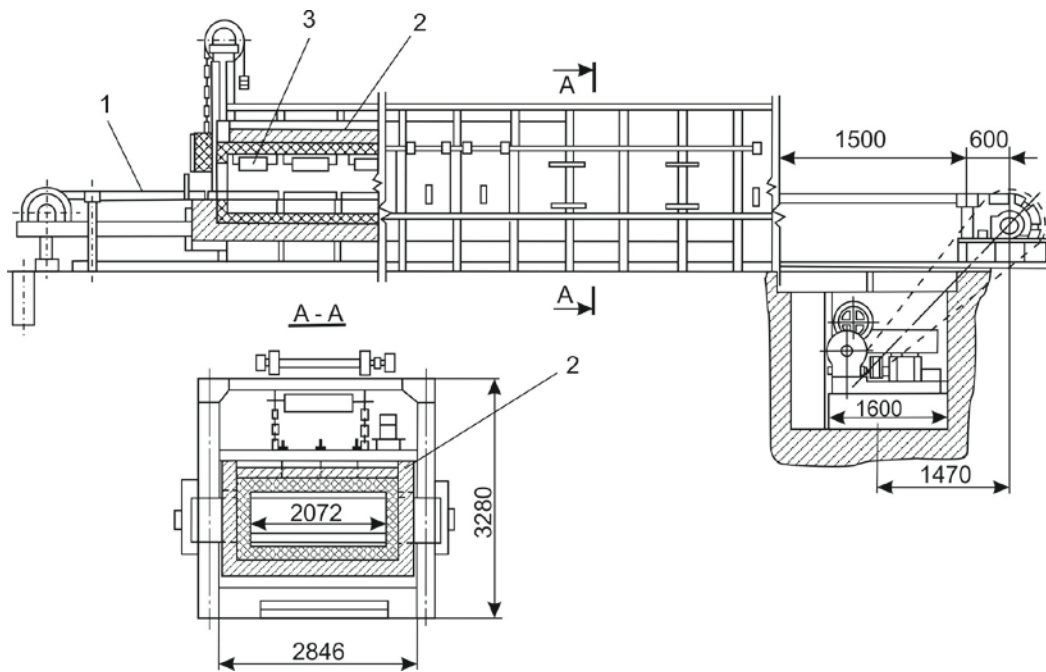
1) вентилятор; 2, 4) повітряпідвід; 3) нагрівачі; 5) візок

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 кг/година, питома витрата електроенергії 0,188 кВт·година на 1 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 кг алюмінію. Циліндричний кожух печі на цапфах закріплений у підшипниках і має привід для нахилу печі. Спиральні дровові нагрівачі розташовані на керамічних полках у кілька рядів по висоті печі. Усередину печі вставлений чавунний тигель ємністю 150 кг. Піч має піднімальну кришку й жолоб для зливу металу. Метал плавиться в тиглі й після нагрівання до заданої температури зливається шляхом нахилу 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]

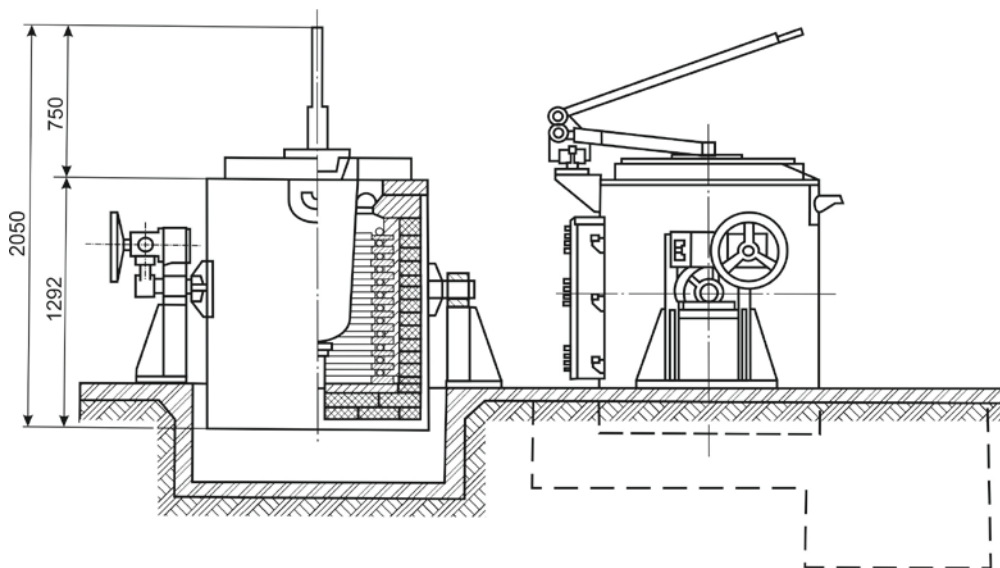
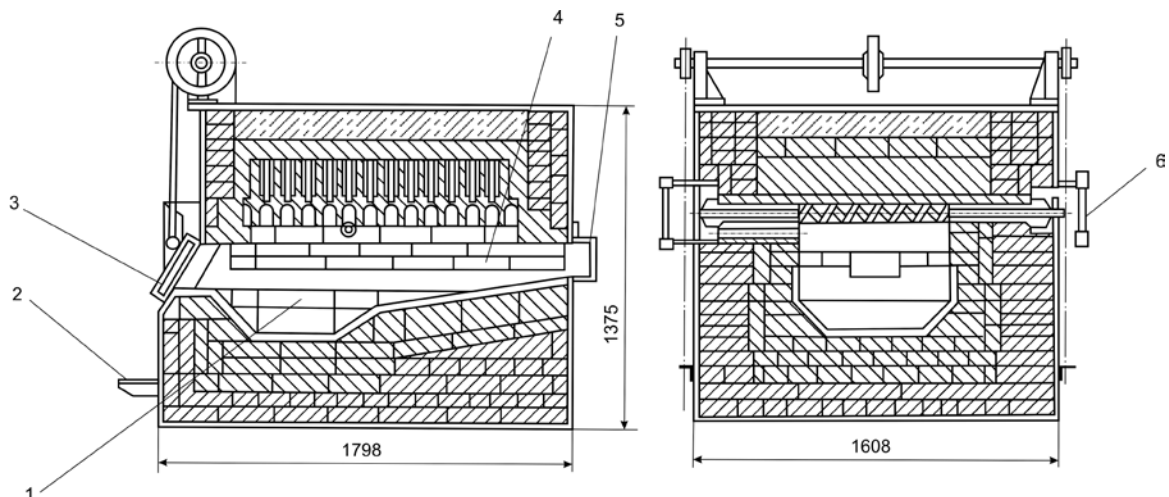


Рисунок 4.21 – Тигельна електрична піч опору для плавки алюмінію [2]

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 дротовими (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.

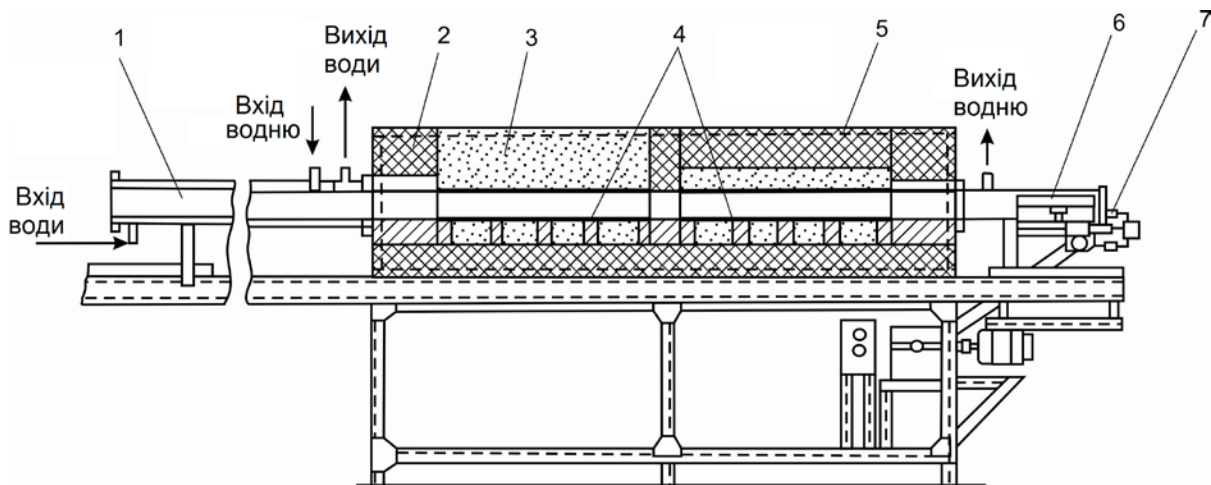
Піч ємністю 150 кг алюмінію має електричну потужність 40 кВт. Продуктивність печі 60 кг/година алюмінію. Термін служби нагрівальних елементів значно скорочується при влученні на них бризів металу. Тому при обслуговуванні печі необхідно стежити, щоб метал не розприскувався. Подібного типу печі будуються 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 вогнетривкою 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 па-

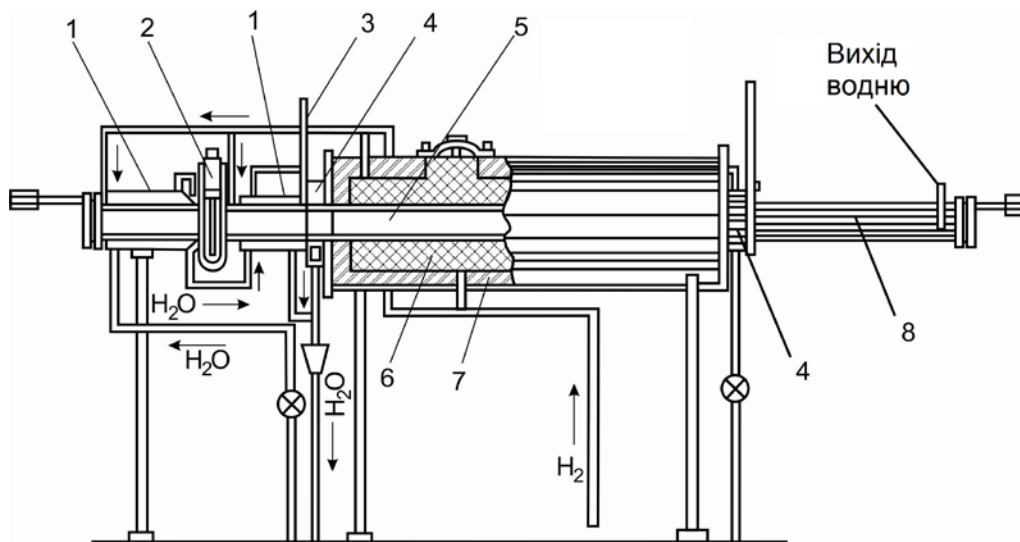
трубка його підпалюють, щоб по факелу контролювати вступ водню в піч, і, що найголовніше, при його згоранні виключається можливість утворення вибухонебезпечної гримучої суміші в приміщенні.

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 протите-

чією 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 патрубок

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 загальної 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 використаної 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 вруч-

ну 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.

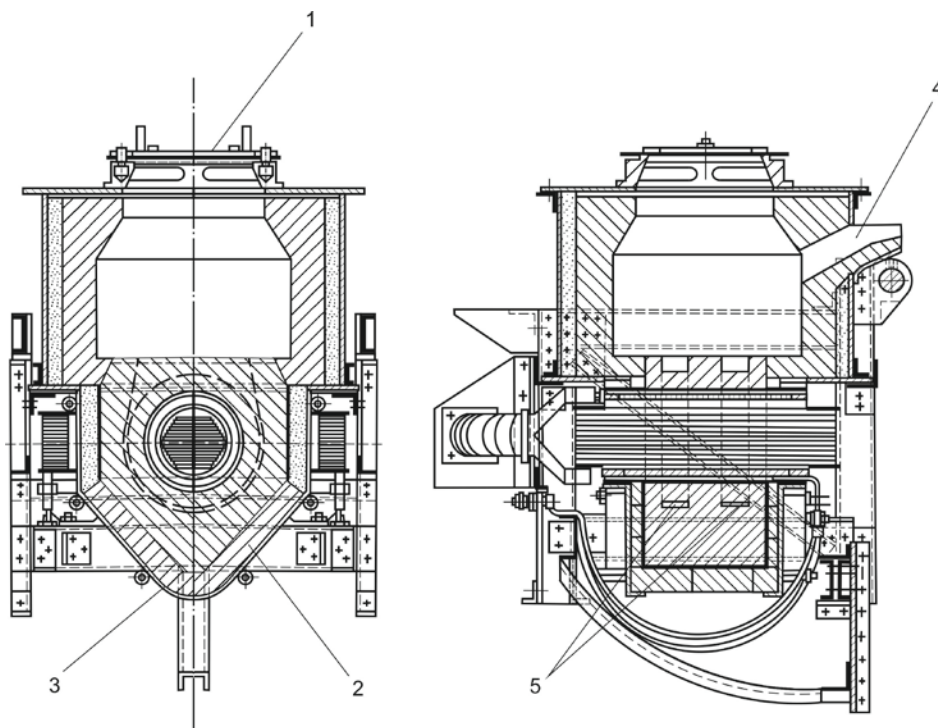
При розрахунках розмірів муфельних і графітотрубчастих печей виходять із загальної продуктивності, розмірів човника, маси виробів і часу перебування виробів у печі.

#### 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 ЦК – для плавки цинку. Печі виготовляються одно-, дво- і трифазними. У печах великої ємності широко використовують окремі 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, ЦК 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 лютку при нахилі печі навколо осі. Циліндричну вертикальну шахту печі футерують звичайно вогнетривкою цеглою (магнезитовою) з теплоізоляційною засипкою.



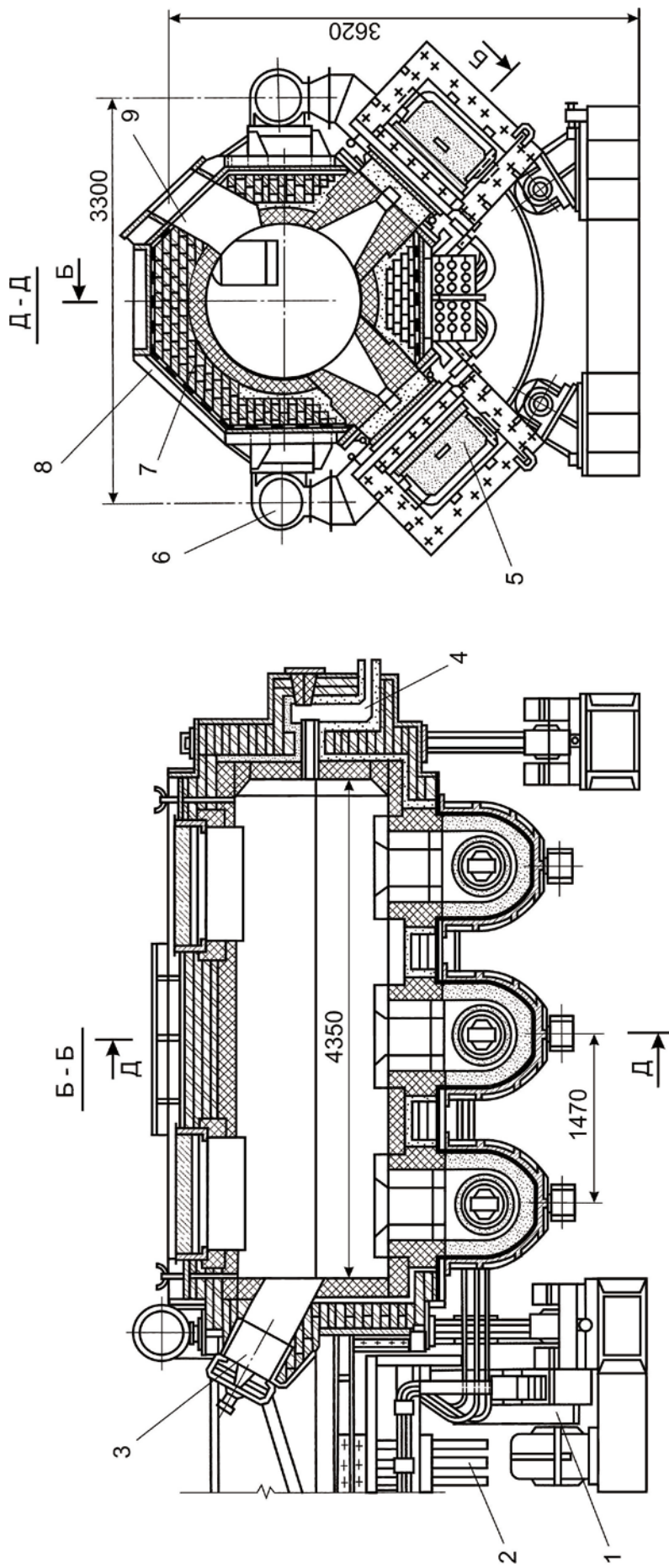
1) завантажувальний отвір; 2) подовий камінь; 3) металевий кожух; 4) зливальний носок; 5) канали

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

Череневий камінь 2 з індукційним пристроєм зміцнюють знизу печі, часто в зібраному виді. Для футерівки череневого каменю застосовують звичайно набивні маси. При плавці латуні й бронзи використовується кварцитова 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 фу-

терівка складається з 96,5 % плавненого магнезиту, 3 % бури в порошку. 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 4.2.6 – Індукційна піч ІЛК-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).

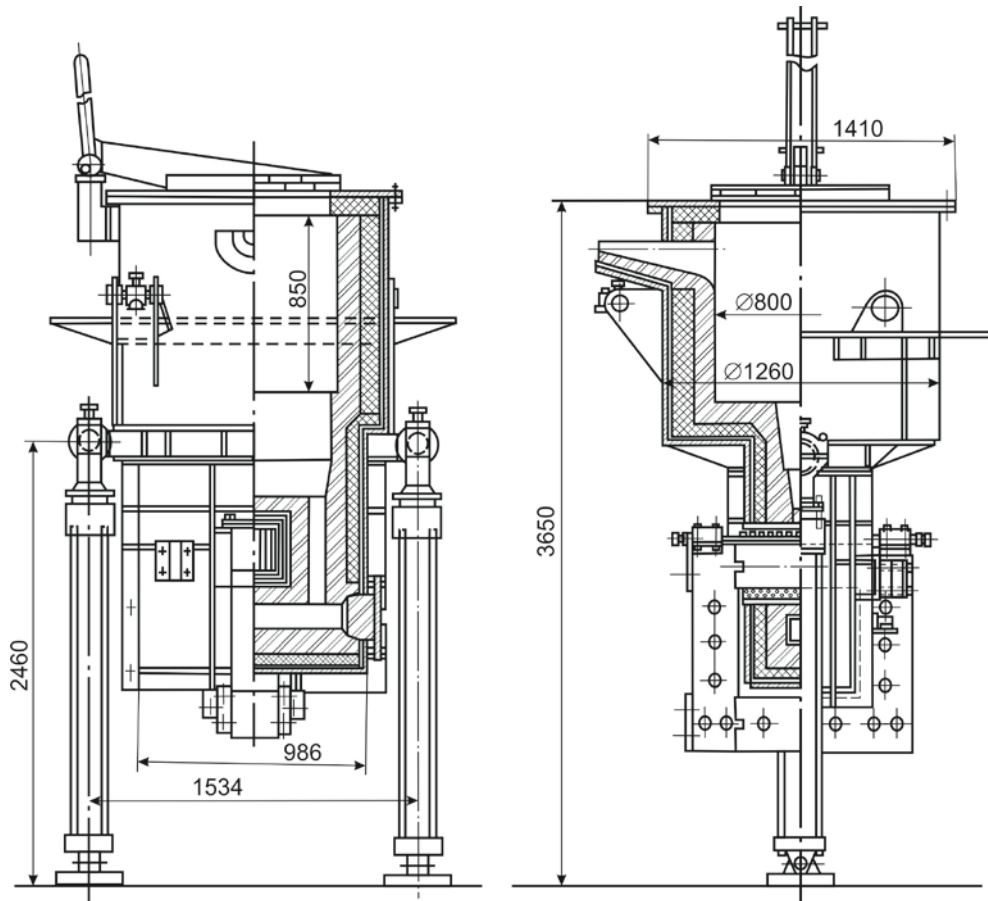
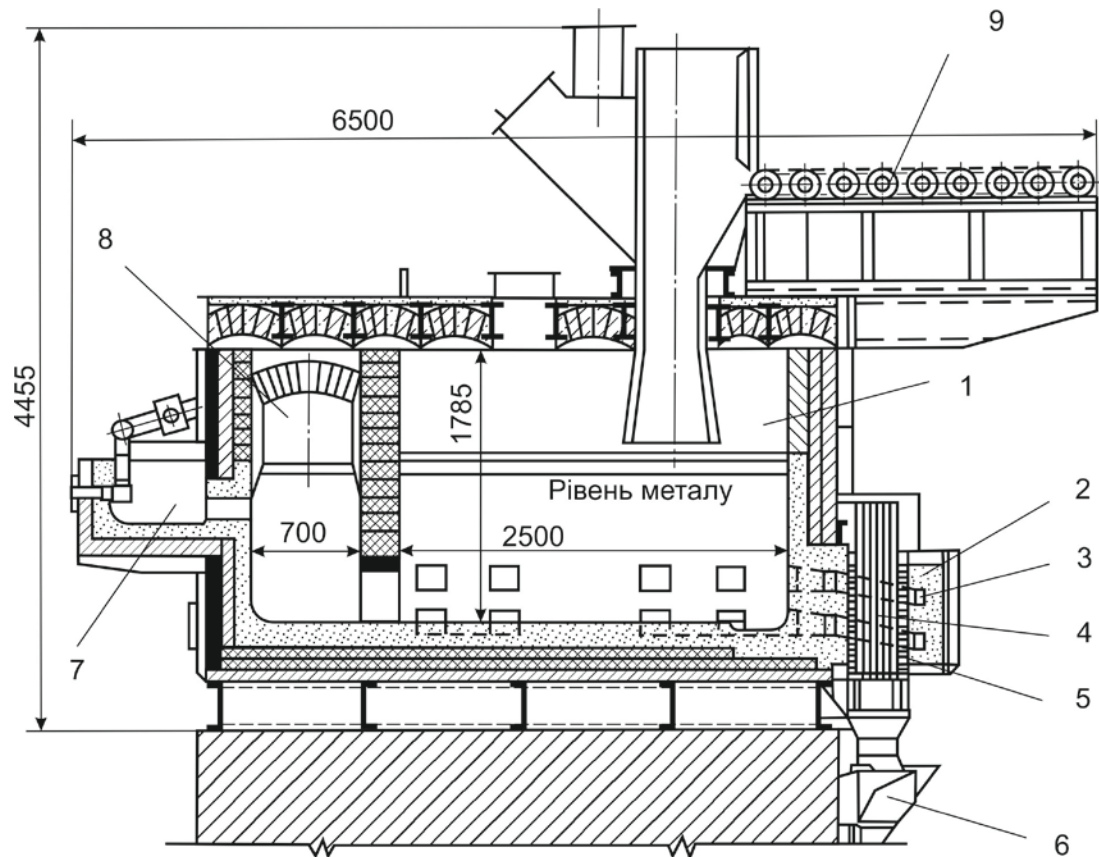


Рисунок 4.27 – Однофазна індукційна канална піч для плавки алюмінію [2]

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 плавлі латуні протягом 1,1 години. Тепловий к.к.д. при цьому становить 82,6 %.

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

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

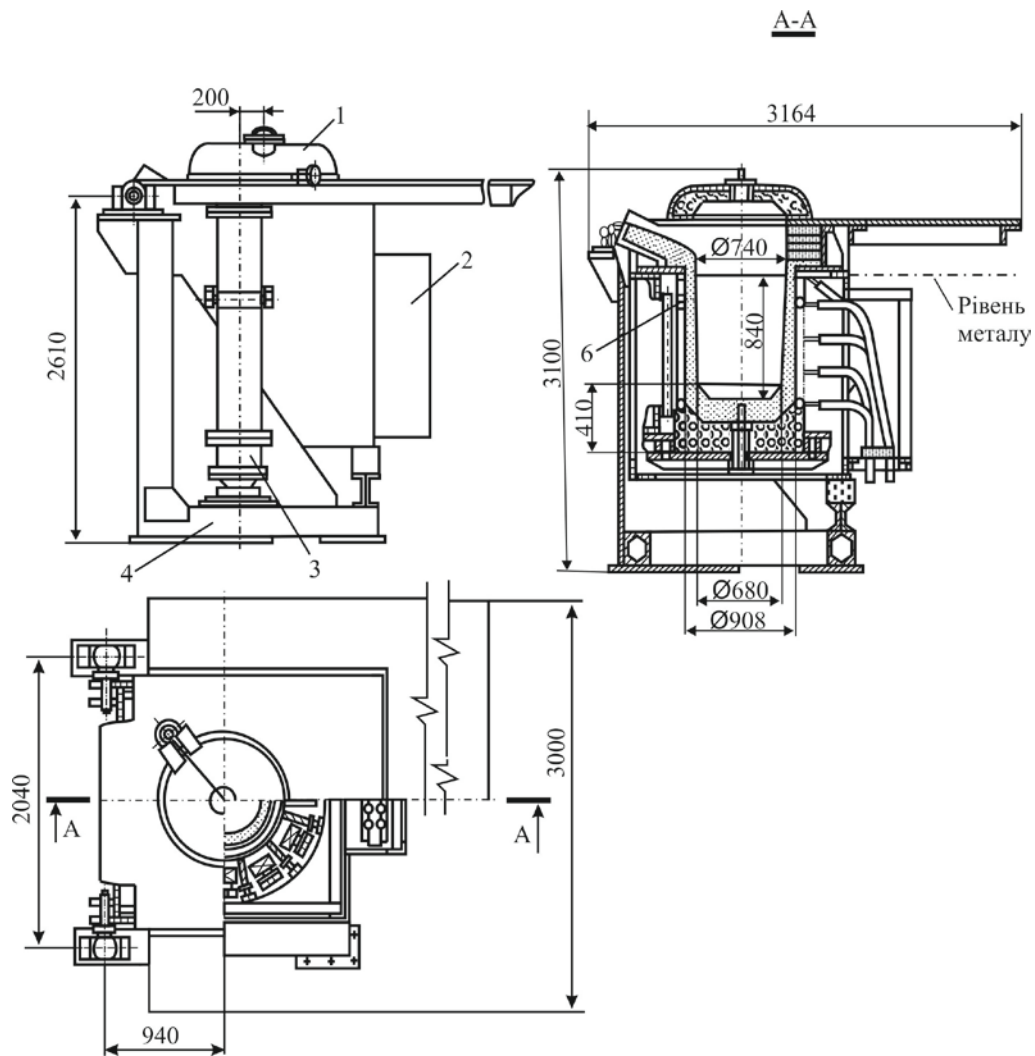
Таблиця 4.5 – Тепловий баланс індукційної печі ІЛО-0,6

Стаття балансу		МДж	%
Прихід те- пла	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 ко-тушку	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

#### 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 стали 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 плавки. Контроль над станом футерівки виконують спеціальним пристроєм, вмонтова-

ним 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.

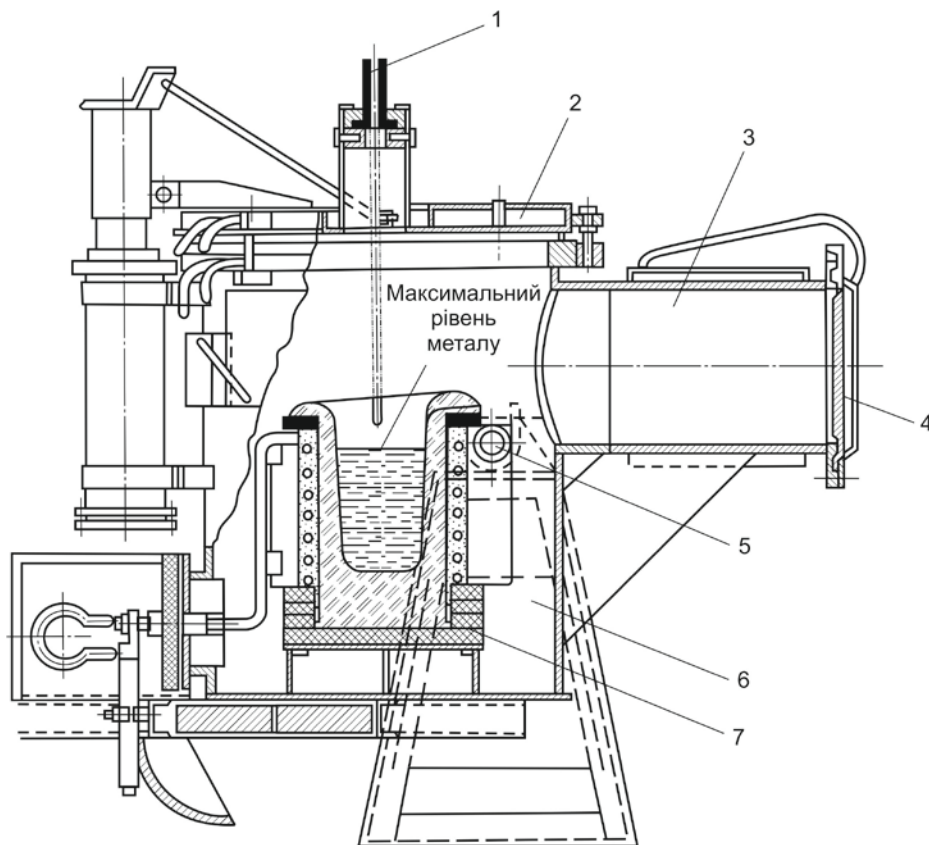
Питома витрата електроенергії в тигельних індукційних печах при плавленні металів становить: для алюмінію 550...700, для латуні 350...380, для магнію 400 кВт·година/т. Коефіцієнт потужності печей без компенсації 0,1...0,17.

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 нахилиють 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 патрубок 1 може бути вставлена термopара. Вакуум створюється обертовим масляним вакуумним насосом. Відсмоктування про-

водиться через патрубок 5, сполучений з віссю обертання печі. Електроживлення печі здійснюється від машинного генератора змінного струму.



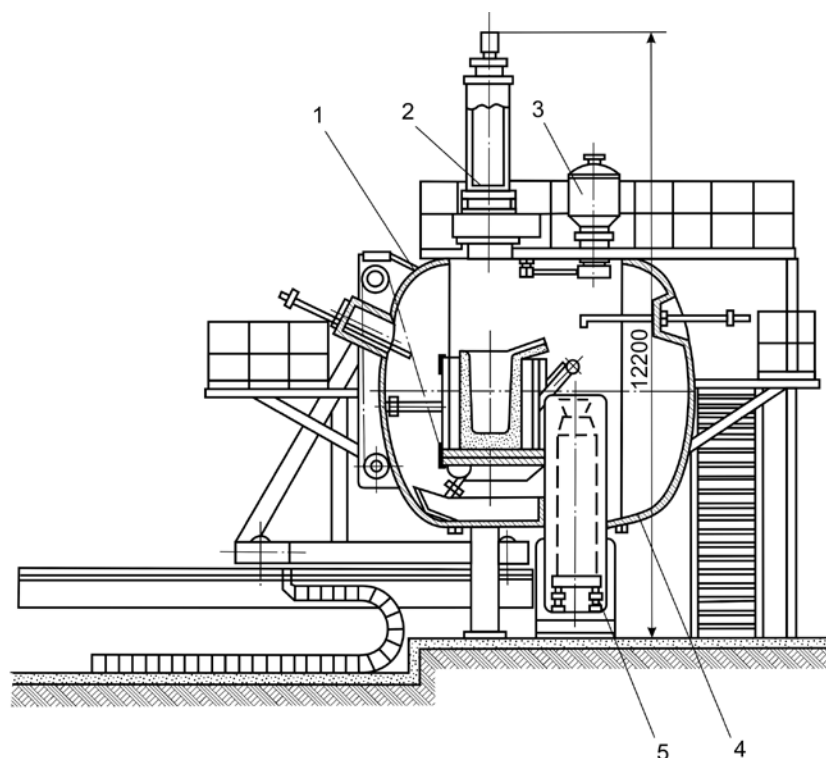
1) патрубок оглядового вікна; 2) кришка кожуха; 3) патрубок з виливницею; 4) кришка патрубка; 5) вісь нахилу; 6) кожух; 7) тигель

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 кришкою, 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. Таким чином, завантаження елементів шихти, що легують, подача виливниць і їх видалення, а також відбір проб і вимір температури

ри 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.

### 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;

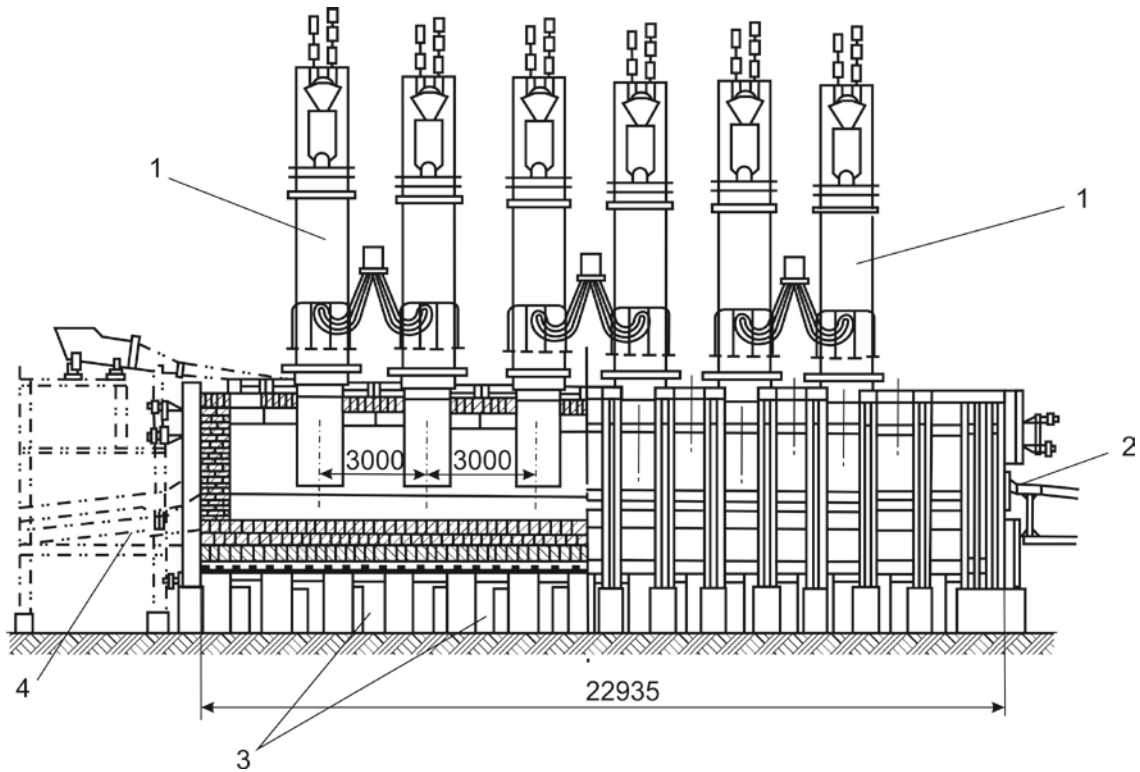
2) досить незначні втрати тепла з газами, що відходять, завдяки їхній невеликій кількості й низькій температурі;

3) висока концентрація  $\text{SO}_2$  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 самоспівкливих. 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 хромомagneзитової цегли, а у верхній частині (вище рівня ванни) – із шамотної цегли.



1) електроди; 2) лютка для жухелів; 3) фундамент; 4) лютка 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 лютку 4 у торцевій частині печі, жухелі – через лютку 2 у протилежному торці. Піч працює в безперервному режимі з періодичним випуском жухелів і штейну.

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

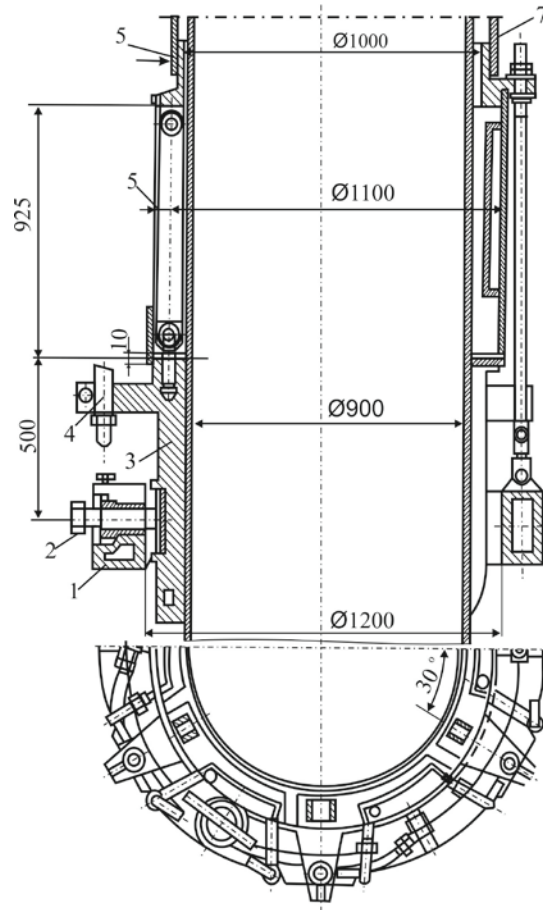


Рисунок 4.33 – Щоковий електродотримач (пояснення в тексті) [2]

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).

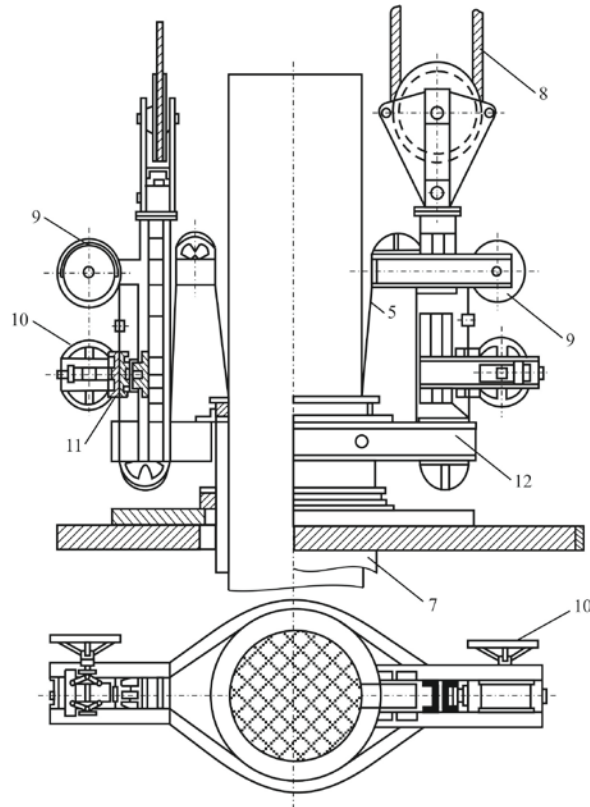


Рисунок 4.34 – Перепускний пристрій (пояснення в тексті)  
[2]

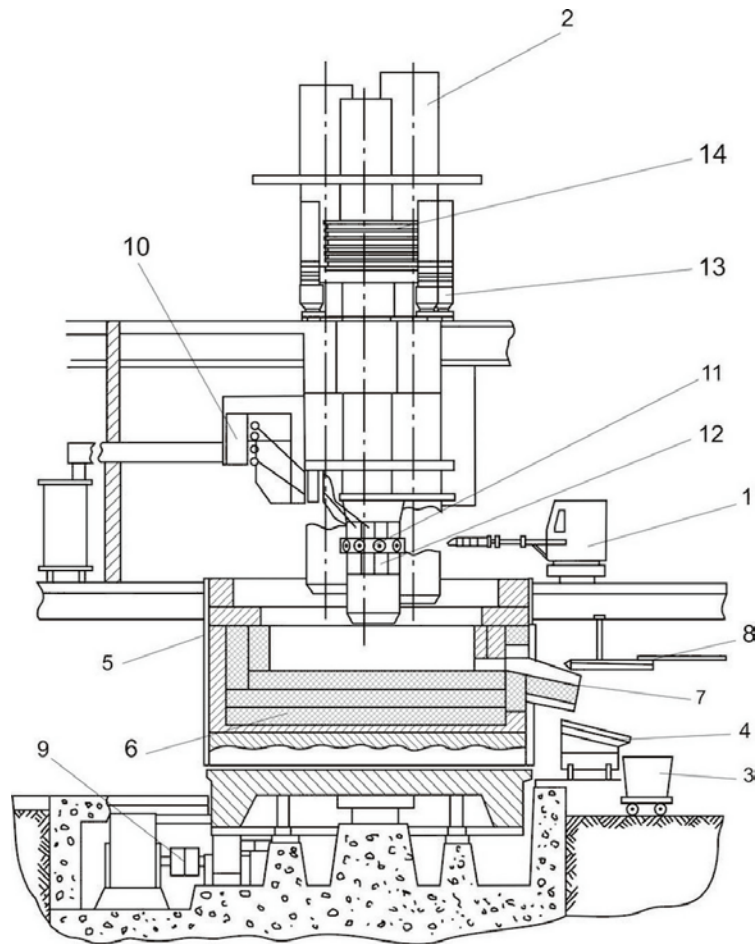
Підвіска й переміщення можуть здійснюватися також і за допомогою трьох гідравлічних плунжерів. Для перепуску самоспікливих електродів використовуються дві сталеві стрічки 5, що приварюються діаметрально до кожуха електрода. Стрічки намотано на барабани 9 і проходять через гальмові пристрої 11, ступінь затиснення яких регулюється маховичками 10. При перепуску зменшують притиск щік до електрода, 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 черінь зі зворотним склепінням. У тілі залізобетону розміщаються 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 розміщаються 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.

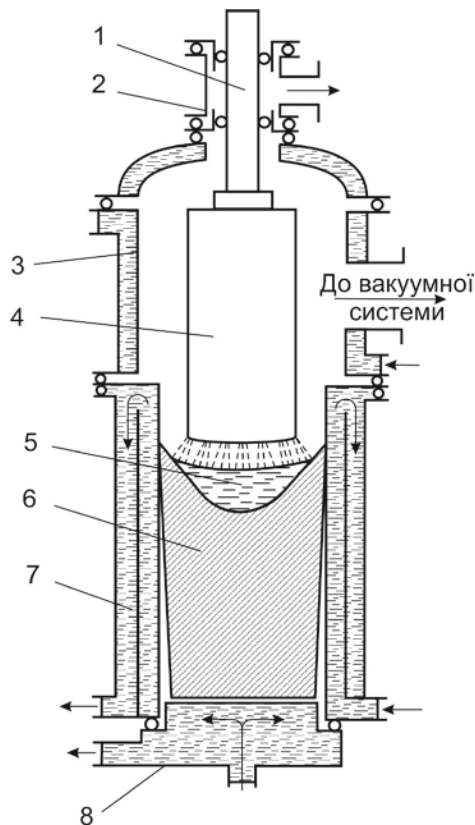
У міру витрати графітованих електродів необхідно робити їхній перепуск (змінювати положення струмопідвідних щік) і нарощування. Перепуск, як правило, роблять на 300...500 мм протягом плавки після того, як витрачено близько 70...80 % необхідної на процес електроенергії. Піч при цьому вимикають. Електроди 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 %.

#### 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 камери 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 сталі, 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 утворюється рідка ванна. Отриманий злиток може безупинно опускатися, 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 електрода, 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, відведення 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 натоплюється 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 використовуються тиглі металеві з водяним охолодженням, а також графітові, поміщені в сталевий водоохолоджувальний кожух.

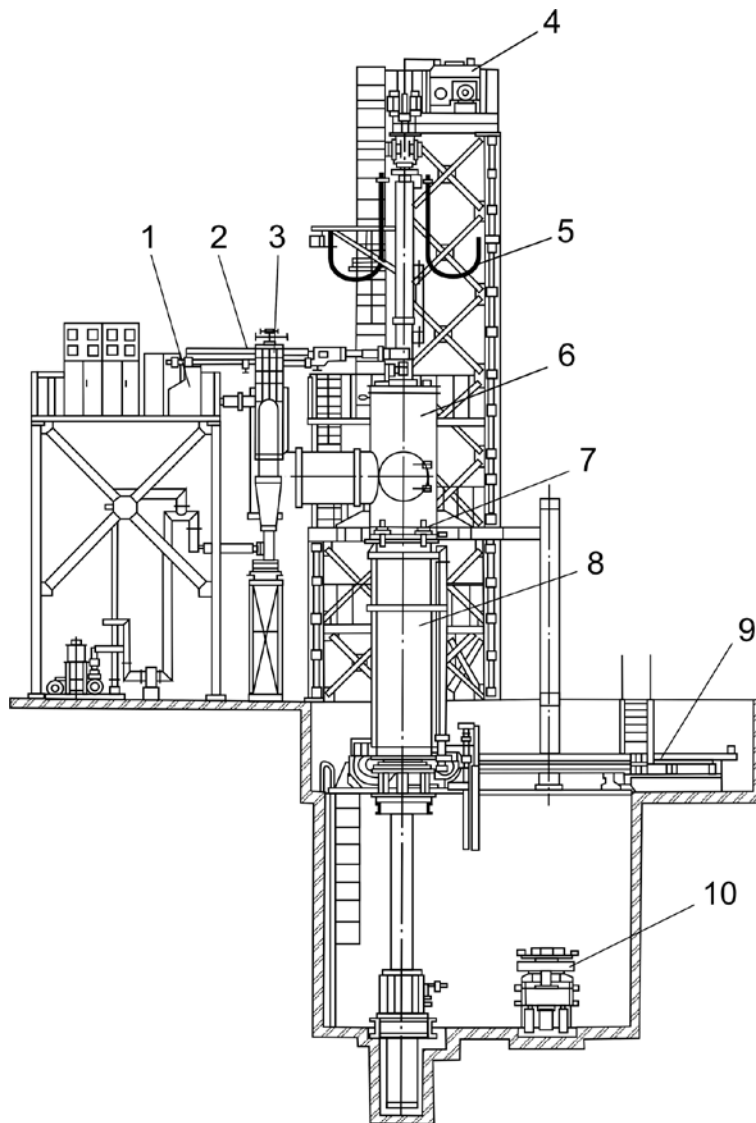
Загальний вид дугової вакуумної печі показаний на рис. 4.37. Піч має опорний каркас, на якому монтують всі елементи

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 плавлі 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.

### 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. Кі-

льцевий 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

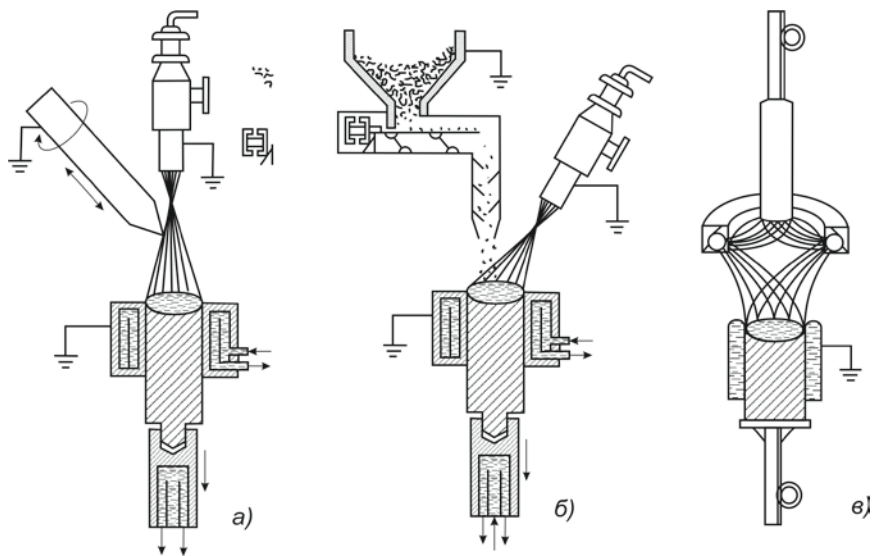
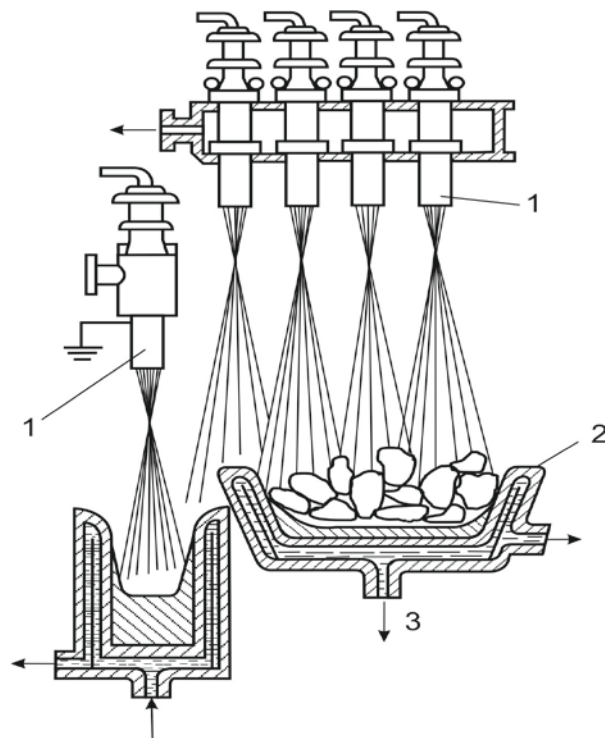


Рисунок 4.38 – Схеми електронно-променевих установок (пояснення в тексті) [2]

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 злитка, що кристалізується, одержують більш чистим. Таку

властивість має більшість домішок. Деякі домішки, навпаки, мають велику розчинність у твердому матеріалі.



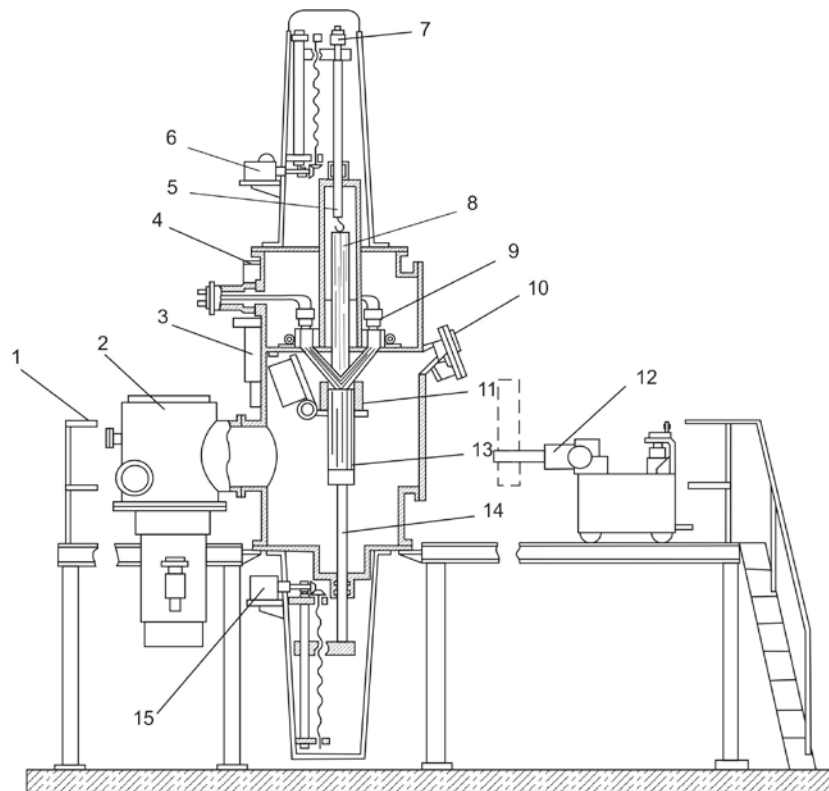
1) електронна гармата; 2) тигель; 3) донний отвір у тиглі

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 убік металу. Злиток (або пушка) переміщається по вертикалі й обертається. Для захисту катода від летючих домішок використовують формуючі електроди, що до-

зволяють 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.

### Агрегати хлорування

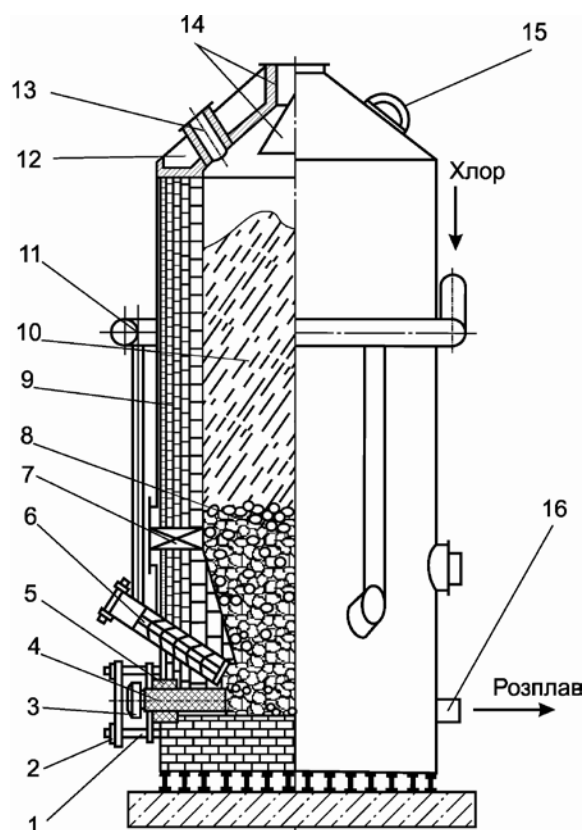
При виробництві деяких кольорових металів (титан, кремній) неможливо одержати чистий метал із заданими властивостями шляхом плавлення вихідної руди. У цих випадках метал з рудної сировини переводять у проміжну сполуку (хлориди, фториди і т.д.), яку очищають від домішок і з якого відновлюють чистий метал. 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 °C 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 ста-

ні випускається через нижню лютку.



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) лютка 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 хлорується основна маса брикетів при 1000...1100 °С. Така температура підтримується екзотермічним теплом реакцій. У міру на-

громадження 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

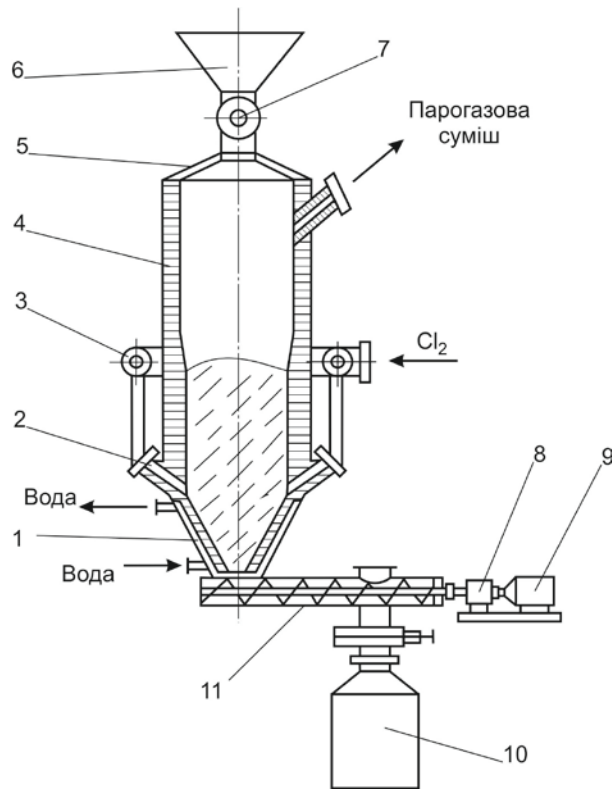


шахтним електропечам прийшли шахтні хлоратори безперервної дії.

*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 добором 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) кюбель 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.

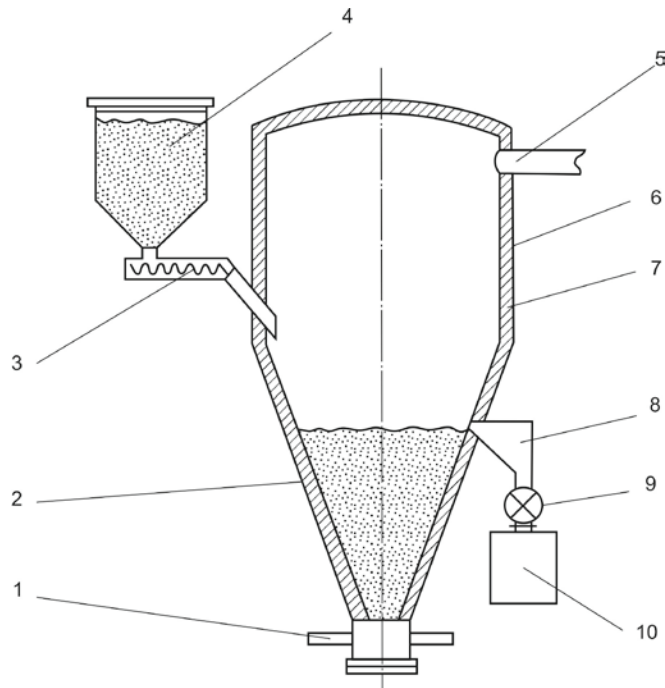
Дозування перед змішанням, змішання складових шихти, брикетування (гранулювання), сушіння й коксування значно ускладнюють технологію й підвищують вартість тетрахлориду

титану. 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-виробників. 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:

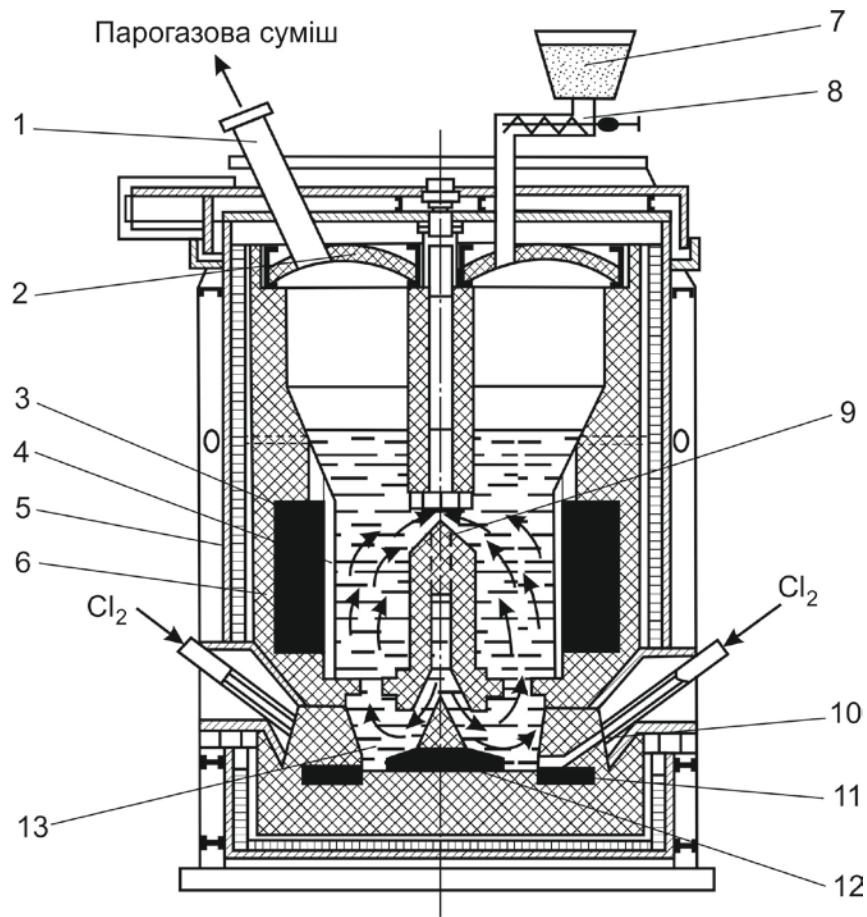
- при кипінні шару шихти має місце переміщення непрохлорованих часток шихти в нижню зону, у результаті чого в недогарку, що вивантажується, утримується підвищена кількість  $TiO_2$ ;
- підвищене зношування футерівки стінок;
- розтягнута по висоті зона реакції через більш інтенсивний теплообмін по висоті.

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 здрібненої 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.

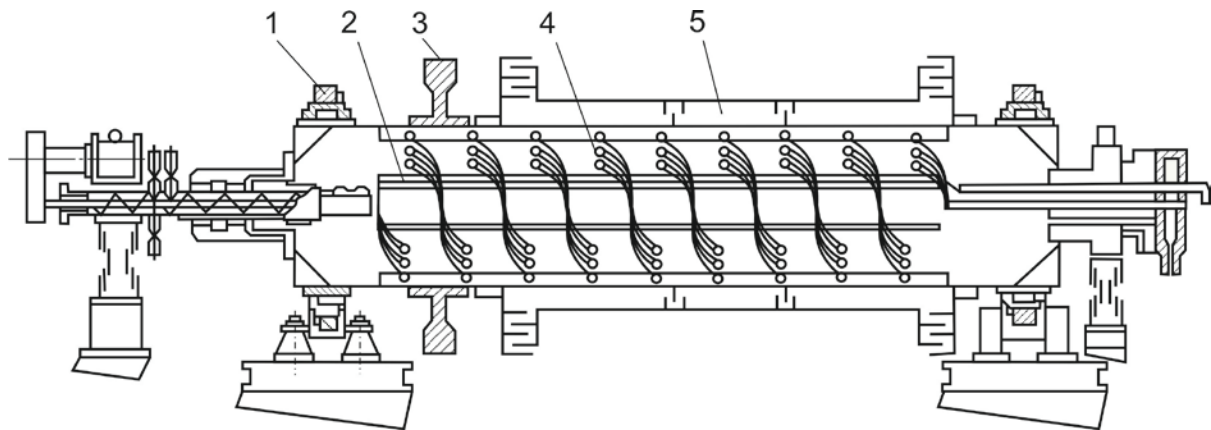
Процес хлорування ведуть в інтервалі температур 700...800 °С. При досягненні нормальної температури в штанги електродів подають воду для відводу надлишкового тепла екзотермічних реакцій хлорування. Після встановлення нормального режиму електроди відключають від трансформатора. Безперервний відвід надлишкового 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 обрїю, 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 термопару в чохла. 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 термопарами, які вставляються в спеціальні чохла з нержавіючої сталі.

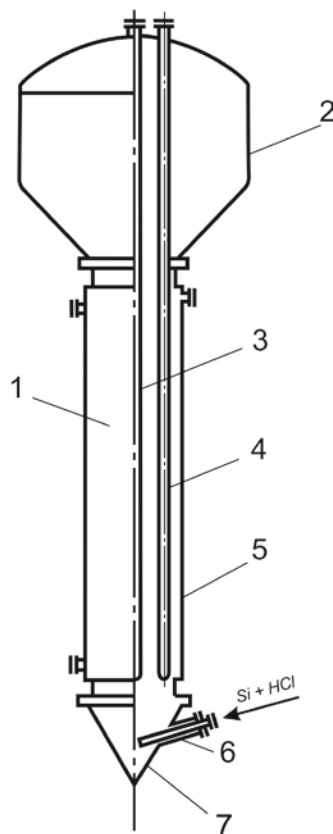
Кремній фракцій 30...40 мм завантажують із контейнерів через спеціальний патрубок. Одиничне завантаження < 1,2 т. Реактор працює періодично. Після завантаження кремнію реактор герметизують, продувають азотом і включають електронагрівачі. Обігрів ведуть до досягнення температури 573 К у всіх зонах апарата. 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 перегріву, 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 гази 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 пилюватих 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.

#### 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

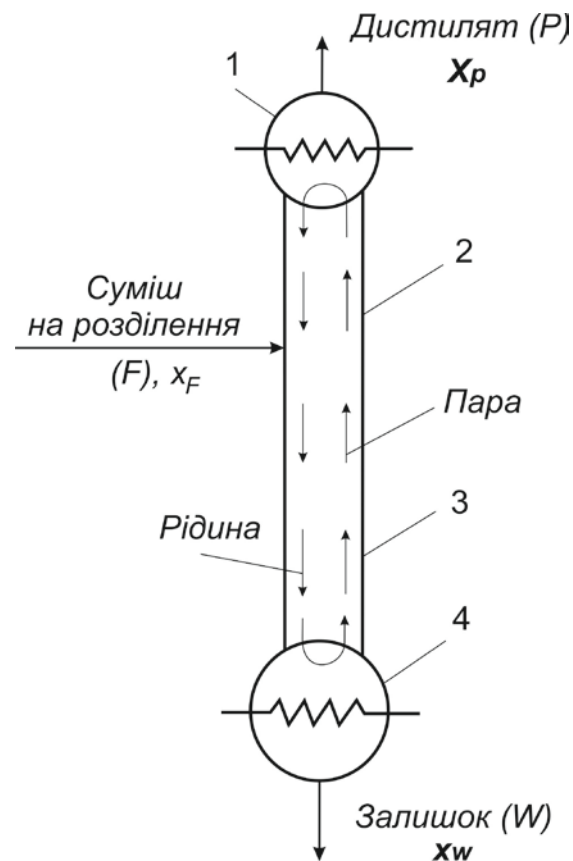
хаотично розподілені в основному продукті й ще більше розведення не змінює енергії взаємодії молекул домішки з навколишніми її молекулами основного продукту, тобто по суті має місце ідеальний розчин, зміна в якому кількості домішкової речовини супроводжується значним тепловим ефектом або зміною об'єму. 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 здійснюється 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 дистилляту (конденсату) може відбиратися звидти 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 звидти 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;
- насадкові – 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.

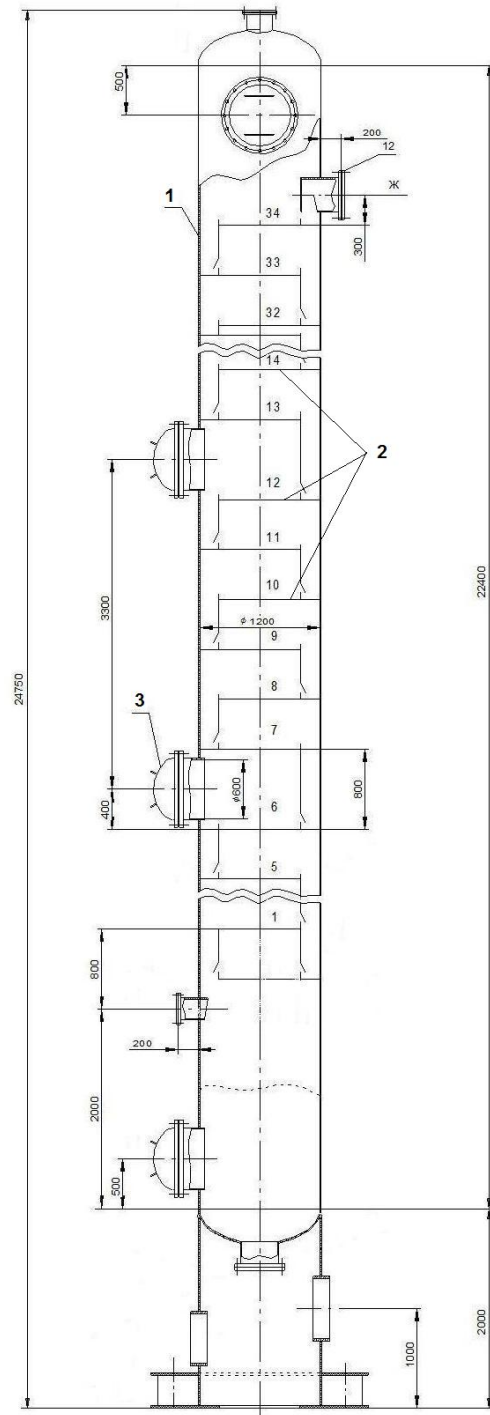
Найбільше поширення в промисловій практиці очищення хлорсиланів одержали тарілчасті колони (рис. 4.48). Відомі до теперішнього часу класифікації дозволяють розділити тарілчасту масообмінну апаратуру на чотири класи: барботувальні тарілки; струминні тарілки; плівкові тарілки; секційні тарілки. Основним 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 рідинною 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.

#### Апарати відновлення

Після очищення сполук кольорових металів від домішок здійснюється відновлення потрібного металу в апаратах відновлення. У виробництві полікристалічних кремнієвих стрижнів найбільше промислове поширення одержали методи водневого

відновлення хлорсиланів, а у виробництві титану – магнійтермічне відновлення.

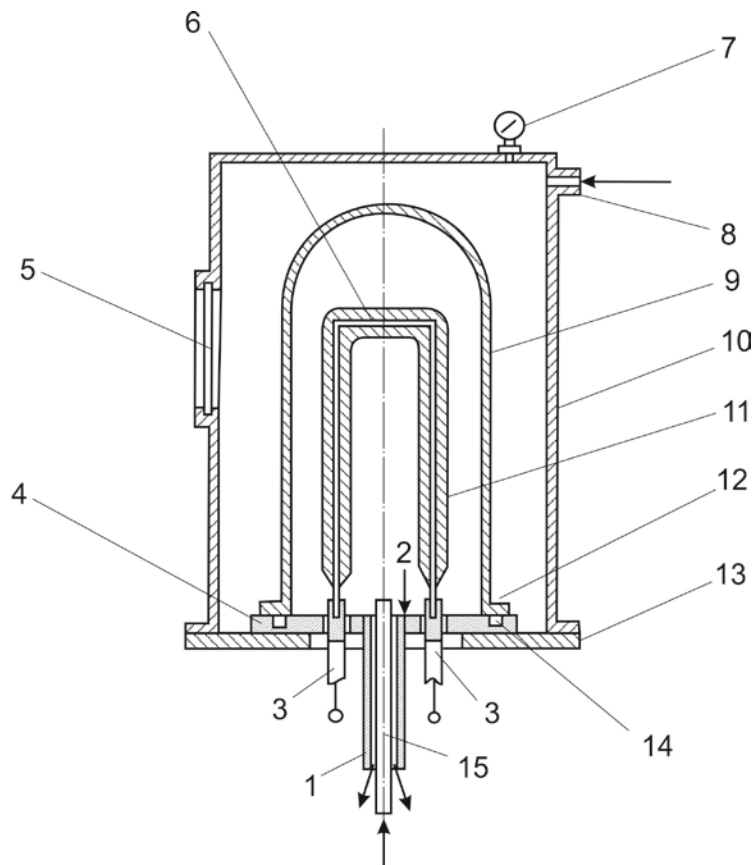
Основними елементами установки для одержання стрижнів кремнію є власне реактор, газовий пульт, блок електроживлення, блок керування.

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 використанні 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]

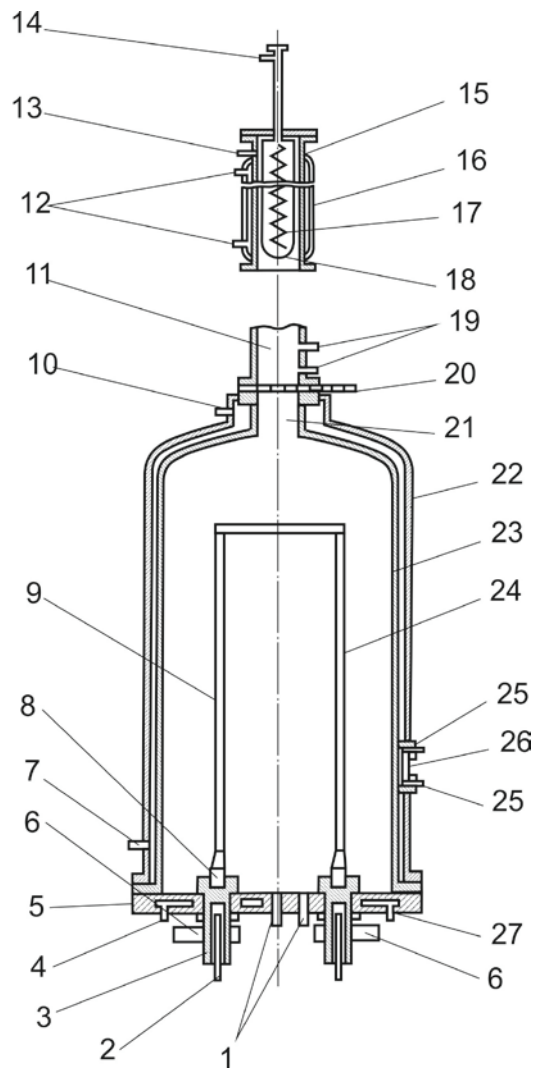
Основними труднощами при експлуатації реакторів із кварцу є створення умов рівномірного охолодження ковпака під час осадження кремнію. Крім цього, на стінках ковпака осідає тонкий шар кремнію, який ускладнює контроль процесу. У зв'язку із цим через певний час ковпак необхідно знімати й чистити. Істотними 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, отриманим у роботі [4], вміст мікродошків 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.

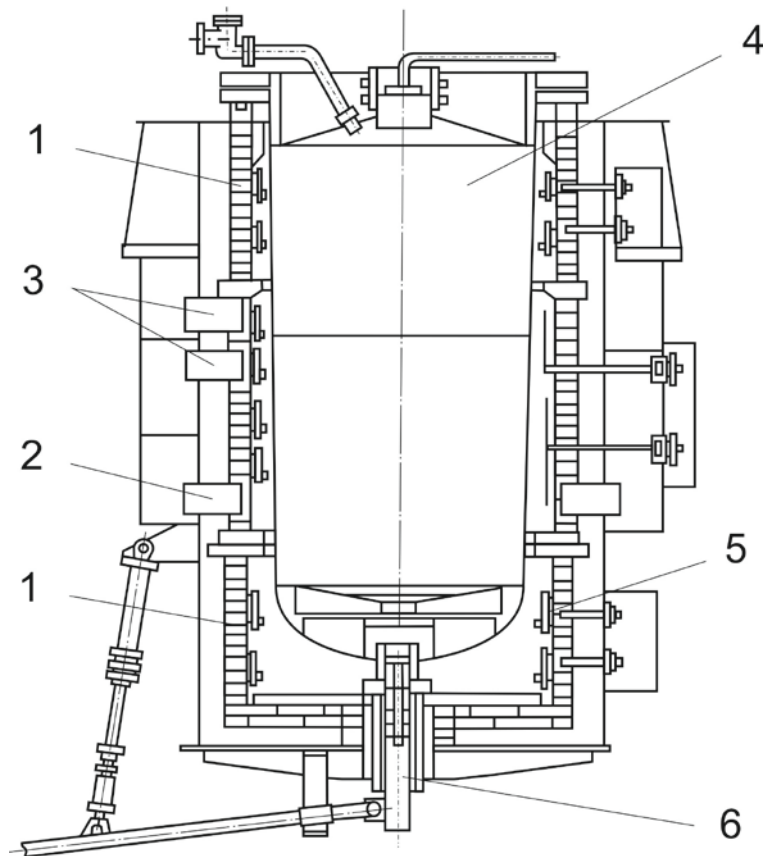
Для одержання рівномірного теплового поля в реакторі й виробництва щільних стрижнів кремнію великого діаметра із дрібнокристалічною структурою прагнуть створити такий реактор, щоб стрижні якнайдалі знаходились оди від одного. Для зниження теплового впливу запропоновано між стрижнями встановлювати екран, 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) патрубків 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) сталевий циліндричний сорочка; 16) охолоджуюча сорочка; 17) електрична спіраль; 18) кварцовий циліндр; 19) подача й відвід охолоджуючої води; 20) шибер; 21) горловина; 22) зовнішня сталевий 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) електрична піч; 2) канал для відводу гарячого повітря; 3) фурури 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 отвір

для проходження зливального обладнання. Там же розташовано два кронштейни для кріплення важеля й пневмоциліндру приво-ду вузла зливу хлористого магнію. Для виміру температури по-верхні 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 12Х18Н10Т товщиною 15...25 мм зі сферичним днищем і водоохолоджувальним флан-цем. На фланці реторти є кільцевий лаз для розміщення гумової прокладки. До днища реторти приварений патрубок із фланцем для приєднання зливального обладнання. Кришка апарата слу-жить для його герметизації. На ній розміщені вузли подачі в апа-рат вихідних речовин і інертного газу. Кришку заглиблюють в реторту на 250...350 мм, що виключає наявність в апараті холод-ної зони й знижує тим самим можливість утворення нижчих хло-ридів титану.

Несправжнє днище апарата служить опорою для блоку губ-частого титану. Воно запобігає влученню титану, що утворюєть-ся, в отвір зливального обладнання й створює простір між дни-щем реторти й блоком губчастого титану, у якому накопичується хлористий магній. Несправжнє днище являє собою металевий диск зі сталі 12Х18Н10Т товщиною 20...50 мм, посиленій знизу ребрами жорсткості.

Зливальне обладнання – один з найбільш важливих вузлів апарата відновлення. Основні вимоги, які висуваються до злива-льного обладнання, – надійність і зручність в обслуговуванні. У міру збільшення габаритів апаратів здійснений перехід до розмі-щення зливального обладнання внизу реторти.

На більшості підприємств конденсація магнію й  $MgCl_2$  при вакуумній сепарації реакційної маси проводиться в оборотну ре-торту [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 тетрахлорида 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 тетрахлорида 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 тетрахлорида титану.