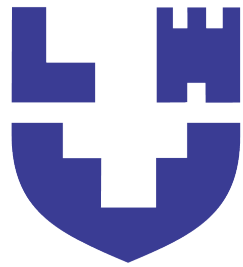


Міністерство освіти та науки України



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

УСТАТКУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг»
спеціальності G8 Матеріалознавство
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
денної та заочної форм навчання

Луцьк
2025

УДК 621.783.2(07)

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до друку вченою радою факультету митної справи, матеріалів та технологій ЛНТУ, протокол №__ від «__» _____ 2025 року.
Голова вченої ради ЛНТУ _____ В. В. Ткачук

Укладачі: _____ Мисковець С.В., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ
_____ Гусачук Д.А., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Рецензент: _____ Зайчук Н.П., к.т.н.,
доцент кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Імбірович Н.Ю., д.т.н.,
завідувачка кафедри матеріалознавства ЛНТУ

Устаткування процесів теплової обробки [текст] : Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 100 с.

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Устаткування процесів теплової обробки». Розглянуто процеси нагріву металу та устаткування для процесів теплової обробки полум'яні печі, електричні печі, індукційні установки та установки контактного електронагріву.

Вступ

Висока якість деталей досягається при правильному нагріванні металу для кування, штампування або термічної обробки в межах встановлених температур. Таким чином, нагрівання металу є важливою операцією ТП, яка значною мірою визначає якість і вартість продукції.

На практиці, як правило, раціоналізація нагрівання металу призводить не тільки до підвищення якості деталей, але і до підвищення продуктивності термічного цеху.

В термічному виробництві метал нагрівається в полум'яних печах і електронагрівачах. Полум'яні печі внаслідок універсальності до цього часу мають широке застосування. В них можуть нагріватися заготовки різної ваги, розмірів і форми.

Полум'яна піч - складний тепловий агрегат, в якому відбуваються процеси отримання тепла від горіння палива і передачі його металу, що нагрівається. Ця сукупність процесів теплообміну при горінні палива і рухові газів у робочому просторі між пічними газами, стінками і металом є тепловою роботою печі.

За характером нагрівання металу полум'яні печі поділяють на камерні (рис. 1) і методичні (рис. 2).

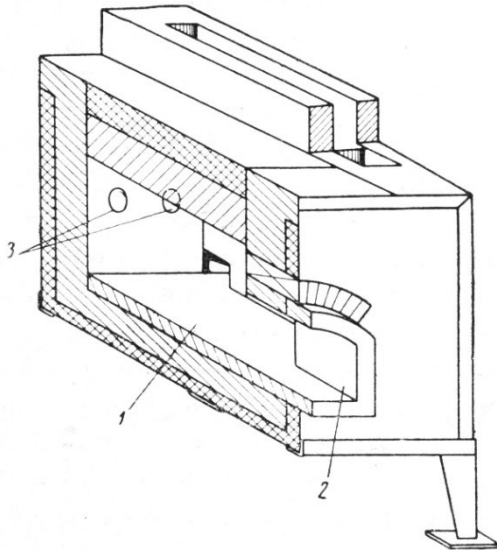


Рис. 1. Схема камерної печі

В камерних печах температура по всьому об'єму робочої камери однакова (1250...1400 °С). Відповідно, при завантаженні в піч холодний метал відразу потрапляє в середовище високої температури, що може привести при нагріванні товстих заготовок до браку - утворенню тріщин у

металі. Крім того, якщо ці печі без рекуператора, то вони працюють з низьким тепловикористанням, оскільки димові гази виходять із печі з високою температурою.

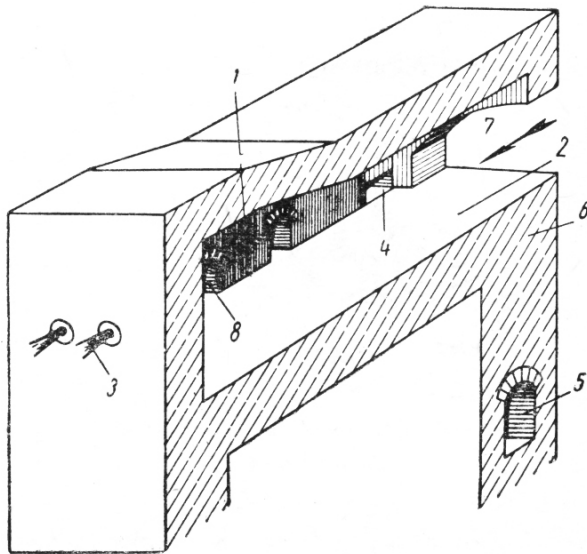


Рис. 2. Схема методичної печі

Неперервне і поступове нагрівання металу і краще тепловикористання досягається в методичних печах, де заготовки переміщуються поступово в зони зростаючої температури, тому умови нагрівання у них кращі, ніж у камерних печах.

Робота нагрівальних полум'яних печей пов'язана зі значною витратою палива. Ці печі є одним із основних споживачів палива у промисловості, причому в них переважно спалюються найбільш цінні види палива - газ і мазут. Нагрівальні полум'яні печі працюють з дуже низьким тепловикористанням; наприклад, камерні печі нерідко працюють з термічним коефіцієнтом корисної дії 5...6%, а механізовані напівметодичні печі з коефіцієнтом 10...12%. Одним із найефективніших засобів підвищення використання палива в полум'яних печах є підігрівання повітря, яке йде для горіння, теплом димових газів в спеціальних пристроях - рекуператорах.

Окрім низького тепловикористання, нагрівальні полум'яні печі мають другий істотний недолік - значне окислення металу, яке досягає до 3% і більше, при цьому плівка окалини перешкоджає отриманню поковок з чистою поверхнею і мінімальним припуском на механічну обробку. Крім того, окалина скорочує термін придатності штампів. Відповідно якість нагрівання металу у полум'яних печах не відповідає сучасним вимогам, оскільки процес ковальського виробництва характеризується впровадженням

нового високопродуктивного і точного обладнання, наприклад, механічних кувальних пресів, що потребують нагрівання металу без окалини.

Потрібне нагрівання металу, практично без окалини, отримується в електронагрівачах, - індукційному (рис. 3) і контактному (рис. 4), а також у

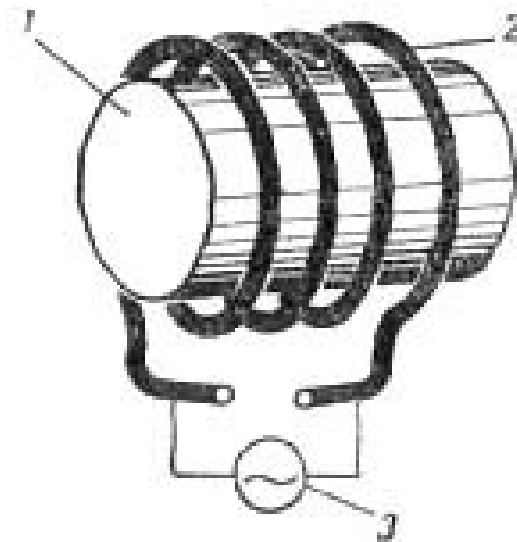


Рис. 3. Схема індукційного нагрівача

печах відкритого полум'я безокислювального нагрівання, де створюється захисна атмосфера внаслідок неповного спалювання палива, тож атмосфера печі складається в основному з газів відновлювачів.

Принцип індукційного нагрівання полягає в наступному: якщо в середину спіралі, яка має форму котушки (соленоїда) 1, помістити заготовку 2, а потім через соленоїд пропустити змінний струм, то утворене змінне магнітне поле буде індукувати в заготовці вихрові струми, які швидко нагрівають її до високої температури.

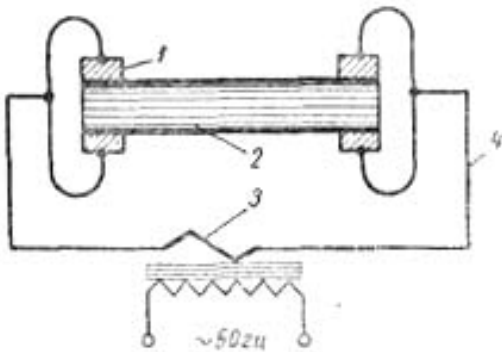


Рис. 4. Схема контактної електронагрівача

При контактному нагріванні заготовка 1 затискується між струмопровідними контактами 2 і через неї пропускається великий змінний струм низької напруги (до 15 В), при цьому відбувається швидке нагрівання заготовки до високої температури.

Тривалість електро-нагрівання в декілька разів менша, ніж у полум'яних печах, окалини не перевищує 0,5%.

Забезпечення високопродуктивного

безокислювального нагрівання, економія палива і металу, покращення екології.

1 Паливо і його спалювання

1.1 Теплотворення палива

Паливо за агрегатним станом поділяють на такі основні групи:

- пиловугільне (тверде);
- рідке;
- газоподібне.

В термічних цехах переважно спалюється рідке і газоподібне паливо. З твердого палива спалюється кам'яне вугілля й антрацит.

Теплотворення рідкого і твердого палива визначається кількістю тепла, яке виділяється при згорянні 1 кг палива, газоподібного – 1 м³.

Теплотворення палива позначається символом Q . В табл.1 приведені теплотворення основних елементів палива.

Таблиця 1 Теплотворення палива, (на 1 м³ газу)

Газ	Формула газу	Нижча теплота згорання, Кдж/м ³
Водень	H ₂	10750
Окис вуглецю	C	12640
Метан	CH ₄	35700
Ацетилен	C ₂ H ₂	56400
Етилен	C ₂ H ₄	59600
Етан	C ₂ H ₆	63500
Пропилен	C ₃ H ₆	86600
Пропан	C ₃ H ₈	91100
Бутилен	C ₄ H ₈	113700
Бутан	C ₄ H ₁₀	118600
Циклопентан	C ₅ H ₁₀	138500
Пентан	C ₅ H ₁₂	146100
Бензол	C ₆ H ₆	146200
Сірководень	H ₂ S	23400

Для підрахунку теплотворення твердого і рідкого палива використовують формулу Менделєєва:

$$Q_v = 81C + 300H - 26(O-S) \text{ ккал/кг} \quad (1),$$

$$Q_n = 81C + 246H - 26(O-S) - 6W \text{ ккал/кг} \quad (2),$$

W - волога в палива.

Теплотворення газоподібного палива визначається сумуванням добутків тепла горіння газоподібних компонентів, які входять до складу палива, на їх відсоток вмісту і діленням суми на 100%.

$$Q_u = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i E_i}{100} \quad (3)$$

Q_i - теплотворення компонента,

E_i - хімічний компонент.

Теплотворення газоподібного палива завжди дещо більше, ніж підраховане за формулою (3), оскільки домішки (смола та ін.) дають додаткове тепло, яке не враховується вказаною формулою.

1.2 Умовне паливо

Теплотворення різного палива значно коливається. Для зіставлення теплової цінності різного палива і ведення технічного обліку в споживанні палива за одиницю прийнято паливо з теплотворенням 7000 ккал/кг, яке називається умовним паливом.

Відношення теплотворення цього палива до теплотворення умовного палива називається калорійним еквівалентом палива:

$$\varepsilon_k = \frac{Q_n''}{7000} \quad (4),$$

Для кожного палива є встановлені калорійні еквіваленти.

Перерахунки за калорійними еквівалентами придатні лише для сумування з метою врахування запасів або поставок, які складаються з палива різних видів і марок.

1.3 Пиловугільне паливо

Зі штучного твердого палива у промислових печах застосовується пиловугільне паливо, яке виготовляється з різного вугілля шляхом розмелювання в спеціальних установках.

Пиловугільне паливо з великим вмістом летких речовин легко запалюється. Антрацит і кокс можуть бути використані в пиловидному стані тільки в суміші з іншим вугіллям, оскільки вони важко спалюються.

Вугілля, яке містить меншу кількість попелу і вологи, дає якісніше пиловугільне паливо; вологість вугільного пилу не повинна перевищувати 2%.

Великий вплив на якість спалювання пиловугільного палива має товщина помелу вугільного пилу; чим тонкіше помелення, тим більша сумарна поверхня пилу має контакт із повітрям у процесі горіння.

Товщина помелення встановлюється ситовим аналізом, тобто просіюванням проби вугільного пилу через сито певного номеру. Залишок пилу, що не пройшов через сито певного номеру, виражений у відсотках до загальної ваги проби, взятої для просіювання, визначає товщину помеленого пилу. Номеру сита по ГОСТу відповідає кількість отворів на 1 погонний см.

Товщина помелення пилу позначається через R з цифрою, яка відповідає номеру сита, наприклад: $R_{80} = 5...7\%$,

де 80 - номер сита,

5 ... 7% – товщина помелення.

В ковальських термічних печах доцільно спалювати пиловугільне паливо з товщиною $R_{80} = 10...15\%$.

1.4 Рідке паливо

Основою для рідкого палива є нафта. Переробка нафти заключається в її перегонці шляхом підігрівання з метою виділення світлого палива: бензину, керосину та ін; нафтові залишки, які отримуються після цього, називаються мазутом. Вихід мазуту з нафти становить у межах від 40% до 65%, він використовується як паливо і сировина для вироблення мінеральних мастил і олив.

Склад нафтового палива /мазуту/ мало відрізняється один від одного, змінюється переважно вологість, яка в окремих випадках досягає до 20%. Теплотворення мазуту Q біля 10000 ккал/кг.

За вмістом парафіну, який коливається 1.5...15%, мазут поділяється на такі марки: 20, 40, 60, 80, 100, і 200.

В залежності від вмісту сірки вони поділяються на:

малосірчані з вмістом сірки не більше 0.5;

сірчані з вмістом сірки не більше 1%;

високосірчані з вмістом сірки не більше 1...4%.

Мазути, що містять парафін, мають суттєвий недолік: вони дуже в'язкі і можуть загуснути навіть влітку. Зі збільшенням вмісту парафіну в мазуті в'язкість і схильність до застигання збільшується, це утруднює злив при транспортуванні і подачу їх трубами до печей.

В'язкість мазуту вимірюють спеціальним приладом: віскозиметром Енглера. Одиницею вимірювання в'язкості є число градусів по Енглеру, яке показує відношення часу протікання 200 см³ дослідної рідини через отвір певного діаметру до часу протікання такої кількості води при 20 °С.

В'язкість мазуту марки 40 при 75 = 10 по Енглеру ($E_{75} = 10$); підігрівання мазуту понижує його в'язкість. Тому для зливу і передачі трубами мазуту марок 40 і 80 навіть літом необхідно підігрівати. Найбільша температура підігрівання повинна бути на 20 нижча температури спалювання мазуту; підігрівання мазуту вище температури самоспалахування може привести до вибуху і пожежі.

1.5 Газоподібне паливо

Застосування газоподібного палива в промислових печах спрощує їх обслуговування, дозволяє легко регулювати і підтримувати необхідний температурний режим, підвищує продуктивність печей і покращує якість продукції.

Розрізняють природні і штучні гази, до яких належать продукти газифікації твердого палива, а також гази, які отримують, як відходи металургійного виробництва.

Природний газ. Частина природних газів за своїм походженням зв'язана з нафтовими родовищами, які завжди містять горючі гази, але процеси газоутворення значно ширші, ніж нафти. Так, є кам'яновугільні гази, чисто газові родовища. Промислове значення мають родовища вільних горючих газів і газів, розчинених у нафті (супутніх).

Найбільш поширеною складовою частиною, яка входить до складу газу, є метан (газ без кольору, без запаху і вдвічі легший за повітря). До складу газів входять: водень, етан, етилен, пропан, бутан (не отруйні, горять), сірководень, окис вуглецю, (отруйні, горять), вуглекислота, азот, кисень (не горять, не отруйні).

В газах, які містяться над нафтою, завжди є пари з найбільш легких фракцій бензину - жирні вуглеводи: пропан, бутан та ін.

Вони при зміні температури чи тиску легко переходять з газоподібного стану в рідкий, і навпаки.

Природний газ з вмістом в 1 м³ більше 50 г жирних вуглеводів називаються жирними. Жирні вуглеводи мають більше теплотворення, а тому, чим більше їх входить до складу газу, тим краще. Гази, які містять мало жирних вуглеводів, називаються сухими.

Вміст сірководню у природних газах зазвичай не перевищує 0.3 - 1.0%; він не бажаний, оскільки шкідливо впливає на метал, що нагрівається.

1.6 Штучні горючі гази

До штучних горючих газів належать генераторний і світільний, а також побічні продукти металургійного виробництва - коксовий і доменний гази.

Генераторний газ з штучно горючих газів має найбільше застосування на заводах машинобудівної промисловості. Утворюється він при неповному горінні палива з виділенням горючого елемента - окису вуглецю в спеціальних пристроях, які називаються газогенераторами.

Вигідність використання газифікації твердого палива витікає з таких положень. Спалювання твердого палива безпосередньо в печах пов'язане з рядом незручностей: трудність отримання високої температури у робочому просторі печі; трудність регулювання температури, тиску і атмосфери в печі; необхідність мати більш складні печі; трудностю їх обслуговування; необхідність мати зайву площу для зберігання твердого палива, забрудненням цеху і т.д. Крім того, добрий результат отримується при спалюванні палива з великою теплотворністю, тобто палива високосортного, тоді як в газогенераторі можна використовувати низькосортне паливо.

В спеціальних генераторах при поперемінному вдуванні з повітрям водяного пару отримують водяний газ з теплотворенням 2600 ккал/м³, в якому горючими речовинами є водень і окис вуглецю.

Коксовий і світільний газ. Коксовий газ отримується при переробці кам'яного вугілля на кокс і є побічним продуктом. Переробка відбувається

сухою перегонкою в спеціальних коксових печах при температурі 900 ... 1200 °С на протязі 15 - 20 год. Вихід коксового газу до 330 м³ на 1 т вугілля.

Світільний газ за складом і теплотворенню близький до коксового і утворюється в результаті сухої перегонки не коксованого вугілля.

1.7 Розрахунок горіння палива

При розрахунку горіння палива визначається:

- 1) теплотворення палива;
- 2) кількість повітря, необхідного для повного спалення одиниці палива (для твердого і рідкого палива - 1 кг, газоподібного – 1м³);
- 3) кількість і склад продуктів, що утворюється при горінні (димових газів);
- 4) температура горіння палива.

Для спалювання палива необхідна значна кількість повітря; наприклад, для повного спалювання 1 кг кам'яного вугілля необхідно 8...9 м³ повітря, мазуту 10,5...12 м³. При цьому при спалюванні кам'яного вугілля утворюється продуктів горіння 8,5...9,5 м³, мазуту 11,5...12,5 м³.

Розрахунок горіння твердого і рідкого палива виконується за даними його елементарного аналізу. Склад повітря за об'ємом приймається 21% - кисню і 79% – азоту. Крім того, приймається, що температура повітря і продуктів горіння дорівнюють 0°С при атмосферному тиску 760 мм рт.ст. (нормальні умови). Насправді повітря, а особливо продукти горіння, мають високу температуру (1300...1500 °С). Відомо, що зі збільшенням температури об'єм повітря і газоподібних продуктів зростає, на кожен градус відбувається збільшення об'єму на $\frac{1}{273}$ (закон Гей-Люсака).

Відповідно, дійсний об'єм газоподібних продуктів V_t при температурі t буде дорівнювати:

$$V_t = V_0 + V_0 t \frac{1}{273} = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \text{ м}^3,$$

де V_0 – об'єм при нормальних умовах в м³;

$\beta = \frac{1}{273}$ – коефіцієнт об'ємного розширення газу.

Відповідно до закону Гей-Люсака зі зміною температури змінюється також швидкість газів і їх щільність:

$$W_t = W_0 (1 + \beta t) \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \text{ кг/м}^3,$$

де W_0, ρ_0 – швидкість і щільність газу при нормальних умовах;

W_t, ρ_t – швидкість і щільність газу при даній температурі і

атмосферному тиску 760 мм рт. ст.

1.8 Кількість повітря і продуктів горіння

Найменша кількість повітря, необхідна, згідно з розрахунком, для повного згоряння одиниці палива даного складу, прийнято називати теоретичною витратою повітря (L_m).

Практично дуже важко досягти повного горіння без надлишку повітря, тому при горінні палива доводиться подавати повітря більше, ніж це потрібно теоретично. Цей надлишок повітря необхідний для кращого змішування (зіткнення) повітря з паливом, тому що, чим краще змішується паливо з повітрям, тим більша його поверхня стикається з повітрям, а отже, повніше і швидше відбувається горіння. У свою чергу, чим швидше проходить процес горіння, тим більше при цьому виділяється тепла в одиницю часу і тим вище буде температура горіння. Газоподібне і рідке паливо краще змішується з повітрям, ніж тверде паливо, а з твердого палива краще буде змішуватися те, що дрібніше, тому що чим дрібніше паливо, тим більшу поверхню воно має. Отже, надлишок повітря при спалюванні твердого палива повинний бути більший, ніж при спалюванні газоподібного і рідкого.

Відношення дійсної кількості повітря, що вводиться в піч для горіння, до теоретичної кількості повітря називається коефіцієнтом надлишку повітря; звичайно, позначається цей коефіцієнт буквою α_n . Значення коефіцієнта α_n беруться такі:

- для твердого палива 1,3...1,6;
- пиловугільного палива 1,2...1,25;
- рідкого палива 1,1...1,2;
- газоподібного палива 1,05...1,1.

Це показує, що понад теоретично необхідну кількість повітря підводиться надлишок повітря для горіння твердого палива 30...60%, рідкого – 10...20% і газоподібного – 5...10%.

Знаючи теоретично необхідну кількість повітря L_m і значення коефіцієнта надлишку повітря α_n , легко обчислити дійсні витрати повітря за формулою:

$$L_o = \alpha_n L_m .$$

Великий надлишок повітря при горінні шкідливий, тому що при цьому знижується температура горіння і зменшується продуктивність печі і тепловикористання. Крім того, сталь, інтенсивно поглинаючи при нагріванні кисень, перетворюється на поверхні в окис заліза (окаліну), тому, чим більше надлишок повітря при горінні, тим інтенсивніше відбувається окислювання, отже, більшими будуть втрати металу на окаліну.

1.9 Температура горіння

Температура горіння будь-якого палива непостійна і змінюється залежно від умов горіння: кількості повітря, що підводиться, температури, до якої попередньо підігрівається паливо, і повітря, що беруть участь у горінні, і якості підготовки палива для горіння (наприклад, при спалюванні рідкого палива від якості його розпилення). Прийнято розрізняти три температури горіння палива: калориметричну, теоретичну і дійсну.

Калориметрична і теоретична температура. Калориметричною називається температура, до якої нагрівалися б продукти повного горіння, якби все тепло палива і повітря пішло тільки на їхнє нагрівання, тобто температура, що отримується при горінні без втрат.

Калориметрична температура горіння визначається за формулою

$$t_k = \frac{Q_n^p + q_m^\phi + q_n^\phi}{c_s V_o},$$

де Q_n^p – теплотворність палива в ккал/кг, а для газоподібного палива в ккал/м³;

V_o – кількість продуктів горіння палива в м³/кг чи м³/м³;

c_s – середня теплоємність продуктів горіння в інтервалі температур від 0 до t° С.

Середню теплоємність продуктів горіння твердого і рідкого палива можна визначити за формулою:

$$c_s = 0,323 + 0,018 \frac{t_n}{1000},$$

де $t_n = \eta t_k$ визначається приблизно;

$q_n^\phi = c_n t_n L_o$ – фізичне тепло повітря в ккал/кг чи ккал/м³;

де L_o – кількість повітря, що надходить для горіння, у м³/кг чи м³/м³;

c_n – середня теплоємність повітря в ккал/м³°С

t_n – температура підігрівання повітря в °С;

$q_m^\phi = c_m t_m$ – фізичне тепло палива в ккал/кг чи ккал/м³;

де c_m – середня теплоємність палива в ккал/кг°С чи в ккал/м³°С;

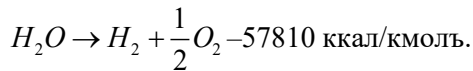
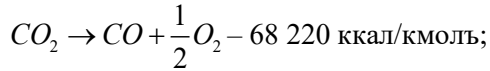
приймається: вугілля – 0,32, мазуту – 0,45 ккал/кг°С,

а газоподібного палива визначається за спеціальними графіками.

Калориметрична температура t_k горіння різного палива не завжди має пряму залежність від їхньої теплотворності, але залежить від обсягу продуктів горіння, що утворюються; наприклад, кам'яне вугілля з теплотворністю $Q_n = 7300$ ккал/кг дає $t_k = 2010$ °С, а газовий кокс із теплотворністю $Q_n = 6917$ ккал/кг дає вищу температуру $t_k = 2090$ °С.

До складу продуктів горіння палива входять вуглекислий газ CO₂ і водяні пари H₂O. При високій температурі реакції утворення CO₂ і H₂O

обернені, відбувається явище дисоціації – обернене розкладанню на більш прості і вихідні елементи по реакції



Це явище супроводжується поглинанням тепла, отже, – зниженням температури горіння.

Температура горіння з урахуванням втрати тепла на дисоціацію при спалюванні палива з теоретичною кількістю повітря і температурою повітря і палива $\theta^\circ\text{C}$ називається теоретичною температурою горіння $t_{\text{теор}}$.

Втрати на дисоціацію при горінні з температурою до 1500°C невеликі, і в практичних розрахунках для цих випадків їх можна не враховувати.

Дійсна температура. Як відомо, паливо спалюється з надлишком повітря, що знижує температуру горіння.

Крім того, частина тепла продуктів горіння використовується в робочій камері печі на нагрівання металу і втрачається через кладку камери в атмосферу; це теж знижує температуру в робочій камері печі. Дані втрати залежать від конструктивних особливостей печі та якості її обслуговування.

Температура в робочому просторі печі, вимірювана пірометром, тобто, яка відповідає горінню в реальних умовах із врахуванням тепловіддачі в робочому просторі й усіх втрат, називається дійсною температурою. Зв'язок дійсної температури печі з калориметричною дає пірометричний коефіцієнт:

$$t_n = \eta t_k,$$

де t_n – дійсна температура в робочому просторі печі (заміряна пірометром);

t_k – калориметрична температура;

η – пірометричний коефіцієнт.

Величина пірометричного коефіцієнта залежить від конструкції і режиму роботи печі (0,65...0,85).

1.10 Температура спалахування і реакції горіння палива

Горіння – це процес окислення, який відбувається з великою швидкістю, супроводжується комплексом хімічних і фізичних явищ (дифузія, теплообмін і інші) у їх взаємозв'язку.

Горіння відбувається нормально тільки при певних умовах: достатній кількості повітря, яке надходить для горіння, і температурі в зоні горіння. Якщо не буде витримана одна з цих умов, паливо горіти не буде. Відповідно, для горіння необхідно, щоб реагуючі речовини – паливо і повітря були підігріті до t° , при якій горіння буде відбуватися самостійно без додаткового підводу тепла в зону горіння. Ця температура називається температурою

спалахування палива; вона залежить від властивостей палива: теплопровідності, теплоємності складу горючих летких речовин, їх склад легкості виділення із палива, від надлишку повітря в зоні горіння і ін.

Таблиця 2 Температури спалахування

Паливо	Температура спалахування, °С	Паливо	Температура спалахування, °С
Торф	225	Мазут	580
Дрова	300	Генераторний газ	650
Буре вугілля	300...400	Світильний газ	650
Кам'яне вугілля	400...500	Природний газ	650
Антрацит	700	Доменний газ	700...800

З наведених даних бачимо, що чим менший вміст летких речовин в паливі і чим складніше вони виділяються з палива при горінні, тим вища температура спалахування.

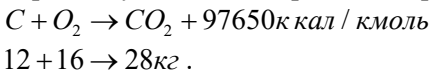
1.11 Реакції горіння

В основі горіння лежить хімічне перетворення речовин.

Хімічні реакції можуть відбуватись між речовинами, які знаходяться в одній і тій же фазі (наприклад, твердій) і між речовинами в різних фазах – твердій і рідкій або твердій і газоподібній. В першому випадку реакції називається гомогенними, а в другому – гетерогенними.

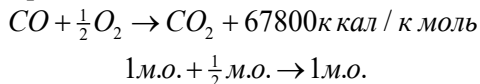
Горіння вуглецю

Реакція горіння вуглецю є гетерогенною реакцією:

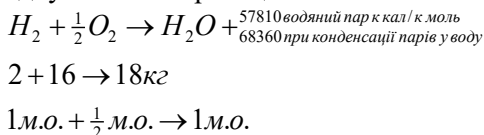


При такому горінні виділяється окис вуглецю CO – речовина газоподібна і горюча, називається чадним газом.

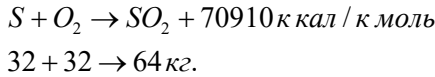
В випадку додаткового підведення повітря в зону горіння утворений окис вуглецю може з'єднуватись з ще $\frac{1}{2}$ молекулярного кисню і згоряти в вуглекислий газ CO₂ за реакцією:



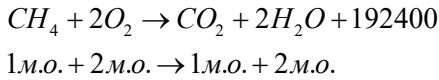
Горіння водню відбувається за реакцією:



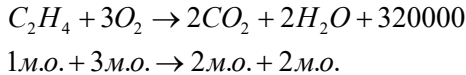
Горіння сірки:



Метан



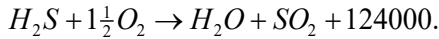
Етилен



Етан



Сірководень



2 Спалювання газоподібного палива

Газоподібне паливо є найзручнішим для спалювання в промислових печах, оскільки легке змішування газу з повітрям і можливість підігрівання не тільки повітря а й газу створюють найсприятливіші умови для горіння – майже без надлишку повітря; газоподібне паливо дає можливість легко підтримувати бажану атмосферу в печі на газоподібному паливі легше здійснити автоматичне регулювання теплового режиму і простіше сягнути сприятливого збігу енергетичних і технологічних умов для нагрівання металу.

При спалюванні газоподібного палива увагу треба приділяти створенню сприятливих умов для протікання підготовчих стадій горіння – швидкого і повного змішання газу з повітрям і швидкого прогрівання газоповітряної суміші до t спалахування.

Змішування газу з повітрям виконується механічним шляхом, переважно турбулізацією потоків газу і повітря. При цьому відбувається взаємне проникнення (дифузія) газу і повітря, внаслідок чого і відбувається змішування.

Друга стадія процесу горіння – прогрівання газоповітряної суміші до температури спалахування – відбувається зі швидкістю, величина якої залежить від властивостей газу (теплопровідності) й умов теплообміну, що визначаються температурою в камері горіння, а також її формою і розмірами.

Прогрівання суміші відбувається внаслідок тепловипромінювання поверхні камери горіння і сусідніх зон горіння. Випромінювання ніби пронизує газоповітряну суміш на всю глибину і запалює її.

2.1 Горілки для спалювання газу

Для спалювання газу в промислових печах застосовують спеціальні горілки, призначення яких підводити газ і повітря до печі, найбільш добре змішувати їх і регулювати процес горіння.

Змішувати в горілках газу з повітрям відбувається:

1) підводом газу і повітря з різними швидкостями (оскільки із збільшенням різниці швидкостей газу і повітря при заданій середній швидкості потоків покращується змішування). Якщо швидкість підводу газу невелика, то для кращого змішування його з повітрям, яке має більшу питому вагу, повітряний струмінь підводиться над газовим струменем;

2) підвід струменів газу і повітря під кутом один до одного (чим більший кут зустрічі струменів, тим краще змішування і короткий факел полум'я);

3) шляхом спеціального завихрення струменів газу і повітря.

Чисельні конструкції горілок можна спрощено класифікувати за двома основними признаками:

1. За місцем змішування газу з повітрям:

а) зовнішнє змішування – після виходу з горілки;

б) внутрішнє змішування в горілці повне або часткове;

в) попереднє змішування до надходження в горілку – в спеціальному змішувачі.

2) за тиском:

а) горілки низького тиску;

б) горілки високого тиску.

Горілки з зовнішнім змішуванням і зі змішуванням у самій горілці належать до горілок низького тиску.

Горілки з попереднім змішуванням газу з повітрям – до горілок високого тиску

2.2 Горілки низького тиску

Змішування газу з повітрям за межами горілки дає можливість не обмежувати t підігрівання повітря і газу, оскільки тут відсутня можливість самоспалахування газоповітряної суміші в самій горілці, що є однією з переваг горілок такого типу (рис. 5., рис. 6.). Горілки дають короткий факел полум'я. Продуктивність – $5...100\text{м}^3/\text{год}$.

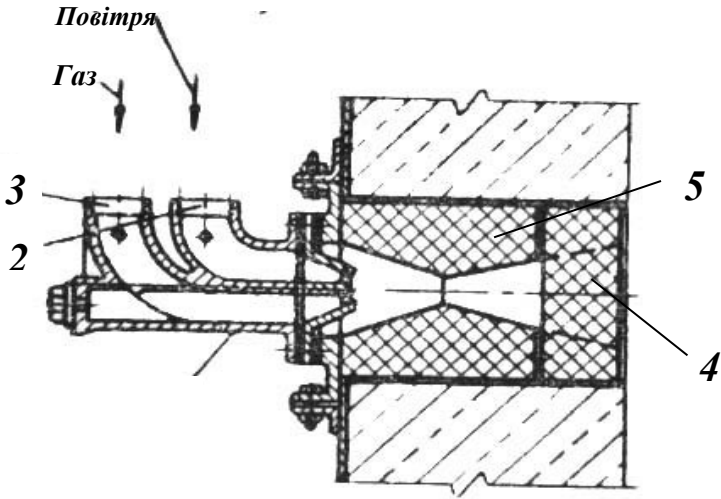


Рис. 5. Горілка щільова одностороння: 1 - чавунний корпус, 2 - підвід повітря, 3 - підвід газу, 4- розсікач, 5-горілочний блок.

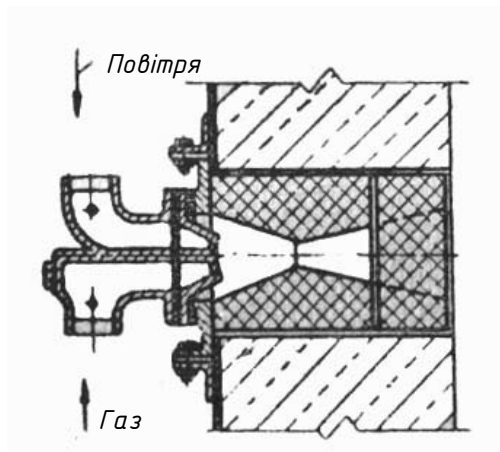


Рис. 6. Горілка щільова двостороння

Горілка внутрішнього змішування ГЩК (рис. 7.). Газ і повітря подаються в горілку під тиском, повітря надходить через патрубок 1, газ – через сопло 2 прямокутного перерізу. В кінці горілки відбувається часткове змішування газу з повітрям. На шляху газоповітряної встановлений розсікач, який сприяє кращому змішуванню газу з повітрям.

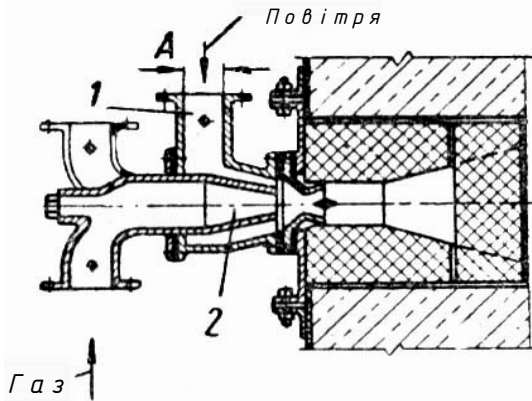


Рис. 7. Горілка внутрішнього змішування (ГЩК):

1 – повітряний патрубок, 2 – газове сопло.

Горілка з внутрішнім змішуванням турбулентного типу зображена на рис. 8. Корпус горілки 1 – це змішувальна камера кулеподібної форми. Повітря в горілку підводиться через патрубок 2, а газ – по трубці 3. Основною особливістю цієї конструкції є швидке змішування газу і повітря завдяки сильному їх завихренню в корпусі горілки з наступним стисненням газоповітряної суміші в насадці перед виходом з горілки.

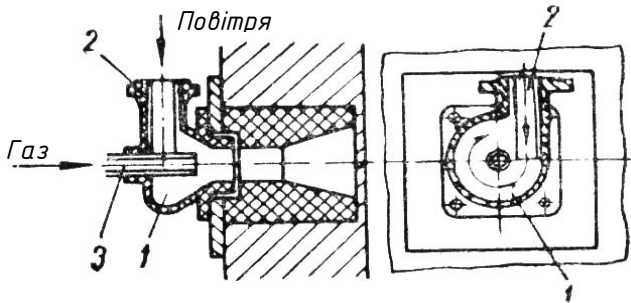


Рис. 8. Турбулентна горілка внутрішнього змішування

Для кращого змішування газу з повітрям застосовують горілки з двозональним підводом повітря рис. 9. Такі горілки мають дві повітряні насадки: зовнішню 1 і внутрішню 2. Газ подається через газову насадку 3. Потік вторинного повітря при виході з зовнішньої насадки сприяє інтенсивнішому завихренню газоповітряної суміші за межами горілки.

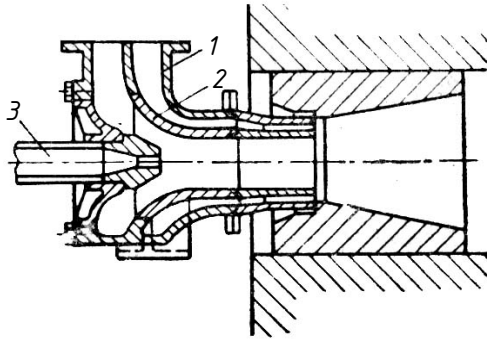


Рис. 9. Горілка з двохзональним підводом повітря

2.3 Горілки для спалювання неочищеного газу

В конструкції горілки для спалювання неочищеного газу (рис. 10.) повинна бути усунена небезпека швидкого забруднення смолою і пилом, крім того, горілка повинна легко відкриватись і бути доступною для чищення. Крім того, вона не повинна перегріватися, враховуючи те, що ці горілки часто працюють на гарячому газі.

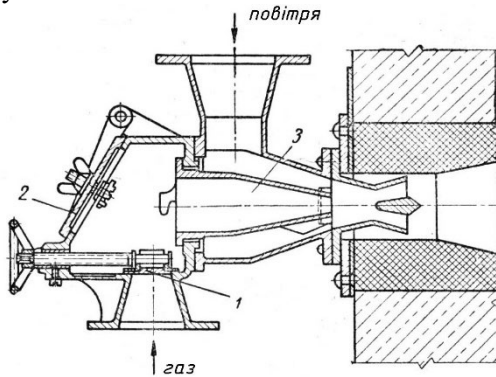


Рис. 10. Горілка низького тиску для спалювання неочищеного горючого газу

2.4 Горілки високого тиску

До горілок високого тиску належать інжекційні горілки. В них змішування газу з повітрям повністю завершується до горілки в спеціальному змішувачі, і в горілку надходить готова газоповітряна суміш. Добре змішування газу з повітрям дозволяє таким горілкам працювати з малим надлишком повітря ($\alpha_e = 1,0 \dots 1,05$), давати безполум'яне горіння з більш високою температурою горіння.

При роботі печі з горілками зовнішнього змішування довжина факела полум'я досягає 2м, тоді як при роботі з горілками попереднього змішування довжина факела полум'я менше 0,5м, тобто практично горіння завершується в тунелі горілки. При цьому найбільш висока температура в печі досягається при використанні горілок з попереднім змішуванням газу з повітрям.

В інжекційних горілках газ подається під високим тиском для того, щоб забезпечити надійне втягування повітря в змішувач горілки (рис. 11.).

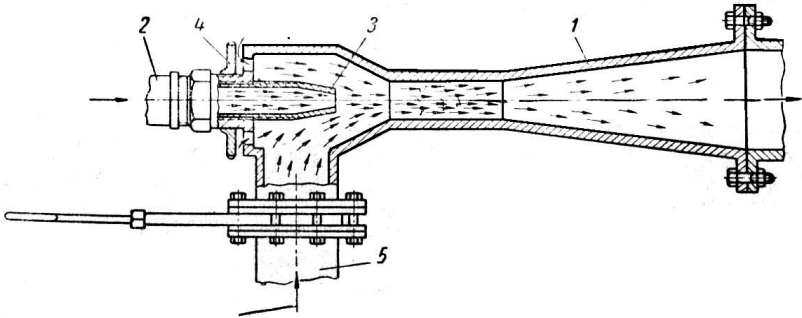


Рис. 11. Змішувач інжекційної горілки

Чим вища теплопровідність палива, тим більше повітря потрібно для горіння, тим вищим повинен бути тиск газу. Інжекційні горілки є само регульованими, тобто в процесі їх роботи співвідношення газ-повітря залишається постійним. Але ці горілки регулюються у вузьких межах, крім того, вони надійно працюють тільки на добре очищеному газі і з температурою газоповітряної суміші не вище 400°C, оскільки при більшій температурі може відбутись самоспалахування суміші в самій горілці.

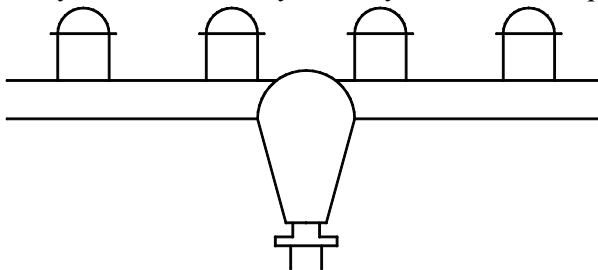


Рис. 12. Схема інжекційної горілки

2.5 Вибір горілок

Вибір горілок для спалювання газоподібного палива обумовлюється взаємністю технологічних, експлуатаційних і економічних умов: конструкцією і продуктивністю печі, температурою в робочому просторі,

видом газу і його тиском, якістю спалювання газу, вартістю установки і зручністю її обслуговування. Під видом газу потрібно розуміти його склад, теплотворність, ступінь очищення.

Основна умова для правильного вибору горілки – зважати на наявний тиск газу і, якщо це можливо, використовувати цей тиск без дроселювання.

При спалюванні неочищеного газу у великих печах використовують прості горілки – головки з роздільним підводом повітря і газу, або горілки типу вказаного на рис. 10. В першому випадку температура підігрівання необмежена, в другому – повітря може бути підігріте до температури 400...500°C.

Якщо спалюється газ із низьким теплотворенням 1100...1200 ккал/м³, то для підтримання в робочому просторі високої температури (>1200°C) доцільно застосовувати горілки зовнішнього змішування, в яких безпечно підігрівати газ і повітря до можливо високої температури.

Для середніх і малих ковальських печей, які працюють на газі з теплотворенням вище 1200ккал/м³, без використання тепла димових газів на підігрівання повітря і газу, застосовують інжекційні горілки. Багаторічний досвід роботи печей з даними горілками довів їх переваги: вони компактні і нечутливі до струсів від ударів молота.

Горілки з зовнішнім, або внутрішнім змішуванням газу з повітрям (рис. 5, 6) використовують для середніх і малих ковальських печей з підігрівом повітря до 500...600°C.

Визначення кількості горілок відбувається в процесі проектування печі. При більшій кількості горілок вони будуть меншої потужності і простішої конструкції. В цьому випадку зручно регулювати тепловий режим роботи печі шляхом відключення частини горілок. Але виникають труднощі з розміщенням великої кількості горілок і трубопроводів до них, що підвищує вартість установки і ускладнює її обслуговування. Ці обставини необхідно враховувати і слід встановлювати менше горілок, але зберігати рівномірну температуру в робочій камері печі при будь-якій кількості горілок.

3 Спалювання рідкого палива

З рідких палива в термічних печах спалюється мазут, який отримав широке застосування внаслідок високого теплотворення і зручності спалювання.

Мазут спалюється в розпиленому стані. Малі каплі мазуту, потрапляючи у розігрітий простір, швидко випаровуються і добре змішуються з повітрям. Отримана таким шляхом горюча суміш легко спалахує, утворюючи при горінні полум'я з високим теплотворенням.

Суть розпилення полягає у наступному: якщо над поверхнею рідини рухається потік повітря, то внаслідок сил тертя між поверхнею повітря і рідини починається відрив окремих частинок від основної її маси. Але це

може відбутися тільки при певній швидкості руху повітряного потоку, і чим більша швидкість, тим енергійніше відбувається процес відриву частинок рідини від поверхні.

На цьому явищі і заснована дія форсунок – пристроїв для розпилення мазуту в печах.

Форсунки розпилюють рідке паливо стисненим повітрям або паром. Повітряні форсунки поділяються в залежності від тиску повітря на форсунки низького і високого тиску. Форсунки високого тиску працюють з тиском від 0,5 до 8 атм. і вище. Від тиску повітря залежить якість розпилення мазуту: чим більший тиск повітря, тим дрібніше розпилення.

3.1 Горіння мазуту

Від форсунки залежить тільки якість розпилення мазуту, подальше ж горіння і використання отриманого при цьому тепла залежить від устрою печі, її стану та вміння обслуговувати піч. Процес горіння розпиленого мазуту відбувається так: форсунка викидає розпилений мазут у формі конусоподібного потоку (рис. 13). Цей потік, який складається із суміші найдрібніших крапель мазуту з повітрям, потрапляючи в робочий простір печі, швидко прогрівається, мазут випаровується, спалахує і спалюється, утворюючи факел.

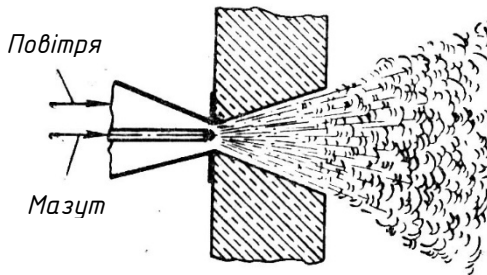


Рис. 13. Схема розпилення і горіння мазуту

3.2 Довжина факела

Швидкість реакцій горіння мазуту в основному визначає довжину факела (полум'я). Факел являє собою шлях горіння палива, тому його довжина визначається добутком середньої швидкості руху частинок, що горять, на час їх горіння. Швидкість руху частинок залежить від аеродинамічних якостей факела, які визначаються діаметром сопла і швидкістю розпилення. Погане розпилення палива, недостатня кількість повітря, або неправильна його подача і невисока температура уповільнюють горіння, і тим самим подовжують факел. Для утворення короткого факела необхідно тонке розпилення мазуту, підвід усього повітря в корінь факела і

підігрівання повітря та мазуту. Довжина факелу залежить від конструкції форсунки і тиску повітря.

На рис. 14 вказані схеми факелів різних форсунок низького тиску.

Довге полум'я дають прямоструйні форсунки. В них струмені повітря і мазуту йдуть паралельно і лише на відстані більше 1,5 м утворюється ділянка дрібного розпилення досягається на віддалі, яка перевищує 2 м.

Коротке полум'я дають турбулентні форсунки, оскільки в них розпилення відбувається на відстані 100...200 мм від насадки, а завдяки завихренню горючої суміші горіння завершується повністю на відстані 300...500 мм від насадки форсунки.

Факел форсунок із зустрічними потоками посідає середнє місце між факелами прямоструйних і турбулентних форсунок. Короткий факел утворюється внаслідок інтенсивного і повного спалювання мазуту в невеликому об'ємі пічного простору.

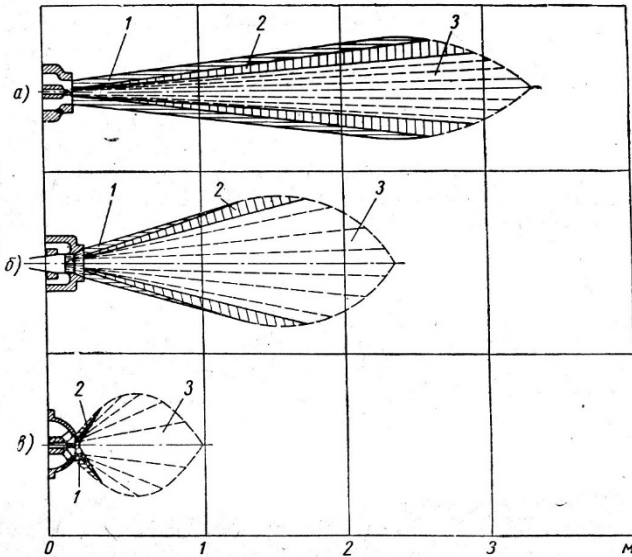


Рис. 14. Схема факелів (полум'я) форсунок низького тиску:

а) схема прямоструйна; б) схема зустрічного потоку; в) турбулентна схема: 1 – зона інтенсивного змішування палива – повітря; 2 – зона неповного змішування; 3 – зона невикористовуваного повітря.

Форсунки, які дають короткий факел, доцільно встановлювати у більшості ковальських печей, які мають відносно невеликі робочі простори. Цим забезпечується краще заповнення робочого простору пічними газами і досягається рівномірніше нагрівання металу.

3.3 Форсунки

Форсунки низького тиску працюють при порівняно малих швидкостях

розпилюючого повітря, але з великою його масою. Тут швидкість витікання повітря з сопла форсунки коливається від 60 до 75 м/сек. Маса повітря, що подається в форсунку, відповідає або повній кількості повітря, необхідної для горіння, або тільки його частині. В останньому випадку кількість повітря, якої не вистачає, близько 60%, інjektується (втягується) через форсуночний отвір в стіні печі.

Кращий результат досягається, коли все необхідне повітря для горіння подається безпосередньо через форсунку, оскільки більша маса повітря буде краще сприяти розпиленню мазуту.

На рис. 15 зображена прямоструйна форсунка, проста за конструкцією й обслуговуванням. Прямоструйні форсунки створюють окремі потоки повітря і палива з дуже малою турбулентністю, тому змішування повітря з паливом відбувається доволі в'яло. Внаслідок цього форсунка дає довгий факел.

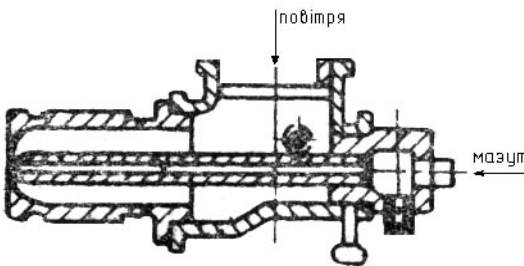


Рис. 15. Прямоструйна форсунка низького тиску

Форсунка подвійного розпилення низького тиску, малої продуктивності (рис. 16). Мазут підводиться в канал насадки 2 і при виході з неї підхоплюється струменем первинного повітря в дифузори 3, а при виході з дифузора, розпилюється вторинним повітрям.

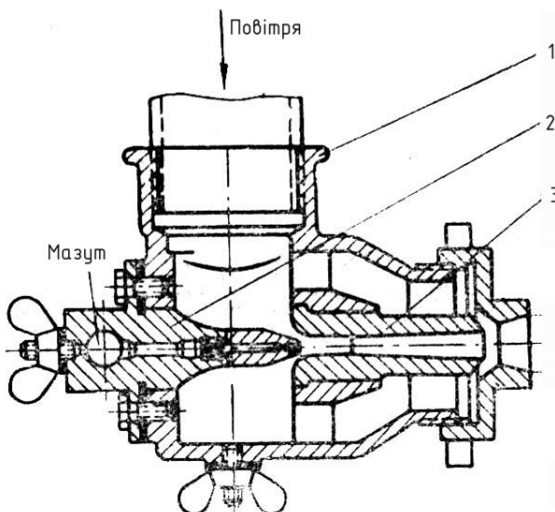


Рис. 16. Форсунка подвійного розпилення низького тиску, малої продуктивності.

Турбулентна форсунка подвійного розпилення низького тиску

Форсунка (рис. 17.) має корпус 1, куди надходить первинне повітря в об'ємі 10...15% від усього необхідного повітря, і корпус 2, куди надходить вторинне повітря в об'ємі 85...90%. У внутрішньому корпусі 1 розташовані мазутна трубка 3, і сопло 4, яке виходить в камеру завихрення 5. Тут повітряний потік турбулізується з допомогою

тангенціально розташованих нерухомих лопаток 6, при цьому відбувається розпилення і змішування мазуту з повітрям. Подальше розпилення суміші відбувається при виході її з повітряного сопла вторинним повітрям, яке виходить з форсунки через кільцеву щілину між зовнішнім корпусом 2 і повітряним соплом 7.

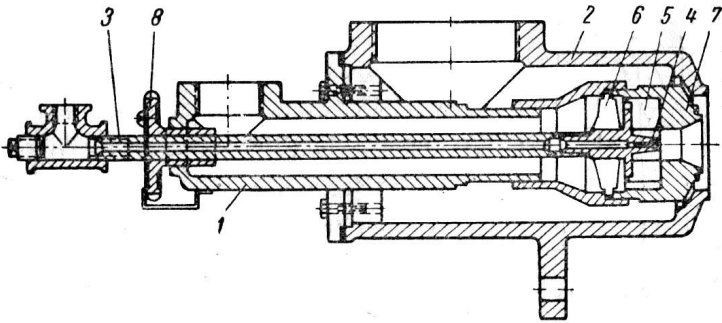


Рис. 17. Турбулентна форсунка подвійного розпилення низького тиску

3.4 Форсунки високого тиску

Суттєва різниця між форсунками високого і низького тиску полягає не тільки в тиску розпилювача, але й у кількості повітря, яке витрачається для розпилення. В форсунках високого тиску завдяки великій і постійній швидкості розпилення, яка досягає біля 300м/с, витрати повітря для розпилення значно менші, чим у форсунок низького тиску і складають лише 7...12% від всієї кількості повітря, необхідного для горіння (1-2 м³ на 1 кг мазуту).

Залишок повітря (вторинне) необхідний для горіння інjektується форсункою через форсуночний отвір або спеціальні канали. При нагріванні вторинного повітря воно подається до форсунки вентилятором.

Завдяки невеликим витратам повітря на розпилення, форсунки високого тиску за габаритами менші форсунок низького тиску. Крім того, в печах, обладнаних форсунками високого тиску, вторинне повітря можна нагрівати до вищої температури. Форсунки високого тиску відрізняються і по формі полум'я: вони дають вузьке і довге – гостре полум'я довжиною 2,5...4,5 м. Форсунки низького тиску дають широке, коротке - м'яке полум'я довжиною 0,6...1,2 м.

Найбільш простою і поширеною серед форсунок високого тиску є форсунка Шухова (рис. 18), яка складається з двох трубок 1 і 2, встановлених одна в одну. В зовнішню трубку 1 підводиться повітря або пар, а в внутрішню 2 – мазут. Завдяки високому тиску повітря або пару, а також малому перерізу повітряної насадки 3 досягається висока швидкість розпилення мазуту.

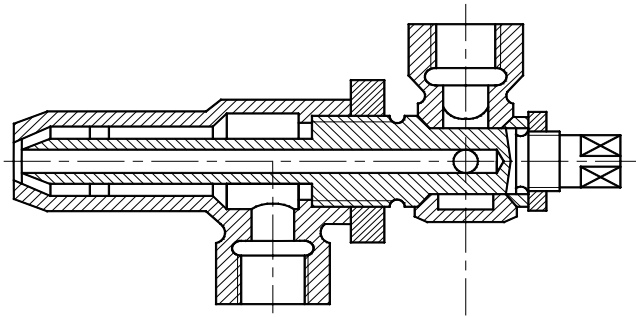


Рис. 18. Форсунка високого тиску Шухова

На рис. 19 зображена форсунка високого тиску для малих і середніх нагрівальних печей, вона складається з корпусу 1, і повітряної насадки 2, в якій розташована нафтова насадка 3. Подача мазуту в форсунку регулюється голкою вентиля 4.

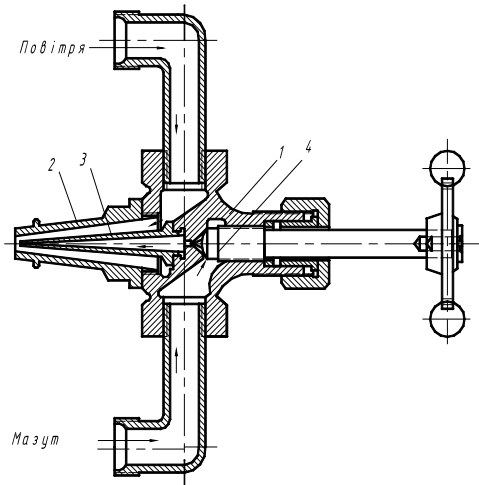


Рис. 19. Форсунка високого тиску малої продуктивності

Підігрівання повітря і мазуту, які надходять у форсунку, з точки зору покращення процесу горіння, економії палива і підвищення температури завжди дає позитивний результат. При підігріванні в'язкість мазуту знижується, що покращує його розпилення, а це разом з підігрівом повітря підвищує температуру горіння мазуту. Для кращого розпилення в'язкість мазуту не повинна перевищувати 10° по Енглєру.

3.5 Вибір форсунок

При виборі форсунок доцільно дотримуватись основного положення для нагрівання основного металу – не нагрівати метал полум'ям. Такі умови для нагрівання металу в ковальських печах легше досягти, застосовуючи форсунки низького тиску, які дають широке, коротке полум'я. Тому

ковальські печі камерного типу – малого і середнього розміру - доцільно обладнувати форсунками низького тиску. У великих печах, які мають форкамеру, встановлюють форсунки високого тиску горизонтально з напрямком факелу вздовж перевальної стінки, яка відділяє форкамеру від робочої камери.

Для хорошої роботи форсунки необхідні наступні умови:

- 1) правильний вибір форсунки за продуктивністю;
- 2) правильна форма і справний стан форсуночного отвору в стінці печі;
- 3) правильне встановлення форсунки: форсунка повинна встановлюватись по центру форсуночного отвору, а кінець повітряної насадки розміщуватися в площині зовнішньої стінки печі, повітряна насадка повинна бути справною і чистою;
- 4) достатній тиск і підігрівання повітря, яке надходить в форсунку;
- 5) якісне підготовлення мазуту: мазут повинен підводитись до форсунок після відстою з нього води, профільтованим і достатньо підігрітим;
- 6) встановлення мазутного вентиля спеціальної конструкції.

4 Рух газів у печах

4.1 Характер руху потоків

Характер руху газів у пічній установці в багатьох випадках визначає ступінь корисного використання тепла горіння палива в робочому просторі печі, якість нагрівання металу і продуктивність печі. Горіння і рух пічних газів – це основні фактори, від яких залежить робота печі. Рух газів у печах може бути вільним і вимушеним; вільний рух газів спостерігається переважно в печах із самотягою, що працюють на твердому паливі, тобто коли повітря потрапляє з атмосфери під колосникові ґрати не примусово (вентилятором), природним тиском.

При роботі печей на газу, пилевидному паливі має місце примусовий рух газів, що створюється потоками, які виходять з горілок (форсунок).

Вільний рух. Вільний рух газів відбувається на основі різниці питомої ваги газів внаслідок різниці температур у різних частинах пічної системи. Це призводить до виникнення тиску, який називається геометричним. Очевидно, що чим більша різниця температур в окремих частинах пічної системи, тим більші геометричні тиски, тим інтенсивніший рух газів.

Різниця в щільності (питомої ваги) є єдиним джерелом вільного руху газів в пічній системі і виходу їх в атмосферу.

Вимушений рух. Вимушений рух газів відбувається подачею повітря вентилятором під колосники топки, а при роботі печі на газі або мазуті – завдяки стисненню, яке створюється горілками або форсунками. Рух газів відмінний не тільки внаслідок причин, які викликають його, але й за своїм режимом або формою. При малих швидкостях газовий потік складається, так

би мовити, з окремих потоків, що рухаються паралельно один до одного; такий рух називається ламінарним. При великих швидкостях цей рух порушується і переходить у безладне вихроутворення, яке назване турбулентним.

Перехід ламінарного руху в турбулентний відбувається при визначеній швидкості, яка називається критичною. Умови переходу ламінарного руху в турбулентний визначається критерієм (числом) Рейнольда R_e , що залежить від гідравлічного діаметра каналу, по якому рухається газ, швидкість і в'язкість газу:

$$R_e = \frac{Wd}{\nu},$$

де W – фактична швидкість газу (при даній температурі) в м/сек.;

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості в м²/с;

d – діаметр каналу в м.

Якщо січення каналу не кругле, а іншої форми, то приймають приведений діаметр, який визначають з виразу

$$d = \frac{4f}{S},$$

де f – поперечне січення каналу в м²;

S – периметр каналу в м.

Згідно дослідженням, перехід ламінарного руху в турбулентний відбувається при $R_e=2200$. При цьому критична швидкість буде дорівнювати

$$W_k = \frac{2200\nu}{d} \text{ м/с.}$$

При вільному русі газів у печах переважає ламінарний режим руху, який супроводжується незначним змішуванням газового середовища – тільки внаслідок дифузії, при турбулентному режимі змішування відбувається енергійно – не тільки внаслідок дифузії, але і турбулентності. Завдяки цьому в робочій камері печі встановлюється рівномірніша температура, підвищується теплообмін, а звідси – і продуктивність печі. Інтенсивної турбулентності газового потоку легше досягти в невисокій робочій камері печі.

На рух газів у пічній системі великий вплив мають також опори тертя і місцеві опори.

4.2 Опір тертя

Втрата тиску на подолання опору сил тертя по всій довжині трубопроводу залежить при даній витраті від характеру руху газу і стану поверхні тертя :

$$P_m = \mu \frac{l}{d} \rho_0 \frac{W_0^2}{2} (1 + \alpha t_\Gamma) n / m^2,$$

де l – довжина частини трубопроводу, для якого визначається, m ;

d – гідравлічний діаметр трубопроводу, m ;

W_0 – швидкість газу в трубопроводі, віднесена до нормальних умов, m/c ;

t_Γ – температура газу, $^\circ C$;

ρ_0 – щільність газу при нормальних умовах, kg/m^3 ;

μ – коефіцієнт тертя.

При ламінарному русі коефіцієнт μ залежить лише від числа Re :

$$\mu = \frac{64}{Re}.$$

При турбулентному русі коефіцієнт затрат тиску на тертя залежить від шорсткості стінок і числа Re .

Для каналів металічних, гладких – $\mu = \frac{0,32}{Re^{0,25}}$, для шорстких –

$$\mu = \frac{0,129}{Re^{0,12}}, \text{ для цегляних – } \mu = \frac{0,175}{Re^{0,25}}.$$

Коефіцієнт тертя може бути визначений за універсальною формулою:

$$\mu = 0,1 \left(\varepsilon + \frac{100}{Re} \right)^{0,25},$$

де $\varepsilon = \frac{k}{d}$ – відносна шорсткість, що представляє собою відношення абсолютної шорсткості (середньої висоти виступів) стінки до внутрішнього діаметру трубопроводу.

В розрахунках печей при турбулентному потоці практично можна застосовувати такі значення μ :

Канали	Величина μ
Гладкі металічні	0,025
Шорсткі металічні	0,04
Цегляні	0,05

Нижче наведені значення абсолютної шорсткості для труб для різних матеріалів.

Нижче приведені значення абсолютної шорсткості для труб для різних матеріалів.

Матеріали трубопроводу і характер поверхні.

Суцільнотягнуті з міді, латуні, скла, нові	0,0015-0,01
Суцільнотягнуті труби сталеві нові	0,02-0,10
Ті ж, що були в експлуатації	0,12-0,20
Суцільнозварні сталеві труби нові	0,04-0,10
Ті ж, що були в експлуатації	0,15
Оцинковані труби нові	0,15
Ті ж, що були в експлуатації	0,18
Труби з покрівельної сталі	0,02-0,04
Чугунці труби нові	0,25-1,0
Ті ж, що були в експлуатації	1,0-1,5
Бетонні труби з затиркою	0,3-0,8
Залізобетонні труби	2,5
Азбоцементні труби нові	0,65-0,10
Ті ж, що були в експлуатації	0,6
Канал з цементною штукатуркою	0,05-0,22
З шлакобетонних плит	1,5

4.3. Місцеві опори

До місцевих опорів відноситься будь-який конструктивний елемент печі чи повітропроводу, який викликає зміну напрямлення чи швидкості руху газового потоку .

Втрати тиску на подолання місцевих опорів виражаються формулою :

$$P_{м.о.} = K \rho_0 \frac{W_0^2}{2} (1 + \alpha t_r) \text{ н/м}^2$$

Коефіцієнт пропорційності K , що називається коефіцієнтом місцевого опору , характеризує даний опір і представляє собою відношення загубленого тиску до динамічного :

$$K = \frac{P_{м.с.}}{P_{дин}} .$$

Значення коефіцієнтів місцевих опорів визначені експериментально і для ряду характерних випадків наводяться у спеціальних таблицях.

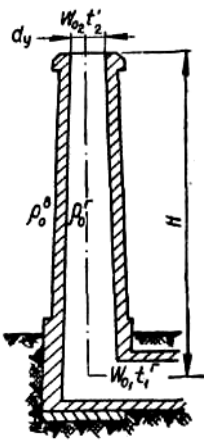
4.4 Розрахунок димової труби

За допомогою димової труби забезпечується рух газів у печі за умови, якщо вона створює розрідження, не менш сумарної втрати тиску $\sum P_{вт}$.

Дійсне розрідження, створюване трубою, повинне бути більше розрахованої втрати тиску на 30–50% на випадок можливого наступного форсування роботи печі чи збільшення опорів у димовому тракті, тобто:

$$P_{ef} = (1,3\dots1,5) \left(\sum P_{вт} - P_{дин_1} \right).$$

Ефективна тяга димової труби (рис. 21) виражається формулою:



$$P_{ef} = gH \left(\frac{\rho_0^n}{1 + \alpha t_n} - \frac{\rho_0^c}{1 + \alpha t_2} \right) \frac{B}{101,32} - \rho_0^c \left[\frac{W_{02}^2}{2} (1 + \alpha t_2^c) - \frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_1^c) \right] - \mu \frac{H}{d_{сер}} \cdot \rho_0^c \left[\frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_1^c) - \frac{W_{02}^2}{2} (1 + \alpha t_2^c) \right] \text{ н / м}^2,$$

де H – висота труби, м;

ρ_0^n – щільність повітря, кг/м^3 ;

ρ_0^c щільність димових газів, кг/м^3 ;

t_n – середня температура повітря по висоті

димової труби, $^{\circ}\text{C}$;

t_2 – середня температура димових газів у трубі,

$^{\circ}\text{C}$;

B – барометричний тиск, мінімальне для даної місцевості, кн/м^2 ;

t_1^c – температура газу в основі труби, $^{\circ}\text{C}$;

t_2^c – температура газу при виході з труби, $^{\circ}\text{C}$;

W_{01} – приведена швидкість газів біля основи труби, м/с ;

W_{02} – приведена швидкість газів при виході з труби, м/с ;

$d_{сер}$ – середній діаметр труби, м;

μ – коефіцієнт тертя димових газів об стінки труби.

Перший член формули представляє теоретичну тягу, другий – утрату тиску при виході газів із труби, з якого віднятий динамічний тиск газів на вході в трубу, і третій – утрату тиску на подолання тертя газів об стінки труби.

4.5 Шиберу

Для нормальної роботи печі велике значення має тиск у робочій камері печі, що регулюється за допомогою шиберу, який встановлюється на димарі. Відповідно можна створювати тиск нижчий, рівний або вищий атмосферного.

Якщо закрити шибер на димарі, вихід пічних газів у трубу припиняється, і тиск у печі буде підвищуватись. Наслідком цього буде вибивання пічних газів через робочі вікна і нещільності печі в приміщенні цеху. В цьому випадку продуктивність печі знижується і збільшується задимлення цеху, що створює несприятливі умови праці.

Для правильної роботи печі шибер потрібно відкривати настільки, щоб

при привідкритій заслінці робочого вікна через утворену щілину вибивались язички полум'я. Це є ознакою того, що гази добре заповнюють робочу камеру, створюючи на черені тиск дещо більший атмосферного (2,5...5 Па), тобто більший тиску в приміщенні цеху. В цьому випадку кажуть, що піч працює з “позитивним тиском”, практично про це судять з довжини язичків полум'я, що вибиваються через щілину заслінки робочого вікна.

При дуже великому або повному відкритті шибера в димарі гази можуть не заповнювати піч, тиск у робочій камері понизиться і може виявитися меншим, ніж у приміщенні цеху. При такій роботі холодне повітря з приміщення цеху втягується через усі нещільності в кладці і робочому вікні в печі, охолоджуючи і окислюючи метал, що нагрівається.

В цьому випадку піч працює з “негативним тиском”, вона гріє погано, витрачає багато палива і дає велику окалину на метали.

Шибер на димарі є надійним пристосуванням для регулювання роботи печі, допомагає правильно нагрівати метал, економно витрачати паливо, отримувати від печі високу продуктивність і не задимлювати цех.

4.6 Штучна тяга

В сучасних промислових печах зазвичай використовується природна тяга, яка здійснюється за допомогою димової труби. Але при значних опорах димового тракту (до 2000 Па) або недостатній тязі існуючої димової труби в ряді випадків застосовується штучна тяга за допомогою димососів прямої і побічної дії.

Димососи побічної дії працюють за таким принципом: через конічну насадку вдувається вентилятором повітря (рис. 20 б); завдяки конічній насадці повітря надходить у трубу з великою швидкістю, інжектуючи за собою димові гази.

При прямій тязі димові гази з димаря втягуються безпосередньо димососом (вентилятором) (рис. 20.б) і викидаються в розташовану поряд димову трубу.

В якості димососів прямої дії можуть використовуватись вентилятори з лопатками зі звичайної сталі при умові охолодження продуктів горіння, втягуванням атмосферного повітря, до температури 200...250°C. Димососи прямої дії спеціальної конструкції з лопатками з жаростійкої сталі, водяним охолодженням підшипників і валом, дозволяють забезпечити штучну тягу при температурі диму до 400...600°C.

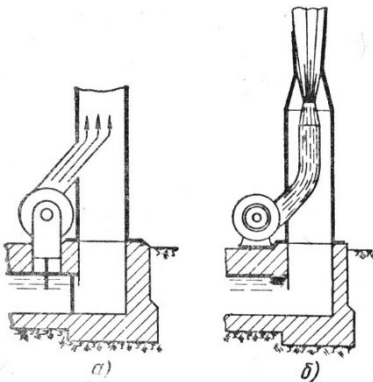


Рис. 20. Димососи:
а – прямої дії;
б – побічної дії

4.7. Вентилятори і їх вибір

Вентиляторами називаються повітродувні машини, що при щільності повітря (газу) $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$ розвивають повний тиск, який не перевищує 10кПа.

Існує два конструктивно різних типи вентиляторів: центробіжні, в яких повітря входить в осьовому напрямку, а виходить в радіальному, й осьові з рухом повітря вздовж осі обертання.

В основу класифікації центробіжних і осьових вентиляторів закладений критерій швидкохідності (питоме число обертів), який залежить від продуктивності, повного приведенного тиску при оптимальному режимі і технічно доцільного числа обертів двигуна і визначається як:

$$n_y = \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt{p}\sqrt{p}}$$

Центробіжні вентилятори найпоширеніші в промисловості. За створюваним тиском вони поділяються на вентилятори низького тиску до 1кПа, середнього 3кПа і високого тиску до 10кПа.

5. Теплообмін у печах

5.1. Теплопередача в печах

Робоча камера печі є замкнутим простором, у якому потік гарячих пічних газів обмежений стінками камери і повністю металу, що нагрівається. На шляху свого руху полум'я віддає тепло стінкам робочої камери і металу, що нагрівається, безпосередньо дотиком. Такий спосіб передачі тепла називається конвекцією. Крім того, полум'я випромінює тепло на стінки камери і на метал. Нагріті стінки, в свою чергу, також випромінюють тепло на метал. Такий спосіб передачі тепла на відстані називається випромінюванням.

Теплопередача від поверхні металу чи стінки в їх масу, поширюється теплопровідністю. Теплообмін розділяється на зовнішній і внутрішній. Зовнішній теплообмін відбувається випромінюванням і конвекцією на поверхню металу і на поверхню стінок камери.

Внутрішній теплообмін відбувається завдяки теплопровідності з поверхні металу в його масу за рахунок різниці температур нагрітої поверхні і шарів металу, а також теплопровідності з внутрішньої поверхні стінок робочої камери в їх масу.

Інтенсивність зовнішнього теплообміну визначається технологічним процесом, що відбувається в печі. При плавленні металу можна допустити зовнішній теплообмін максимальним і при нагріванні металу під кування або термообробки інтенсивність зовнішнього обміну необхідно обмежувати, враховуючи внутрішній теплообмін, оскільки при великій різниці температур на поверхні і в середині металу можуть утворитися тріщини. Це залежить від розмірів перерізу і теплопровідності заготовок.

Кількість тепла, яку отримує метал, при нагріванні, від полум'я і кладки:

$$Q_{\text{ГКМ}} = Q_{\text{зв}}^{\text{К}} + Q_{\text{ГМ}}^{\text{В}} + Q_{\text{КМ}}^{\text{В}},$$

де $Q_{\text{ГМ}}^{\text{К}}$ – тепло, передане металу від пічних газів конвекцією;

$Q_{\text{ГМ}}^{\text{В}}$ – тепло, передане металу від пічних газів випромінюванням;

$Q_{\text{КМ}}^{\text{В}}$ – тепло, передане металу від кладки випромінюванням.

5.2. Передача тепла конвекцією

Передача тепла конвекцією обумовлена тим, що молекули рухомого середовища (рідини або газу), дотикаючись до тіла віддають його поверхні тепло, або навпаки – забирають тепло від поверхні, залежно від того, де вища температура, - тіла або рідини (газу).від причини, яка викликає рух середовища, розрізняють вільну і вимушену конвекцію. При вільній конвекції теплопередача відбувається в середовищі, рух якого виник внаслідок зміни щільності в різних його частинах, наприклад, природне охолодження зовнішньої поверхні стінок печей в оточуючому середовищі.

При рухові середовища від зовнішніх причин, наприклад, руху повітря від вентилятора, для нагрівання в рекуператорі, виникає вимушена конвекція.

Очевидно, що при вимушеній конвекції теплопередача інтенсивніша, оскільки з підвищенням швидкості середовища змінюється режим його руху – перехід від ламінарного до турбулентного. Складність турбулентного руху визначає складність передачі тепла конвекцією, тому теплопередача конвекцією не піддається точному розрахунку.

Технічні розрахунки для визначення кількості тепла, яке передається конвекцією від газів або рідини на поверхню твердого тіла, виконуються за формулою Ньютона:

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} F (t_1 - t_2) \text{ ккал/год},$$

де t_1, t_2 – температура газів або рідини і поверхні твердого тіла;

F – поверхня дотику твердого тіла з газом або рідиною в м^2 ;

$\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт передачі тепла конвекцією, або коефіцієнт теплопередачі, - кількість тепла в ккал, яка передається поверхні 1 м^2 в год при різниці температур газу або рідини і твердого тіла в $1 \text{ }^\circ\text{С}$ в $\text{ккал/ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ }^\circ\text{С}$.

5.3. Теплопередача випромінюванням

Випромінювання є результатом складних внутрішньоатомних збурень і виникає переважно завдяки тепловій енергії, відповідно, інтенсивність випромінювання визначається температурою.

Носіями енергії випромінювання є електромагнітні коливання. Найбільший інтерес складають хвилі, які поглинаються тілами, при цьому їх енергія знову переходить в теплову. Найбільш ефективно такими

властивостями володіють світлові й інфрачервоні хвилі з довжиною хвилі від 0,4...40 мкм. Ці хвилі називаються тепловими, а процес їх поширення – тепловим випромінюванням.

Випромінювання властиве всім тілам і кожне з них випромінює променеву енергію безперервно.

Падаючи на поверхню оточуючих тіл, частина цієї енергії відбивається, а частина поглинається ними. Та частина енергії, яка поглинається тілом, знову перетворюється в тепло, а та частина, яка відбивається, падає на інші тіла, де також переходить у тепло. Відповідно, кожне тіло не тільки неперервно випромінює, але й неперервно поглинає променеву енергію. В результаті цих явищ, зв'язаних з подвійним взаємним перетворенням енергії: теплова-променева-теплова, і відбувається процес теплообміну випромінюванням.

Кількість тепла, що віддається або сприймається, визначається різницею між кількістю випромінюваної і поглинутої тілом променевої енергії.

Згідно із законом Стефана-Больцмана, енергія випромінювання абсолютно чорного тіла E_0 пропорційна четвертій частині його абсолютної температури T_0 :

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T_0}{100} \right)^4, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{год.},$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, рівний 4,9 ккал/м²·год·К⁴.

Відповідно, що з підвищенням температури інтенсивність випромінювання росте досить швидко.

Відомо, що у природі абсолютно чорних тіл немає і в реальних умовах мають місце так звані сірі тіла з різним коефіцієнтом випромінювання. Його значення визначається природою тіла, станом поверхні і температурою, він завжди менший від C_0 і може змінюватися від 0 до 4,9.

Закон Стефана-Больцмана застосовується для визначення енергії випромінювання E і сірих тіл, причому замість коефіцієнта випромінювання чорного тіла C_0 в рівняння входить коефіцієнт випромінювання сірого тіла C .

Відношення енергії випромінювання при даній температурі сірого тіла E до енергії випромінювання абсолютно чорного тіла E_0 називається ступінню чорноти ε :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{C}{4,9}.$$

Таким чином, ступінь чорноти показує, яку частку від енергії випромінювання чорного тіла складає енергія випромінювання даного сірого тіла. Знаючи ε легко підрахувати і енергію випромінювання E :

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot 4,9 \cdot \left(\frac{T_0}{100} \right)^4$$

5.4. Передача тепла теплопровідністю

При роботі печі передача тепла теплопровідністю відбувається по-перше, в метали, що нагрівається (з його поверхні в масу), по-друге, в стінках печі (з внутрішньої, яка обігрівается пічними газами. В їх товщину). Очевидно, що передача тепла теплопровідністю залежить від інтенсивності надходження тепла на поверхню металу, що нагрівається, і від фізичних властивостей матеріалу. Передача тепла теплопровідністю проходить головним чином в твердих тілах, коли в них виникає різниця температур, наприклад, при нагріванні заготовок поверхня їх нагріта до більш високої температури, чим внутрішні шари. Сукупність значень температур в даний момент часу для всіх точок об'єму тіла, що нагрівається, називається температурним полем, рівняння якого:

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

тобто зміна температури в різних точках тіла, що нагрівається, у часі τ є функцією координат x, y, z і часу τ .

Температурне поле може бути функцією однієї, двох і трьох координат, відповідно воно називається одно-, дво-, тримірним.

Геометричне місце точок з однаковою температурою в температурному полі утворює ізотермічну поверхню. В одній і тій же точці тіла одночасно не можуть бути різні температури, відповідно ізотермічні поверхні різних температур одна з одною не перетинаються, всі вони замикаються на себе або закінчуються на границях тіла. Зміна температури тіла відбувається тільки в напрямках, які перетинають ізотермічні поверхні.

Розрізняють два основних випадки передачі тепла теплопровідністю – в нестационарному і стаціонарному потоці тепла. В нестационарному потоці тепла в окремих точках тіла змінюється у часі; наприклад, нестационарний потік тепла має місце при нагріванні печі в кладці її стінок.

В стаціонарному потоці температура в кожній точці тіла, що нагрівається, залишається постійною у часі. Це відбувається при тривалій роботі печі, коли у товщі кладки її стінок спостерігається стаціонарний потік передачі тепла теплопровідністю від внутрішніх поверхонь стінок до зовнішніх.

Як відомо, основні положення теорії теплопровідності розроблені Фур'є. Для виведення диференціального рівняння теплопровідності, яке визначає взаємозв'язок зміни температур в просторі і часі, застосовується закон теплопровідності, який встановлює залежність між тепловим потоком g і температурним градієнтом:

$$g = -\lambda \frac{dt}{dx},$$

де $\frac{dt}{dx}$ - температурний градієнт, який показує приріст температури на одиницю відстані в напрямку нормалі до ізотермічної поверхні в $^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

t – температура тіла в $^{\circ}\text{C}$ в прийнятій точці в момент часу τ ;

$\lambda \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{C}} \right)$ - коефіцієнт теплопровідності, який показує кількість тепла в ккал, яке передається за 1 год через поверхню 1 м^2 через товщину 1 м при різниці температур в $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Знак мінус у правій частині рівняння показує, що температурний градієнт має від'ємне значення, оскільки на шляху руху тепловий потік зі збільшенням X поступово поглинається (зі збільшенням X температура падає).

При передачі тепла через поверхню F за час τ кількість переданого тепла визначається:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} F \tau.$$

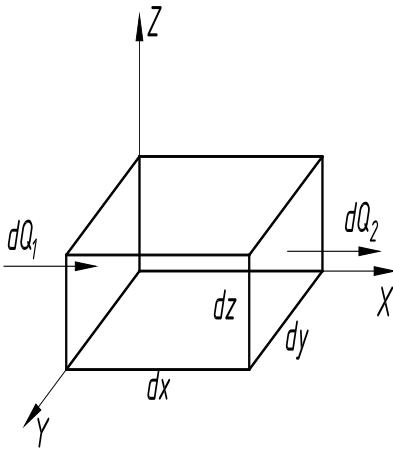


Рис. 22. Схема передачі тепла теплопровідністю

В основу диференціального рівняння теплопровідності покладений закон збереження енергії (тепловий баланс), відповідно до якого кількість тепла, що надходить в елементарний паралелепіпед (рис. . 22) за час τ , рівна кількості тепла, яке пішло на нагрівання елемента і тепла, яке виходить з елемента, тобто зміна теплоємності в елементі буде:

$$dQ = dQ_1 - dQ_2,$$

де dQ_1 – кількість підведеного тепла;

dQ_2 – кількість відведеного

тепла.

Диференціальне рівняння теплопровідності для одномірного температурного поля в плоскій стінці має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

де $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C}$, $\text{м}^2/\text{год}$ – коефіцієнт температуропроводності, (ρ – густина,

C – теплоємність матеріалу елемента).

Диференціальне рівняння теплопровідності у двохвимірному температурному полі:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right).$$

Диференціальне рівняння теплопровідності у трьохвимірному полі має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Для нагрівання виробів різної форми відповідно змінюється вид диференціального рівняння теплопровідності.

Вирішення рівняння теплопровідності в кожному конкретному випадку дозволяє визначити необхідну кількість тепла і тривалість нагрівання виробів різної форми, а також їх температурне поле. Тобто розподіл температур за товщиною січення виробу.

На практиці в більшості випадків тривалість нагрівання визначають спрощеними способами, використовуючи для цього емпіричні формули, в основу яких покладено емпіричні формули, а також дані із заводської практики. Тривалість нагрівання заготовок, яка визначається за даними формулами, лімітує швидкість нагрівання металу, попереджуючи виникнення в ньому великих температурних навантажень, які сприяють виникненню тріщини.

5.5. Коефіцієнт теплопровідності

Виміром теплопровідності різних матеріалів є коефіцієнт теплопровідності λ , який визначається дослідним шляхом. Він залежить від властивостей матеріалу і температури. Найбільшою теплопровідністю володіють метали і їх сплави, найменшою – теплоізоляційні матеріали, внаслідок їх великої пористості. Величина коефіцієнта теплопровідності коливається в широких межах: для металів $\lambda=10\dots360$, а для теплоізоляційних матеріалів $\lambda=0,01\dots0,1$ ккал/(м²·год·°С).

Теплопровідність матеріалів зі зміною температури змінюється по-різному. У матеріалів з щільною кристалічною структурою (метали і деякі мінерали) з підвищенням температури теплопровідність звичайно зменшується. Теплопровідність багатопористих матеріалів з підвищенням температури зменшується.

6. Нагрівання й охолодження металу

Нагрівання металів супроводжується зміною їх структури, фізичних і механічних властивостей (міцності, твердості і пластичності).

Основне призначення нагрівання перед куванням і штампуванням заключається в тому, щоб змінити механічні властивості металу, що буде

сприяти куванню і штампуванню, оскільки пластичність металу з підвищенням температури буде збільшуватись, а опір деформуванню – зменшуватись. При гарячій деформації опір деформуванню приблизно в 10-15 раз менше, чим при холодній. В цьому й полягає основна перевага гарячої обробки металів тиском перед холодною обробкою тиском. Легше кувати такий метал, який при високій пластичності має найменший опір деформуванню.

Деталі високої якості отримуються тільки при правильному нагріванні металу в межах встановлених температур. Правильно нагрівати метал – це означає нагрівати його з усіх сторін рівномірно з певною швидкістю, до певної температури і з найменшими втратами на окалину. Неправильне нагрівання може зумовити ряд дефектів металу: підвищене окислення, тріщини, обезвуглецевлення, перегрівання.

6.1. Основні параметри, які характеризують процес нагрівання металу

6.1.1. Теплопровідність

Тепло, яке передається поверхні металу, що нагрівається, від полум'я і стінок печі, поширюється всередині металу не миттєво, а з певною швидкістю, яка залежить від його теплопровідності, температури, розмірів і форми заготовок (відливок). При цьому кількість тепла, яка сприймається металом, буде тим більша, чим більше відношення поверхні заготовки, що нагрівається, до її об'єму і чим більша різниця температур печі і поверхні заготовок.

Теплопровідність обумовлює швидкість поширення тепла всередині металу в часі при нагріванні і охолодженні. Метали з більшою теплопровідністю при інших рівних умовах нагріваються швидше.

Величина коефіцієнта теплопровідності визначається, як:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}, \text{ м}^2 / \text{год},$$

де λ - кількість теплопровідності металу в ккал/(м · год · °С);

c – теплоємність в ккал/кг · °С ;

ρ – щільність в кг/м³ (7800-7900 кг/м³).

Відповідно, сталь нагрівається тим швидше, чим більша її теплопровідність, менша теплоємність і питома вага.

Швидкість нагрівання сталі при нормальній температурі печі 1250°–1350°С лежить у межах 1,5-1,8хв на 1см товщини заготовки, при цій швидкості температурні напруження, які виникають у металі, не перевищують допустимих. Таким чином, теплопровідність поширення тепла в металі, а звідси і тривалість його нагрівання.

Теплопровідність металів неоднакова. Чим більше домішок в сталі, тим

менша її теплопровідність, особливо сильно зменшують теплопровідність хром і нікель.

Крім того, теплопровідність сталі одного і того складу не постійна, вона залежить від температури нагрівання і термічної обробки, загартована сталь менш теплопровідна, чим відпалена. У вуглецевої сталі (одного складу) теплопровідність із підвищенням до 300°C понижується, а вище 900°C дещо зростає.

6.1.2. Теплоємність

Теплоємність сталі мало залежить від її складу, переважно вона залежить від температури.

Для сталей теплоємність лежить в межах 0,105...0,11; міді – 0,094; алюмінію – 0,22; магнію – 0,25 ккал/кг °C .

Саме визначення теплоємності свідчить, що метали, які мають більшу теплоємність, при інших рівних умовах, потребують більшого часу нагрівання, оскільки, чим вища теплоємність матеріалу відливки або заготовки, тим більша кількість тепла необхідна для нагрівання їх до певної температури. Відповідно на швидкість поширення тепла в металі впливає не тільки теплопровідність, але й теплоємність.

6.1.3. Утворення тріщин

Встановлено, що сталь необхідно нагрівати з певною швидкістю, яка залежить від її теплопровідності, оскільки при дуже швидкому нагріванні, тепло не встигає поширитись (передатись) з поверхні в масу металу.

Відомо, що метали при нагріванні розширюються (це явище характеризується величиною лінійного теплового розширення).

Поверхневі шари металу, нагріті до значно вищої температури, розширюються більше. Але розширення поверхневих шарів гальмується сусідніми внутрішніми шарами, які при цьому будуть розтягуватись за рахунок зовнішніх. Внаслідок такої взаємодії зовнішні шари металу при нагріванні будуть сприймати стискуючі напруження, а внутрішні - розтягуючі. Такого типу напруження, які виникають внаслідок нерівномірного нагрівання, називаються температурними напруженнями. Вони тим більші чим більша різниця температур в різних частинах заготовки.

При великій різниці температур в середині матеріалу температурні напруження можуть настільки зрости, що в окремих місцях розірвуть заготовку або відливку. Це особливо може бути при швидкому нагріванні високовуглецевих і легованих сталей (внаслідок їх малої теплопровідності), а також відливок і великих заготовок взагалі. Нагрівання металу необхідно вести не тільки з певною швидкістю, але й при можливості рівномірно з усіх сторін. При нерівномірному нагріванні, частина заготовки обернена до полум'я, буде нагріватися швидше, знову з'являться внутрішні напруження в

металі.

Крім того, необхідно пам'ятати, що структурні перетворення супроводжуються зміною об'єму металу. Звичайна вуглецева сталь, нагріта до верхньої критичної точки, перестає розширюватись і при подальшому нагріванні об'єм її зменшується, оскільки перехід в γ -залізо відповідає утворенню аустенітної структури більшої питомої ваги. Це сприяє зменшенню температурних напружень стиснення, що виникають в зовнішніх шарах металу, при нагріванні. Водночас при досягненні температури 750...800°C спостерігається різке підвищення пластичності сталі. Тому нагрівання сталі починають із температури 800° С можна проводити швидко.

Очевидно, структурні перетворення відбуваються неодноразово у всій масі металу, і починаються вони з поверхні відливки або заготовки, оскільки цей шар нагрівається швидше.

Отже, при нагріванні сталі з'являються внутрішні напруження (сили), викликані зміною об'єму під впливом температурного розширення і структурних перетворень, які при неправильному нагріванні і є причиною виникнення тріщин. Можливість утворення тріщини в металі особливо велика в перший період нагрівання, оскільки при низьких температурах метал має звичайно малу пластичність, а відливки і великі заготовки, крім того, мають залишкові напруження.

6.1.4. Перегрів і перепал

Нагрівання сталі вище критичної точки (1100...1250°C) супроводжується швидким ростом її зерна. Чим вища температура і триваліше нагрівання, тим інтенсивніше відбувається ріст зерен. Це явище називається перегрівом. Перегрів понижує якість поковок, оскільки велике зерно на початку кування при одних і тих же умовах надає поковці крупнозернисту будову. Крім того, перегрів супроводжується обезвуглецевленням сталі. Внаслідок цього сильно перегріта сталь не відповідає своєму сорту і міцність її може настільки понизитися, що в процесі кування з'являться тріщини і метал почне руйнуватися.

Схильність сталі до перегріву залежить від її складу, наприклад, легуючі домішки – алюміній, ванадій, вольфрам дещо зменшують перегрів.

В окремих випадках структура перегрітої сталі може бути відновлена глибоким куванням, при цьому утворені крупні зерна роздробляться і структура отримується дрібнозернистою. Структура перегрітої сталі може бути відновлена відповідною термічною обробкою (відпалюванням).

Якщо сталь нагрівати довго при температурі вище встановленої для даного сорту, то відбувається окислення металу не тільки з поверхні, а й у середині, по границях зерен, з частковим їх оплавленням, причому зв'язок між окремими зернами в сталі порушується і з'являються глибокі тріщини. Такий брак при нагріванні називається перепалом, перепал непоправний і

призводить сталь в повну непридатність.

Теоретично перепад настає у сталі з вмістом вуглецю менше 1% при температурі вище 1200°C, у сталі з вмістом вище 1% - при 1180...1140°C.

З викладеного бачимо, що кожен сорт сталі необхідно нагрівати не тільки з необхідною швидкістю, але й до певної температури.

6.2. Температура нагрівання

Режим нагрівання визначається такими даними: температура печі, при садці і видачі металу, кінцевою температурою нагрівання, повною тривалістю нагрівання і тривалістю нагрівання в інтервалах встановлених температур (ступінчастий нагрівання). Найбільш пластичною сталь стає при температурі від 800°C до 1300°C, в цих інтервалах температур і потрібно проводити кування сталі. Відповідно, завдання полягає у тому, щоб правильно нагріти сталь до верхньої температурної межі – до температури початку кування.

Не всі сталі нагріваються для кування до однієї температури, кожному сорту сталі відповідає певна температура початку кування. Так м'яку сталь (з вмістом вуглецю до 0,4%), що найчастіше застосовується для кування, потрібно нагрівати до 1250...1300 °C. Високовуглецеву сталь (інструментальну), для того, щоб не вигорів вуглець, нагрівати вище 1050 °C не варто. Окремі сорти легованих сталей можна нагрівати до температури вище 1250 °C.

Встановлено, що кування сталі й інших металів відбувається найбільш успішно після перекристалізації в процесі нагрівання – перебудови структури в однофазний стан, який характеризується однаковим складом і властивостями всіх її зерен. Однофазний стан у сталях відповідає області часткового аустеніту.

Температуру робочого простору печі беруть дещо вищою кінцевою температури нагрівання металу. Цей температурний перепад, або температурний тиск (різниця між температурою печі і кінцевою температурою нагрітого металу), зазвичай складає 100...150 °C. Таким чином, нормальна температура камерної печі буде 1250...1350 °C. Температура печі при посадці холодного металу в багатьох випадках визначає якість його нагрівання. Посаджені в піч з високою температурою відливки і товсті заготовки завдяки великій різниці температур печі і металу отримують, якби температурний удар. Температурні напруження, що виникають при цьому, можуть призвести до утворення тріщини в металі. Відповідно, температуру печі при посадці металу необхідно встановлювати відповідно з сортом сталі і товщиною відливки і заготовки.

Посадку заготовок з конструкційної вуглецевої сталі можна проводити при високій температурі. Посадку заготовок з високолегованої сталі треба проводити при більш низьких температурах печі. Цього правила особливо

необхідно дотримуватися при нагріванні виливків.

6.3. Окислення й обезвуглецевлення сталі при нагріванні

Нагрівання металу є процесом не тільки фізичним, але й хімічним, оскільки гази пічної атмосфери при високій температурі вступають в активну взаємодію з металом. Внаслідок цього нагрівання металу в печах відкритого полум'я, тобто в безпосередньому контакті з пічною атмосферою, супроводжується його окисленням – втратами металу на вигорання.

Атмосфера печі

Гази, що входять до складу пічної атмосфери, можна розділити по їх хімічній дії на окислювальні: O_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 , відновлювальні CO , H_2 і нейтральні N_2 . Кількість кожного з цих газів залежить від складу спалюваного палива і режиму горіння, а тому й атмосфера печі залежно від її хімічних властивостей може бути: окислювальною, нейтральною, відновлювальною.

При повному горінні палива з надлишком повітря в продуктах горіння присутній вільний кисень – така атмосфера є окислювальною. При повному горінні палива з теоретичною кількістю повітря в продуктах горіння не буде вільного кисню – таку атмосферу називають нейтральною. Якщо горіння відбувається з недостаткою повітря (неповне горіння), то в продуктах горіння з'являється окис вуглецю і водень, а в деяких випадках легкі вуглеводи, переважно метан, – така атмосфера називається відновлювальною.

Однак потрібно зазначити, що взаємодія між атмосферою печі та металом не завжди відповідає вказаному визначенню атмосфери. Активність цієї взаємодії передусім залежить від того, який це метал. Наприклад, нейтральна атмосфера є справді нейтральною при нагріванні мідних сплавів, але вона стає окислювальною при нагріванні сталі. Відповідно розділення пічної атмосфери на окислювальну, нейтральну і відновлювальну стосується не стільки характеру взаємодії між атмосферою печі і металом, скільки хімічного складу тієї чи іншої атмосфери.

Втрати на вигорання при нагріванні зазвичай доволі великі. Враховуючи, що метал у процесі обробки нагрівається кілька разів, можна вважати, що близько 5% металу, який виплавляється, втрачається в окалину при нагріванні в прокатних, ковальських і термічних печах, при чому в ковальському виробництві втрати на вигорання складають 2...3%. В ряді випадків вартість металу, втраченого на вигорання, перевищує вартість палива, що витрачається на нагрівання металу.

Шкода вигорання не вичерпується лише втратами металу з окалиною: остання при куванні втискується в метал, знижуючи якість поковок і збільшує брак, прискорює зношення штампів і підвищує втрати на додаткову обробку поковок; крім того, окалина руйнує під печі.

Величина вигорання сталі при нагріванні обумовлюється:

– атмосферою печі, що залежить від виду спалюваного палива і режиму

його горіння;

– температурного нагрівання;

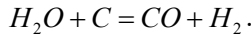
– тривалістю нагрівання;

– сортом (маркою сталі), формою і розміром заготовок, що нагріваються;

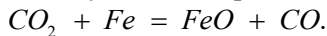
Атмосфера ковальської печі зазвичай окислювальна, оскільки спалювання палива відбувається з надлишком повітря.

Окислювачами для сталі є не тільки кисень, але й такі гази як вуглекислий, сірчаний газ і водяна пара. Окислювальна здатність кожного з цих газів залежить від температури. При високій температурі основним окислювачем є кисень. При взаємодії зі сталлю він окислює залізо і вуглець, який знаходиться у ній, утворюючи при цьому вуглекислий газ CO_2 .

Водяна пара є активним окислювачем сталі навіть при низьких температурах. Він окислює в сталі не тільки залізо а й вуглець:



Водяна пара робить окалину рихлою та такою, що легко відділяється. Окислювальна здатність вуглекислого газу збільшується з підвищенням температури, окислення заліза відбувається за реакцією:



При наявності в пічній атмосфері окису вуглецю CO окислювальна здатність вуглекислого газу зменшується. Окис вуглецю є відновником; на більш інтенсивне відновлення окисом вуглецю відбувається при температурі 600...800 °С. В цьому інтервалі температур взаємодія окису вуглецю зі сталями різних марок відбувається по-різному: в маловуглецевих сталях вона підвищує вміст вуглецю, а щодо високовуглецевих сталей вона нейтральна. Для хромованих сталей окис вуглецю є слабким окислювачем.

Водень для сталі є активним відновником. Водночас при високій температурі водень обезвуглецевлює високовуглецеву сталь.

При наявності сірчаного газу в пічній атмосфері окислення сталі збільшується, окрім того, підвищується вміст сірки в поверхневому шарі сталі; легованій сталі сірка завдає більшої шкоди, ніж вуглецевій.

Окалина складається з трьох шарів: зовнішній – окис заліза Fe_2O_3 – 2%; середній – закис-окис Fe_3O_4 – 18%; внутрішній – закис заліза FeO – 80%.

Вигорання мало вуглецевої сталі можна приблизно вирахувати за формулою:

$$Y_1 = 0,067 \tau(t - 800), \text{ г/м}^2,$$

де Y_1 – вигорання сталі в г/м^2 ;

t – температура витримки;

τ – тривалість витримки в хв.

При відношенні поверхні металу, що нагрівається до його ваги F/G , часове вигорання Y_2 в % визначається за виразом:

$$Y_2 = \frac{Y_1 \cdot F}{G} \times 100\%.$$

6.4. Швидкість нагрівання металу. Тривалість нагрівання

Тривалість нагрівання – час, який необхідний для нагрівання зливка або заготовки за заданим режимом і залежить від таких факторів:

- 1) марки матеріалу і товщини заготовок, що нагріваються;
- 2) від форми перерізу і способу викладання заготовок на черені печі;
- 3) від температури робочого простору печі і кінцевої температури нагрівання металу.

Матеріали з меншою теплопровідністю потребують більшого часу нагрівання. При нагріванні тонких заготовок різниця температур по перерізу невелика, що включає час виникнення температурних напружень, які могли б привести до тріщин, а тому тонкі заготовки можна нагрівати з такою швидкістю, яку допускає піч. Зі збільшенням товщини заготовки різниця температур по перерізу зростає. Чим вища температура печі і менша теплопровідність сталі, тим більша різниця температур в заготовці, що нагрівається. Таким чином, одна і та ж заготовка при нагріванні може поводити себе по-різному: при високій температурі – як і тонка, а при високій – як товста.

Для встановлення границь тонких і товстих заготовок користуються такою формулою:

$$Bi = \frac{\alpha_0 d}{\lambda},$$

де - α_0 - коефіцієнт тепловіддачі в ккал/м²·год·°С;

d - товщина заготовки в м;

λ - коефіцієнт теплопровідності ккал/м·год·°С.

При $Bi < 0.25$ - область тонких заготовок.

$Bi > 50$ - область товстих заготовок.

Між цими значеннями Bi - перехідна область.

На рис. 22 для сталі з теплопровідністю $\lambda = 35$ ккал/м·год·°С показані графічні області тонких і товстих заготовок залежно від температури печі і перехідна область між ними.

З графіка видно, що поняття тонкої і товстої заготовки, поняття відносне: наприклад, заготовка круглого січення $\varnothing 100$ мм при нагріванні в печі з температурою 800-900 °С, поводить себе як тонка, а при нагріванні печі з температурою 1300 °С, як товста заготовка.

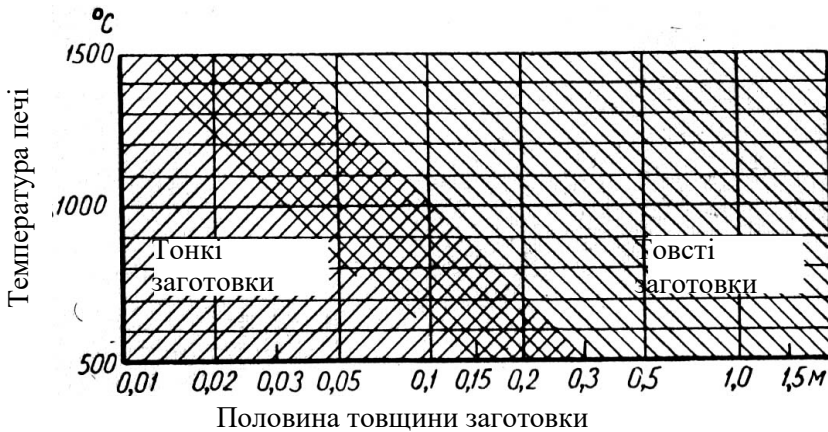


Рис. 22. Области тонких і товстих заготовок в печі з постійною температурою.

Для більшості ковальських печей (1200-1300 °C) границя між товстими і тонкими заготовками лежить у межах від 50-100 мм. Це означає, що заготовку товщиною до 100мм з маловуглецевої або малолегованої сталі можна нагрівати як завгодно швидко, а заготовки товщиною більше 100мм завжди необхідно нагрівати з певною швидкістю, яка залежить від марки сталі.

Форма заготовок помітно впливає на тривалість нагрівання. Наприклад, заготовки круглого перерізу при рівних умовах нагріваються швидше заготовок квадратного і прямокутного перерізу, оскільки поверхня круглої заготовки, яка сприймає тепло, більша.

Розташування заготовок на черені печі також впливає на тривалість нагрівання. Якщо заготовки викладені на черені щільно, то поверхня, яка сприймає тепло, зменшується. В цьому випадку заготовки прямокутного перерізу нагріваються тільки з однієї сторони.

Тривалість нагрівання в камерних печах заготовок товщиною вище 100 мм +визначається за формулою Н.Н. Доброхотова:

$$Z = \alpha \cdot k \cdot d \cdot \sqrt{d}, \text{ год}$$

де Z - повна тривалість нагрівання, год.

d - діаметр заготовки в м.

k - коефіцієнт, рівний 10 для конструкційної вуглецевої і низьковуглецевої сталі і 20 для високо вуглецевої і високолигової сталі.

α - коефіцієнт, який враховує спосіб вкладання заготовок на черені печі (рис. 23).

Тривалість нагрівання для високовуглецевої і високолигової сталі розбивається на два періоди: від 0 до 850 °C і від 850 до 1200 °C, при цьому коефіцієнт k для I періоду прийнятий 13,3 а для II періоду-6,7.

Режим нагрівання металу може бути одноступінчатим, двохступінчатим і трьохступінчатим. Це означає, що повний час для нагрівання металу ділиться на один, два або три періоди, встановлені межами





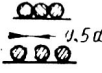
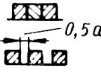

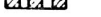
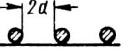

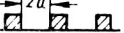
Розташування заготовок на черені печі			
	α		α
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2
			1,8

Рис. 23. Вплив розташування заготовок в печі на продуктивність їх нагрівання.

температур. Одноступінчатий нагрівання приймається для тонких заготовок.

Двохступінчатий режим включає два періоди: нагрівання при низьких температурах і нагрівання при високих температурах. Перший період нагрівання (до 680...850 °С) є вирішальним для цілісності металу, оскільки сталь при низьких температурах має малу пластичність. У другий період нагрівання пластичність металу збільшується, тому нагрівання можна вести швидше без ризику появи тріщини в заготовках.

Трьохступінчатий режим складається з трьох періодів: повільного нагрівання при низьких температурах, прискореного нагрівання при високих температурах, і витримці при кінцевій температурі. Трьохступінчатий нагрівання необхідний для сталей з малою теплопровідністю і великих заготовок.

Режим нагрівання заготовок для різних марок сталей приводяться у спеціальних таблицях.

По особливостях поведінки сталі поділяються на 4 групи.

До першої групи відносяться конструкційні вуглецеві і низьколігвовані (нікелеві, хромисті і марганцеві) сталі марок:

Ст 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 25Н, 35Н, 45Н, 50Н, 15Х, 20Х, 30Х, 35Х, 38Х, 40Х, 15Г, 20Г, 30Г, 40Г.

До другої групи відносяться інструментальні, вуглецеві і конструкційні леговані(нікелеві, хромисті, хромонікелеві, хромомолібденові, хромомарганцеві, хромомарганцевокремнієві, хромомолібденованадієві,

хромонікельванадієві) сталі марок:

55, 60, 65, 70, У7, У8, У10, 45Г, 50Г, 60Г, 55Н, 45Х, 55Х, 15ХГ, 20ХГ, 40ХГ, 35ХГ2, 20ХН, 40ХН, 45ХН, 50ХН, 60СГ, 4СХ, 12ХН2, 12ХН3, 20ХН3, 30ХН3, 35ХН, 20ХГС, 25ХГС, 30ХГС, 35ХГС, 50ХФА, 20ХМО, 35ХПФА, 20ХНФ, 35ХЮА, 38ХМЮА.

6.5. Охолодження поковок

При охолодженні в поковках виникають термічні напруження внаслідок перепаду температури в різних її частинах. Неправильне охолодження поковки може призвести до її жолоблення поверхневої міцності, а при дуже швидкому охолодженні до утворення тріщини(внутрішньої і зовнішньої) в поковках.

Охолодження поковок проводять:

1) на повітрі шляхом викладання її на суху землю по одній, навалом, штабелями або шляхом викладання на стелажах, в ящики і колодязі;

2) з засипанням поковок сухим піском. Не можна викладати поковки на чавунні плити, а також залишати їх на протязі.

Більш повільно охолодження відбувається на повітрі в ящиках і колодязях з засипанням піском. В ящиках охолоджуються дрібні(малі) поковки накидом. Ще повільніше проходить охолодження поковок в печі, попередньо нагрітій до температури 600...700⁰С. Вони охолоджуються разом з піччю до температури 100⁰С, а далі на повітрі.

7. Типи і конструкції термічних печей. Вимоги до термічних печей, їх класифікація.

До термічних печей ставлять такі вимоги:

- простота конструкції;
- надійність в експлуатації;
- висока якість термічної обробки;
- мінімальне споживання енергії;
- економічна експлуатація.

Висока якість термічної обробки забезпечується лише при суворому дотримуванні заданого режиму нагріву і охолодження деталей. Якщо в піч завантажуються декілька деталей, то однакові властивості після термічної обробки вони будуть мати тільки в тому випадку, якщо умови їх нагріву і охолодження будуть однаковими.

Рівномірний нагрів деталей, які знаходяться в різних частинах робочого простору печі, досягається застосуванням вентиляторів, які переміщують атмосферу в печі.

Застосовують також екранування джерел тепловиділення (наприклад, горілок, нагрівачів), які розташовують рівномірно в робочому просторі.

Для досягнення рівномірного охолодження деталей, наприклад, при гартуванні, баки обладнують пристроями, які забезпечують інтенсивну циркуляцію охолоджуючого середовища (води, мастила) відносно всіх деталей, що гартуються.

Тип печі для термічної обробки вибирають з урахуванням ряду факторів. В першу чергу розглядають весь перелік деталей, що піддаються обробці. Залежно від марки матеріалу деталі визначають максимальну і мінімальну температуру печі. Вибір типу печі і степінь механізації термічної обробки залежить від кількості оброблюваних деталей і їх розмірів.

Печі для термічної обробки класифікують:

- за видами енергії;
 - полум'яні;
 - електричні;
- за ступенем механізації:
 - механізовані;
 - немеханізовані;
- за призначенням:
 - гартувальні;
 - нормалізаційні;
 - цементаційні та ін.;
- за способом завантаження;
 - камерні;
 - шахтні;

- з висувним подом;
- канавкові;
- елеваторні;
- конвеєрні;
- штовхальні з пульсуючим подом.

Конструкції термічних печей

Печі, які працюють на газовому і рідкому паливі, не мають суттєвої конструктивної різниці.

При спалюванні рідкого палива на печі встановлюють форсунки, до яких підводять мазут і повітря, а при спалюванні газоподібного палива – встановлюють горілки, до яких підводять горючий газ і повітря.

Деякі печі пристосовані для роботи на рідкому і газоподібному паливі. В цьому випадку на печі встановлюють форсунки і горілки або тільки комбіновані форсунки, які можуть бути використані для спалювання як рідкого так і газоподібного палива.

Відвід продуктів горіння в печах, які працюють на рідкому і газоподібному паливі виконується під зонт, з'єднаний з цеховою витяжною вентиляційною системою, або в канали, які знаходяться під підлогою цеху і з'єднані з димовою трубою, або димососом, розташовані від печі на відстані.

Камерна піч з підчереневими топками

Для нагріву невеликих деталей перед гартуванням і високим відпуском в атмосфері, яка складається з продуктів горіння палива, застосовують камерні печі, які нагріваються газоподібним або рідким паливом.

Розглянемо камерну піч з підчереневими топками, з ручним завантаженням і вивантаженням деталей (Рис.1.). Піч має передню, задню і дві бокові стінки, на які опирається склепіння. В передній стіні є завантажувальне вікно 4 і два димоходи 3 для відводу з печі продуктів горіння палива. Під 11 печі складається з плити вогнестійкого матеріалу, які опираються на виступи в стінах і стовпчик 12, який розділяє підчереневий простір на дві частини. Підчереневий простір призначений для спалюванні палива.

В печі під черінню заходиться дві топки 1, кожна з яких з'єднана з робочим простором 15 печі двома вертикальними каналами 9. піч опалюється природним газом, для спалювання якого використовують дві однопровідні інжекційні горілки 16.

Завантажувальне вікно печі закрито заслінкою 2, футероване вогнестійким матеріалом. Піднімання заслінки виконується пневматичним циліндром 10. Стінки, склепіння і черинь печі виготовлені з шамотного вогнетривкого матеріалу 13, в якості теплоізоляційного матеріалу для склепіння і стін застосовують діатоміт 14. Піч має каркас 8, зварений з

листової сталі товщиною 5 мм і підсилений профільною катанкою. Температуру в печі вимірюють термопарою. Яка встановлюється в робочий простір печі через отвір 7 в задній стінці. Рівномірна температура в робочому просторі печі досягається відділенням топкового простору від камери нагріву, примусовою циркуляцією газів в камері нагріву.

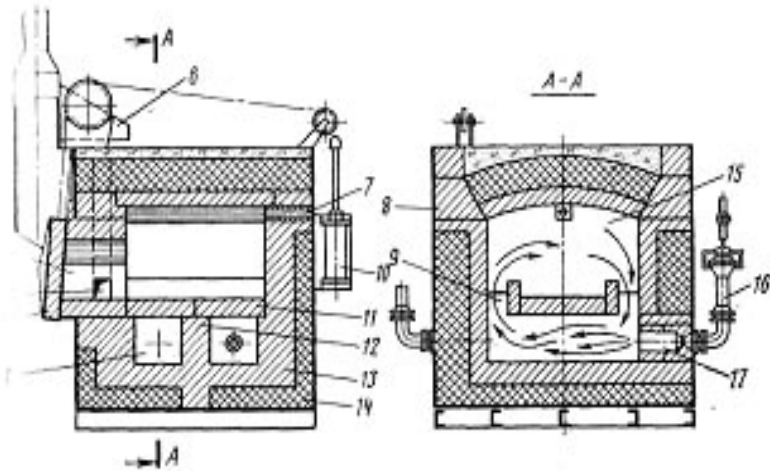


Рис. 1. Камерна піч з підчереневимитопками.

Температура в топковому просторі, виходячи з умов стійкого горіння палива, повинна бути не нижче 800°C . При розташуванні топків під подом печі температура в топці підтримується $900\dots 1000^{\circ}\text{C}$, а в камері нагріву може змінюватись від $550\dots 1000^{\circ}\text{C}$. В місці виходу продуктів горіння з горілочного тунелю 17 в топку створюється розрідження, внаслідок якого з робочого простору, в топку втягуються більш холодні гази. В топці холодні і гарячі гази змішуються і потім каналом 9 надходять в камеру нагріву.

Продукти горіння видаляються з печі двома димовими каналами, розташованими в нижній частині завантажувального вікна. Вхід в димар, як правило, роблять на рівні поду для того, щоб продукти горіння, які виходять з печі, опускаючись в нижню частину вікна, перешкождали проникненню в піч холодного повітря із цехового простору. При такому розташуванні димоходів холодне повітря, яке проникло через нещільності між заслінкою і вікном, дійде лише до димоходів, через які його видаляють. Таким чином виключається попадання холодного повітря в робочий простір печі, де знаходяться деталі, що нагріваються. Для видалення від печі продуктів горіння передбачений ковпак 5, який приєднаний до цехової вентиляційної системи. Гази, які вибиваються з печі через завантажувальне вікно 4, потрапляють прямо в зонт, а гази, які виходять з димоходів 3 попадають в зонт через патрубки 6, з'єднані з зонтом. При цьому система видалення газів повинна лише збирати продукти горіння, які вибиваються з печі, але не

втягувати їх з печі, тому зонт 5 і патрубки 6 встановлюються на печі з зазором.

Печі з підчереновими топками можуть працювати і на рідкому паливі. В цьому випадку замість горілок повинні бути встановлені форсунки, які забезпечують повне спалювання рідкого палива в підчереновому просторі печі.

Продуктивність камерних печей з підчереновими топками залежить від розмірів поду печі. При нагріві під гартування питома продуктивність печі складає біля 150 кг/год з кожного квадратного метра черені. Температурний перепад в робочому просторі печі може досягнути 25...50° С. Витрати палива на обігрів печі залежить від її розмірів. Орієнтовані витрати природного газу складає біля 15 м³/год на кожний квадратний метр черені печі.

Конвеєрна гартувальна піч

Для термічної обробки болтів, шпильок, гайок, втулок і інших деталей масового виробництва застосовують конвеєрні гартувальні печі з захисною атмосферою. У якості гартувального середовища використовують масло або воду. Конвеєрні печі мають високу продуктивність і стабільність якості обробки.

На Рис.2 показана конвеєрна гартувальна піч, обладнана завантажувальним механізмом 2. Конвеєр печі складається із стрічки, опори для стрічки, привідного і натяжного пристрою.

Стрічка конвеєра зібрана з окремих ланок, відлита з хромонікелевої сталі. При збиранні стрічки, ланки розташовують щільно одна до одної. Така стрічка називається панцерною. Ланки по краях стрічки мають ребра, які утворюють суцільний бортик по всій довжині стрічки.

В зібраній стрічці кожна ланка міцно з'єднана з сусідніми ланками, що дозволяє транспортувати через піч деталі, які піддаються термічній обробці. Стержні, що з'єднують ланки між собою, практично не несуть навантаження, тому діаметр стержня не перевищує 10 мм.

Зібрана стрічка натягнута на барабани, встановлені на привідному і на натяжному валі. Барабани відлиті з хромонікелевої сталі і на зовнішній поверхні мають зуби, призначені для зачеплення з конвеєрною стрічкою. Барабан 4 на привідному валу кріпиться жорстко і при обертанні тягне стрічку разом з деталями, що лежать на ній. барабан 1 на натяжному валу встановлений вільно, він може обертатися на валу і мати невелике осьове переміщення. Це дозволяє натяжному барабану зайняти найбільш точне положення, яке забезпечує надійну роботу конвеєра.

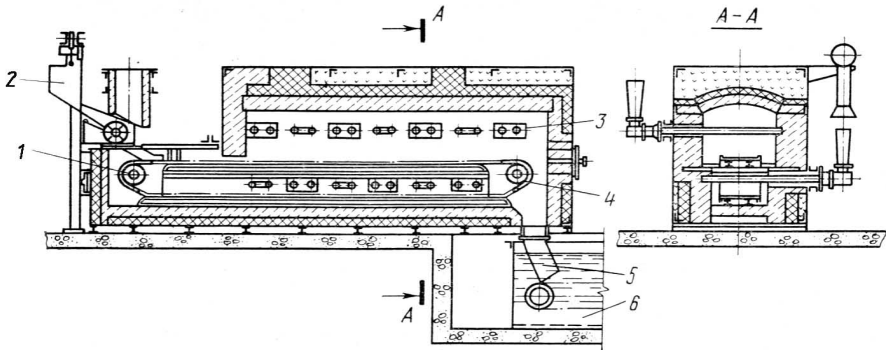


Рис. 2. Конвеєрна гартувальна піч

Привідний вал знаходиться в зоні високої температури і приймає великі механічні навантаження, тому його охолоджують проточною водою. Натяжний вал знаходиться в зоні відносно не високої температури і працює без водяного охолодження. Натягування виконується за допомогою вантажу і призначена для компенсації температурного розширення стрічки конвеєра.

При русі по печі стрічка ковзає поздовжніми рейками, які лежать на поперечних балках, замурованих в кладку печі. Рейки, які лежать під верхньою гілкою конвеєра, кріплять до поперечної балки, встановленої біля привідного барабана 4. Рух конвеєра в цьому випадку перешкоджає розтягуванню рейки. Піч обігривається петлеподібними радіаційними трубами з рекуператорами. Труби в печі розташовані в два ряди. Верхній ряд труб передає теплоту безпосередньо деталям, що нагріваються. Нижній ряд труб обігриває конвеєр знизу.

Піч по довжині розділена на дві температурні зони, кожна з яких регулюється самостійно. Термопари встановлюють в чохлах, які опускають в робочий простір печі через отвори в склепінні.

Захищений газ подається в піч через отвори, розташовані в бокових стінах печі біля привідного барабана 4. Вихід захисного газу з печі відбувається через вікно завантаження. Після виходу з печі гарячий захисний газ з'єднується з киснем повітря і згорає. Деталі завантажують у піч рівномірно по всій ширині стрічки конвеєра через отвір біля натяжного барабану. Проходячи через піч деталі розплавляються.

Перша зона печі призначена для нагріву деталей до необхідної температури, друга зона для витримки упродовж достатнього часу при заданій температурі. При згині стрічки на приводному барабані деталі ковзають з стрічки і падають в розвантажувальний отвір. В розвантажувальній частині печі встановлений хобот 5, опущений в бак 6 з рідиною для гартування.

Загартовані деталі з хобота подаються на конвеєр гартувального баку, і потім після охолодження виходять на повітря.

Штовхальна відпускна піч

Піч призначена для відпуску різних невеликих деталей. Температура в печі регулюється у межах 250...650⁰С. Атмосфера печі складається з продуктів повного горіння природного газу.

Через піч неперервної дії (Рис.3.) піддони з деталями рухаються двома направляючими 5, які покладені на поперечні опори 3. Направляючі відлиті з хромонікелевої сталі. Навантаження, яке створюється деталями і піддонами на направляючі, рівномірно розподіляються на кладку і каркас печі через стовпчики 2, виготовлені зі щільного вогнетривкого шамоту. Дві заслінки 6 перекривають завантажувальне і розвантажувальне вікна печі. Заслінки піднімаються і опускаються гідравлічними циліндрами 7.

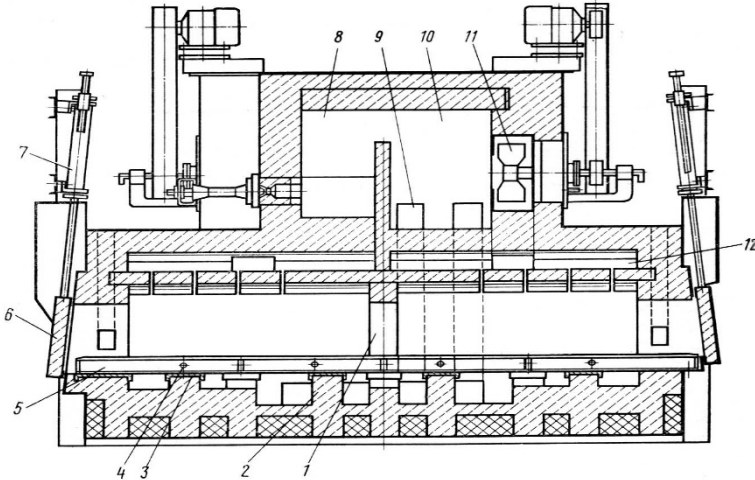


Рис. 3. Штовхальна відпускна піч.

Піч має дві температурні зони, відділені одна від одної стінкою 1, виконаною із вогнетривкого шамоту.

В першій зоні деталі нагріваються до заданої температури, а в другій витримуються протягом необхідного часу. Температура в кожній зоні регулюється автоматично.

Піч працює на природному газі, який спалюється в двох топках 8, розташованих над піччю. На малюнку показана одна топка.

Гарячі продукти горіння з топки подаються в камеру змішування 10, де вони перемішуються з холодними газами, які поступають з робочого простору печі по каналах 9.

Вентилятор 11 всмоктує з камери змішування газів і спрямовує їх в розподільний канал 12, розташований над склепінням печі. Через отвори в склепінні газів надходять у робочий простір печі.

Інтенсивна циркуляція газів в робочому просторі забезпечує швидкій та рівномірний нагрів деталей. Топка 8 відокремлена від робочого простору печі, що виключає перегрів деталей. Кожна зона має свою власну систему опалення, яка включає топку, камеру змішування і вентилятор.

Режими роботи окремих зон різні. В першу зону неперервно надходять холодні деталі, для нагріву яких вимагається більша кількість теплоти. Горілочки першої зони працюють на повну потужність. Фактична температура в першій зоні майже завжди нижче заданої температури. В другу зону поступають нагріті деталі, і теплота необхідна тільки на компенсацію витрат (через стіни, розвантажувальне вікно і т.д.). температура в другій зоні завжди близька до заданої температури.

Штовхальна гартувальна піч

Піч застосовується для нагріву під гартування різноманітних деталей машинобудування (Рис. 4.). Деталі завантажуються на піддони. Нагрів відбувається в середовищі захисного газу.

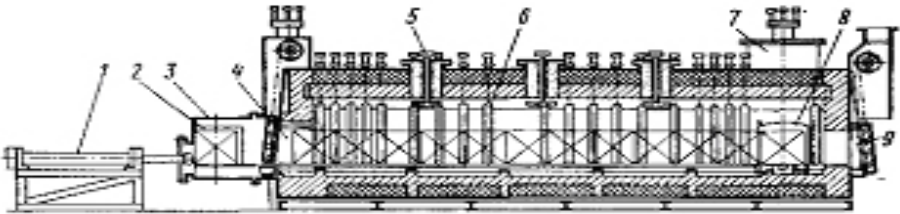


Рис. 4. Штовхальна гартувальна піч.

Піч складається з герметичного каркасу, футерівки, направляючих для переміщення піддонів, системи опалення вентиляторів для переміщення атмосфери.

Холодні деталі надходять в загартоване вікно 4 печі, а потім нагріті до певної температури, поступають у гартувальний бак через розвантажувальне вікно 8. На розвантажувальній стороні печі є ремонтне вікно 9, яке закривається футерованою заслінкою.

Для герметизації робочого простору в конструкції печі передбачено тамбури, які встановлюються на завантажувальній і розвантажувальній частинах печі. Внутрішній простір завантажувального тамбуру 3 віддаляється від робочого простору печі футерованим засувом 4, а від атмосфери цеху – зовнішнім засувом, який закриває завантажувальне вікно 2 тамбура.

Розташований тамбур 7 з'єднує каркас печі з гартувальним баком .

Піддони з деталями переміщуються двома направляючими з допомогою гідравлічного штовхача 1. Пройшовши піч, піддон з нагрітими деталями подається ланцюговим виштовхувачем, який розташований на боковій спинці печі напроти розвантажувального вікна 8, в гартувальний бак.

Піч опалюється тупиковими радіаційними трубами 6. По довжині піч має три зони, температура в яких регулюється автоматично.

В склепінні печі встановлено три вентилятори 5, які переміщують атмосферу печі, що сприяє вирівнюванню температури в робочому просторі. На зовнішньому кінці вала вентилятора встановлений шків, з'єднаний клинопасовою передачею з електродвигуном. На другому кінці вентилятора закріплено колесо з чотирма лопатками.

Захисна атмосфера подається в піч через два вводи, які розташовані на боковій стінці печі.

Ретортна цементаційна піч

Для газової цементації малих деталей застосовують ретортні печі (Рис.5.). Конструкція печі забезпечує переміщення деталей в процесі насичення їх вуглецем з метою отримання рівномірного цементованого шару.

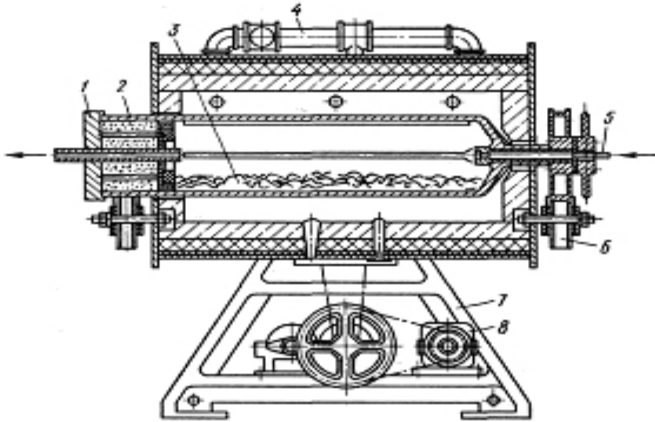


Рис. 5. Ретортна цементаційна піч

Всередині печі встановлена реторта 2, відлита з хромонікелевої сталі. Вона встановлена горизонтально на чотирьох котках 6, які закріплені на торцевих стінах печі. На цих котках реторта обертається навколо своєї осі за допомогою електродвигуна, який встановлений разом з редуктором і ланцюговою передачею на торцевій стінці печі.

Завантажувальний кінець реторти має кришку 1 з футерованим екраном, яка герметично закривається. В протилежному кінці реторти передбачений отвір для подачі науглецевлюючого газу в реторту.

Каркас печі циліндричної форми виготовлений з листової сталі. По боках циліндричної частини каркасу приварені дві цапфи. Цапфи встановлені в нерухомій в нерухомій рамі печі.

На одній із рам закріплена зірочка, яка з'єднана ланцюгом з приводом 8, який змонтований на рамі 7. Привід призначений для нахилу печі разом з ретортою. Для футерівки печі використаний вогнетривкий шамот.

Опалюється піч газовими горілками, розташованими вздовж реторти на двох сторонах печі. Деталі завантажують у розігріту реторту. Після встановлення на реторту кришки, реторта починає обертатись. Газ карбюризатор поступає в реторту, взаємодіє з завантаженими деталями і пройшовши через всю реторту, виходить з неї через отвір в кришці і згорає. Протягом всього часу цементації реторта обертається. Деталі в реторті неперервно перемішуються, що забезпечує доступ газу – карбюризатору до всіх деталей, які знаходяться в реторті. Після закінчення циклу цементації температуру в печі знижують до $820 - 840^{\circ} \text{C}$, потім кришка реторти знімається, піч разом з ретортою нахилиється і деталі висипаються з реторти в горизонтальний бак, розташований біля печі.

8. Електричні печі

В ряді випадків для термічної обробки використовують електричні печі. Вартість термічної обробки в електричній печі вища, чим в печі, яка опалюється природнім газом. Але, враховуючи більш просте обслуговування електричної печі, кращі умови терміста і т.д., електричні печі застосовують в термічних цехах машинобудівних заводів. Електричні печі невеликої потужності працюють від мережі з напругою 380В. Печі потужністю більше 100кВт підключають до мережі через спеціальний трансформатор. В ряді випадків електричні нагрівачі печі працюють на пониженій напрузі, забезпечуючи більшу стійкість нагрівачів. В цьому випадку до пічного трансформатора підводять напругу 380В, а до печі – меншу напругу, наприклад 10В. При обробці в електричних печах використовують звичайну повітряну атмосферу і захисну атмосферу.

Шахтна цементаційна піч

Для газової цементації застосовують шахтні печі з муфелем (Рис.6.). Шахтні печі особливо зручні для цементації довгих осьових деталей. Вали, осі і важелі підвішують за допомогою спеціальних пристосувань і піддають цементації у вертикальному положенні. В шахтних печах також обробляють і різноманітні дрібні деталі (поршневі пальці, кільця, втулки), які завантажуються в піч в корзинах 5. Корзини мають отвори для проходження газу-карбюризатору.

Шахтна цементаційна піч закривається кришкою 1, яка щільно приєднується до фланця муфеля відкидними болтами. В кришці є отвори для подачі в муфель газу– карбюризатору і відводу відпрацьованої атмосфери. В центрі кришки встановлений вентилятор 3 для перемішування атмосфери в муфелі 4, що дозволяє отримати постійну глибину насичення вуглецем оброблюваних деталей. Вентилятор включається після завантаження партії деталей в муфель і працює на протязі хіміко-термічної обробки.

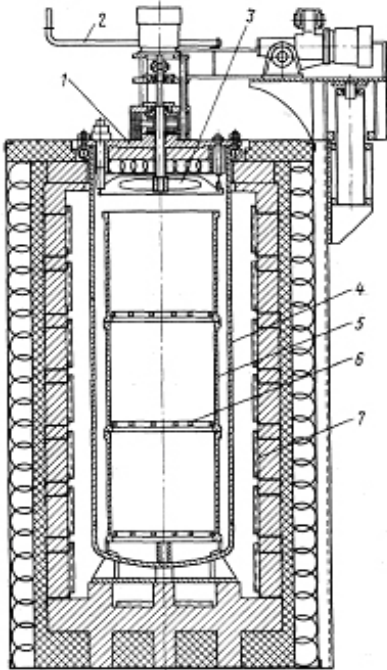


Рис. 6. Шахтна цементаційна піч.

Для рівномірного нагріву муфеля, а відповідно і оброблюваних деталей, піч по висоті розділена на дві самостійні температурні зони. В верхній зоні втрачається більше теплоти в оточуючий простір, ніж у нижній, тому на її нагрів витрачається більше електричної енергії.

атмосферою.

В шахтній печі з муфелем виключається взаємодія електричних нагрівачів з цементуючою атмосферою. Умови роботи нагрівачів в печах з муфелем аналогічні умовам роботи для звичайних печей з повітряною

Шахтні печі виготовляють різної потужності. Залежно від діаметра муфеля потужність печі складає 35 кВт (0,3м), 75кВт(0,45м), 105кВт(0,6м). Температура в печі до 950 С. Одночасне завантаження в муфель діаметром 0,3м – 185кг, 0,45м – 450кг і 0,6м – 1100кг.

Шахтна відпускна піч

Піч призначена для низького відпуску різних деталей при температурі 180...220 °С (Рис. 7.). Нагріваються деталі в основному гарячим повітрям. Деталі завантажують в піч в металевій корзині і нагрівають.

Піч складається з каркасу, теплової ізоляції 3, кришки, реторти 1, і вентилятора. Електричні нагрівачі 2 рівномірно розташовані по бокових сторонах внутрішнього простору печі. Реторта встановлена в центрі печі і призначена для захисту деталей від прямого випромінювання електронагрівачів. Між ретортою і нагрівачами є кільцевий простір, в якому циркулює повітря. В нижній частині печі встановлений осьовий вентилятор.

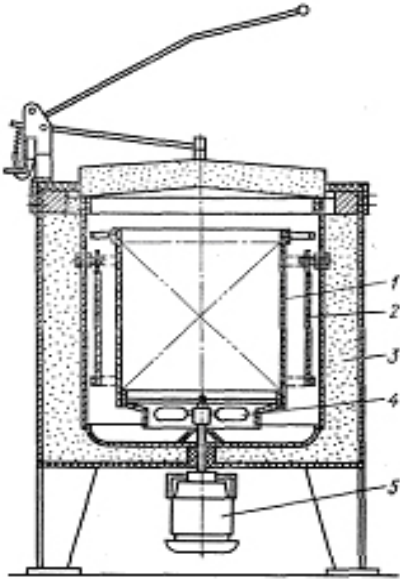


Рис. 7. Шахтна відпускна піч

Повітря направляється вентилятором по кільцевому простору вгору і, проходячи повз електричні елементи, нагрівається. В верхній частині печі потік гарячого повітря змінює напрямок руху на 180 і входить в реторту, де знаходиться корзина з деталями. Інтенсивна циркуляція повітря забезпечує рівномірний нагрів всіх деталей, які знаходяться в корзині.

Кришку печі піднімають ручним важільним механізмом. Після підйому кришки над піччю її відводять в сторону, щоб завантажити або розвантажити корзини з деталями.

Шахтні печі випускають для низького відпуску з діаметром робочого простору від 400...2000мм і висотою робочого простору 200...3000мм. Максимальна температура нагріву 350 °С.

Конвеєрна нормалізаційна піч

Для нормалізації малих деталей в середовищі захисного газу застосовують конвеєрні печі з електричним нагрівом.

На Рис.8. показана конвеєрна піч, в якій завантажувальний і розвантажувальний отвори печі розташовані нижче рівня робочого простору печі. Цим досягається утворення в робочому просторі печі невеликого надлишкового тиску, який перешкоджає попаданню в піч повітря через можливі нещільності в каркасі. Для забезпечення надлишкового тиску завантажувальний тамбур 4 і розвантажувальний тамбур 8 встановлені похило.

Розвантажувальна частина печі являє собою охолоджувальний коридор, який складається з камери попереднього охолодження 7 і розвантажувального тамбуру 8, які мають подвійні стінки. В середині охолоджувального коридору встановлений конвеєр, простір між подвійними стінками заповнена проточною водою.

Захисний газ подається в піч 5 через ввід 6, розташований на склепінні в печі, для заповнення внутрішнього простору печі, включаючи тамбур завантаження і охолоджуючий коридор. З печі його видаляють через отвори завантаження і розвантаження тамбурів. Захисний газ, який виходить з отвору завантажувального тамбуру, має невисоку температуру і видаляється

під зонт незгорілим. Між патрубками 3 і 10, які є частиною витяжної вентиляції, і завантажувальними та розвантажувальними тамбурами є розриви. Завдяки цим розривам витяжна вентиляція не висмоктує гази із печі, що є недопустимим, а лише захоплює їх по виході із тамбурів, не порушуючи гідравлічного режиму печі.

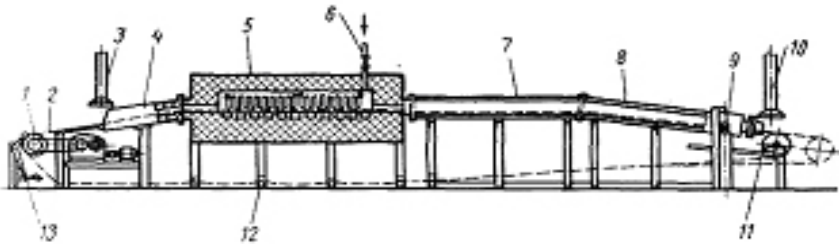


Рис. 8. Конвеєрна нормалізаційна піч

Конвеєр печі є сіткою 2 виготовлену з ніхромового дроту. Привід конвеєра знаходиться в завантажувальній частині печі, що дозволяє зменшити навантаження на сітку, яка знаходиться в камері нагріву печі, і тим самим продовжити термін служби конвеєра. Привідний барабан 1 має покриття з гуми, яка забезпечує хороший контакт з сіткою 2, яка притискається до барабану важільним пристроєм 13.

Натяжний пристрій конвеєра розташований в розвантажувальній частині печі і складається з натяжного барабану 11, який переміщується вздовж печі в міру видовження сітки, противаг 9 і системи тросів і роликів. Верхня частина конвеєра проходить через піч по ніхромовим смугам, а нижня підтримується роликами 12. Натяжний барабан 11 по мірі видовження сітки переміщається вздовж печі до тих пір, поки не досягне крайнього положення. Потім сітку вкорочують і барабан займає початкове положення.

Деталі, які піддаються нормалізації, вкладають на сітку в один ряд по висоті, що забезпечує не тільки швидкий нагрів, але й достатнє охолодження деталі. Температура деталей при виході з розвантажувального вікна повинна бути не більшою 40–50 С. При більш високій температурі на поверхні деталі з'являються окисні плівки (кольори побіглості).

Піч з гвинтовою черінню

Печі цього виду призначені для нагріву під гартування деталей циліндричної форми (прутів, штанг, осей, валів) довжиною від 200 до 2000мм і діаметром від 15 до 60мм. (Рис.9.). Деталі нагрівають в повітряному середовищі або в присутності захисного газу.

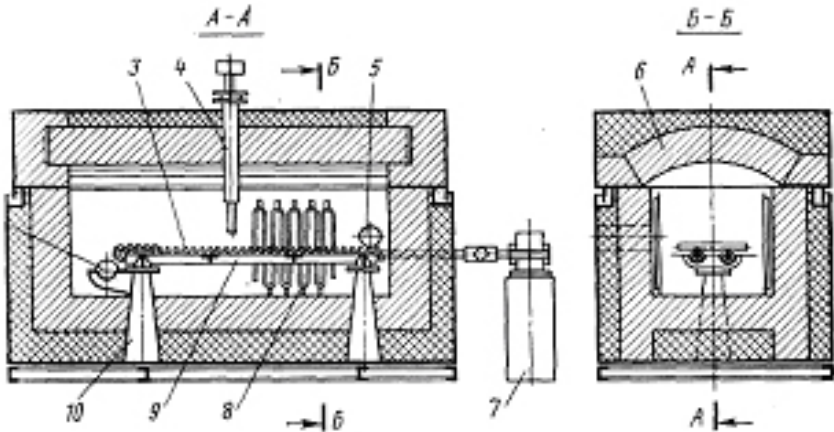


Рис. 9. Піч з гвинтовим подом

В камері нагріву на двох литих стійках 10 встановлена плита 9, в якій розміщені два гвинти 3. При включенні приводу 7 гвинти обертаються в протилежні сторони таким чином, що деталі викладені на гвинти, пересуваються вздовж печі в сторону розвантажувального вікна 1. Деталі, нагріті в середовищі захисного газу, падають з гвинтів у витягувач і вивантажуються з печі.

Піч має з'ємне склепіння 6, що дозволяє ремонтувати електричні нагрівачі 8, а також замінювати гвинти. Деталі завантажують в піч через вікно 5 з допомогою спеціального механізму. Необхідна герметичність печі досягається ущільненням склепіння піщаним замком 2. Температура в печі вимірюється термопарою 4.

В печах з гвинтовою черінню відсутні втрати на нагрів тари, що підвищує ККД печі. Витрати захисного газу невеликі, так як розвантажувальне 1 і завантажувальне 5 вікна мають отвори невеликого діаметру.

Карусельна піч

Карусельні печі застосовують для нагріву під гартування і для нормалізації шестерень, втулок, коліс і т.д. Деталі нагрівають у звичайному повітряному середовищі або в присутності захисного газу. Карусельні печі мають обертову черинь, на яку вкладаються деталі.

На Рис. 10. показана карусельна піч з обертовою черінню, яка закріплена на валу 4. Вал встановлений в опорному підшипнику 8 і в двох водоохолоджуваних втулках 3 і 9, закріплених в склепінні і днищі печі. На верхньому кінці валу є зірочка, з'єднана ланцюгом з приводом 2.

При відкритому засуві 7 через завантажувальне вікно 6 на черинь печі вкладаються деталі. При обертанні черені деталі, нагріваючись, роблять

повний оберт і з'являються на початковій позиції, де їх і дістають з печі. Деталі залежно від їх конфігурації можна викладати стопою. Завантажують і вивантажують деталі вручну кліщами або спеціальними захватами.

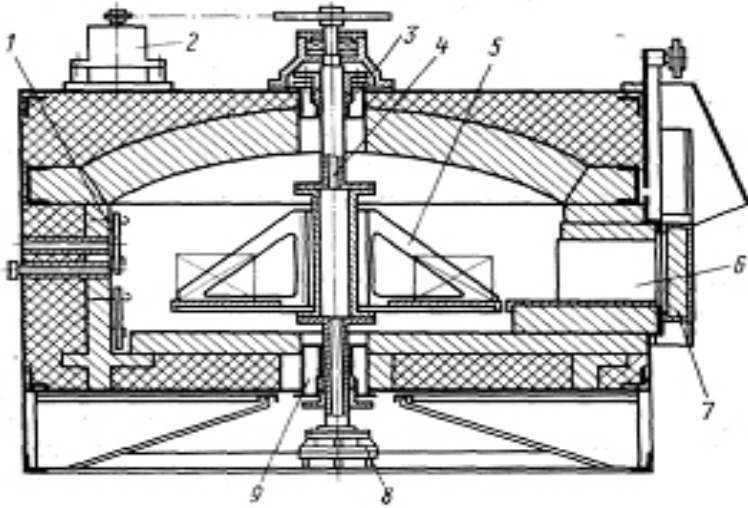


Рис. 10. Карусельна піч

Черинь печі складається з відлитих хромонікелевих плит, встановлених на кронштейнах 5, які прикріплені до валу болтовими з'єднаннями. Піч нагрівається електричними нагрівачами 1, які виготовлені з ніхромової стрічки. Нагрівачі розташовані в два ряди по висоті на боковій стінці робочого простору.

9. Електронагрів. Нагрівальні елементи

Для нагріву термічних печей широко застосовують електричні нагрівальні елементи опору – провідники, виконані з спеціального сплаву, який має великий електричний опір і високий термін служби при температурах, відповідній термічній обробці.

При протіканні по провіднику електричного струму відбувається перетворення електричної енергії в теплову.

Регулюючи величину напруги і опір провідника, можна добитися виділення необхідної кількості теплової енергії.

Величину напруги регулюють трансформатором. В термічних печах величина напруги може здійснюватись від 5 до 380В. Для цієї цілі використовують пічні трансформатори, розраховані на передачу великої кількості електричної енергії. Величину опору провідника можна підрахувати за формулою:

$$R = \rho_0 \left(\frac{l}{S} \right)$$

де, ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника, Ом м;

l – довжина провідника, м;

S – поперечний переріз провідника, м.

Довговічність нагрівача залежить від температури до якої він нагрівається. Чим кращі умови відводу тепла від нагрівача, тим нижча його температура при інших рівних умовах. В термічних печах температура нагрівача не повинна перевищувати температуру робочого простору печі більш ніж на 50–100 С. В цьому випадку забезпечується рівномірний нагрів деталей. Якщо температура нагрівача буде набагато вища температури нагріву деталей, то виникає місцевий перегрів деталей, що приводить до браку продукції. Довговічність нагрівача залежить від величини питомої поверхні навантаження (Вт/см). Для швидкого розігріву печі витрати електричної енергії в півтора раза більші, ніж потрібно при усталеному режимі роботи печі.

Типи електричних нагрівачів.

Залежно від заданої температури в робочому просторі печі використовують різні нагрівачі. Для отримання температур до 1100 С переважно застосовують нагрівачі з хромонікелевих сплавів, для більш високих температур (до 1300 С), наприклад, для нагріву під загартування швидкоріжучих сталей – керамічні нагрівачі ; до 600 С – трубчаті нагрівачі, які являють собою екранований нагрівач з хромонікелевих сплавів.

У вакуумних печах в якості нагрівачів використовують графітову тканину.

Більшість термічних печей мають нагрівачі з ніхрому– сплав нікелю і хрому. Нагрівачі виготовляють з дроту і стрічки. Нагрівач з дроту може бути виготовлений у вигляді спіралі або зигзагу. Площа розкриття у зигзагоподібних нагрівачів більша, ніж у спіральних. Вони добре віддають тепло в пічний простір, що збільшує термін їх служби. Термін служби нагрівача залежить також від діаметру дроту, з якого виготовлено зигзаг або спіраль.

Нагрівачі з ніхромової стрічки звичайно виготовляють з зигзагоподібної форми. Схема розміщення цих нагрівачів в печі така ж, як і зигзагоподібних дровових нагрівачів.

Литі нагрівачі виготовляють спеціальним методом лиття в оболонкові форми. Литі нагрівачі застосовують в печах тоді, коли застосування нагрівачів з прокату неможливе через недопустиме високе поверхнєве навантаження. Литі нагрівачі добре віддають тепло в пічний простір, який нагрівається до 950-1150 С. Нагрівачі в місці згину мають приливи, з

допомогою яких їх кріплять в печах на спеціальних петлях і гаках. До литих нагрівачів подають звичайно понижено напругу.

Керамічні нагрівачі виготовляють з карборунду– вогнетривкого матеріалу, який складається з кремнію і вуглецю.

Нагрівачі призначені для печей з робочою температурою 1300– 1350 С і мають тривалий термін служби в повітряному середовищі і атмосфері, яка містить водень і окис вуглецю. Термін служби нагрівачів зменшується при частих теплозмінах, тому їх краще застосовувати в печах неперервної дії. Нагрівачі використовуються у вигляді стержнів, причому частина, яка проходить через кладку, має більший діаметр. При роботі опір нагрівача змінюється, тому використовують трансформатор для зміни напруги на кінцях нагрівача в залежності від його опору.

Нагрівач з графітної тканини застосовують у вакуумних печах. У звичайних умовах графіт швидко окислюється і руйнується, але у вакуумній печі для його роботи створено хороші умови. Графітова тканина приєднується до графітових контактів. Необхідний опір нагрівача забезпечується включенням певної кількості полотен тканини. Вміст вуглецю в тканині складає 99,96%. Товщина нитки 0,01мм. Нагрівач має великий термін служби при робочій температурі в печі 1300– 1350 С. Напруга на нагрівачі подається після створення в печі вакууму відповідної величини

. Трубочатий електронагрівач ТЕН складається з трубки, виготовленої з жаростійкої або звичайної вуглецевої сталі, довжиною до 1м. В середині неї поміщена спіраль, навита з ніхромового дроту. Ніхромова спіраль розташована по осі трубки, а простір між спіраллю і стінками трубки заповнено порошком з окису магнію, який має хороші електроізоляційні властивості і високу теплопровідність. По кінцях трубки ставлять ізолятори з розташованими в них виводами, до яких приєднана спіраль. Трубки в зборі можна легко гнути і надавати їм будь-яку форму. Ці нагрівачі застосовують при робочій температурі до 600 С для нагріву повітря, води, масла і т.д.

Схеми з'єднання нагрівачів в печі

Для з'єднання електричних нагрівачів в печі між собою і підключення їх до цехової електричної мережі застосовують різноманітні схеми.

Залежно від конструкції печі і величини споживаної електричної енергії нагрівачі підключають одночасно або частинами. В невеликих печах, які мають порівняно невеликі розміри робочого простору, достатньо однієї температурної зони, нагрівачі з'єднуються в одну групу і включають в мережу одночасно. Печі невеликої потужності (до 25кВт) звичайно виготовляють однофазними, тобто підключають до однієї фази мережі живлення. Печі більшої потужності необхідно підключати до мережі таким чином, щоб навантаження на мережу було рівномірним .

Якщо потужність, яка виділяється нагрівачем, рівна добутку напруги на величину струму, то при з'єднанні трикутником потужність в три рази більша ніж при з'єднанні зіркою.

В термічних печах часто застосовують схеми, які дозволяють при необхідності включати нагрівачі, з'єднані трикутником або зіркою. Коли необхідно швидко розігріти холодну піч, нагрівачі включають по схемі трикутника, а коли піч вийде на робочий режим і великої кількості теплоти не потрібно, нагрівачі переключаються на з'єднання за схемою “зірка”.

Переключення з однієї схеми на іншу відбувається автоматично включенням контакторів (без від'єднання і переєднання нагрівачів).

10. Печі-ванни на рідкому і газоподібному паливі і електронагріві

Ванни або печі-ванни використовують для нагріву деталей при гартуванні, відпуску, нормалізації, цементації, ціануванні. Особливістю нагріву в ваннах є те, що деталь, що нагрівається повністю або частково поміщають в рідке середовище з заданою температурою. В якості середовища, що нагрівається, можуть використовуватись розплавлені метали, солі і масла. Нагрів в рідкому середовищі в порівнянні з звичайним нагрівом в печі має ряд переваг, важливим із яких являється висока швидкість і рівномірність прогріву садки. Ванни виготовляють двох основних типів: з внутрішнім опаленням середовища, що нагрівається і внутрішнім.

Ванни з зовнішнім опаленням. Ванни цього типу мають тигель, який виготовлюється з вуглецевої або жаростійкої сталі. Зовні тигля розміщується система його опалення. При електричному опаленні використовуються елементи опору, які рівномірно розміщуються по периметру тигля. При газовому або мазутному опаленні зовнішня поверхня тигля опалюється продуктами повного горіння палива. Спалювання палива повинно проводитись таким чином, щоб факел полум'я горілки або форсунки не був направлений прямо на тигель. Для попередження пропалювання тигля полум'я направляється по дотичній до поверхні тигля.

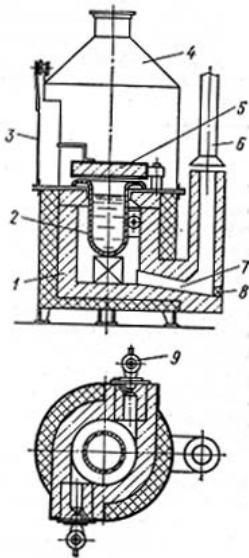
На рис. 11. показана піч-ванна, яка може опалюватись газоподібним або рідким паливом. Ванна має металічний каркас, всередині якого знаходяться вогнетривка кладка 1 і тигель 2. Спалювання палива відбувається двома комбінованими горілками 9, які розміщені тангенційно до тигля. Продукти спалювання палива при виході з горілок омивають тигель і виходять по каналу 7 в короб 6 витяжної вентиляції. Канал для відводу продуктів горіння розміщений похило, що полегшує видалення змісту тигля при його прогарі через отвір 8.

Для зменшення втрат теплоти дзеркалом ванни зверху над тиглем встановлена кришка 5, що повертається. Для вловлювання парів солей над ванною встановлений ковпак 4, який приєднаний до витяжної цехової вентиляції. Зі сторони завантаження в ковпакові є вікно, яке перекрите

відсувним екраном 3. Деталі завантажуються в тигель на пристрої за допомогою кліщів. Температура в тиглі контролюється термопарою, що поміщується в розплавлене середовище зверху.

Ванни з електричним опаленням, як правило, мають ще другу допоміжну термопару, яка контролює температуру в просторі, де розміщені електричні нагрівальні елементи. Це попереджує перегорання нагрівачів від надмірного збільшення температури. Недоліком ванн з зовнішнім опаленням є невисока стійкість тигля. Прогари його дна або стінок призводять до зупинки ванни для її розбирання і заміни тигля.

Ванни з внутрішнім опаленням. У ваннах з внутрішнім опаленням нагрівальні елементи розміщують безпосередньо в розплавленій солі або іншій речовині, яка заповнює простір, де знаходяться деталі, що оброблюються. Опалення ванни може бути електричним, в цьому випадку використовують трубчасті електричні нагрівачі, або полум'яним, тоді застосовують радіаційні труби, в яких спалюється природний газ. Електричні нагрівачі і радіаційні труби, як правило, розміщують по краям ванни, щоб забезпечити рівномірний нагрів робочого простору. Більшість ванн з внутрішнім опаленням мають тигель, який в цьому випадку є лише герметичною ємністю. В окремих випадках, коли розплавлена сіль не руйнує вогнетривкий матеріал, тигель може бути відсутнім. Стіни і днище ванни в цьому випадку виготовленні з високоякісного шамотного або високоглиноземного вогнетривкого матеріалу.



Електродні ванни – особлива різновидність ванн з внутрішнім опаленням. В робочому просторі електродної ванни встановлені електроди, до яких підводиться електрична енергія. Електроди, які виготовляють із сталі, мають велике січення. Струм до електродів подається масивними шинами від спеціального пічного трансформатора, який має декілька рівнів для регулювання напруги на електродах. В електродних ваннах нагрівальним елементом являється розплавлена сіль. Електричний опір шару солі між електродами значно більше опору самих електродів і шин, що підводяться, тому при підключенні ванни до мережі практично вся теплота виділяється безпосередньо в розплавленій солі. Чим більше необхідно виділити в ванні теплоти,

Рис. 11. Піч ванна з зовнішнім обігрівом

тим більше напруження повинне бути подане на електроди.

Електродні печі бувають однофазні, і тоді мають два електроди, і трьохфазні – в цьому випадку в ванні повинно бути не менше трьох електродів.

Струм, що протікає електродами досягає великої величини (5000-10000А), тому кругом електродів виникає сильне магнітне поле. Під дією цього магнітного поля починається циркуляція розплавленої солі в ванні. Кругом стін ванни сіль піднімається з дна і, досягаючи поверхні розплаву, направляє до електродів, а потім вниз, до нижніх кінців електродів. Циркуляція солі, яка виникає, сприяє вирівнюванню температури в ванні і попереджує перегрів солі біля електродів.

На рис. 12. показана трьохфазна електродна соляна ванна типу СВС, призначена для остаточного нагріву під гартування інструменту з швидко ріжучої сталі, відпалу нержавіючої сталі і пайки твердими припоями.

Електродна ванна складається з сталюго зварного каркаса, вогнетривкої кладки, кришки ванни, електродної групи (електродотримач, електроди, нульова перегородка), системи вентиляції і електрообладнання (трансформатора, щитів керування, з'єднувальних ліній).

Вогнетривка кладка ванни складається з вогнетривкого шару, виконаного з високоякісної шамотної цегли, і теплоізоляційного шару, виконаного з легковагової шамотної цегли і діатоміту. Вогнетривка частина кладки розміщена в проміжному металічному кожусі, який може бути легко вийнятий з ванни при необхідності заміни кладки. Наявність проміжного кожуха захищає теплоізоляційний шар кладки від проникнення в нього розплавлених солей, а значить, спрощує і прискорює ремонт вогнетривкої кладки.

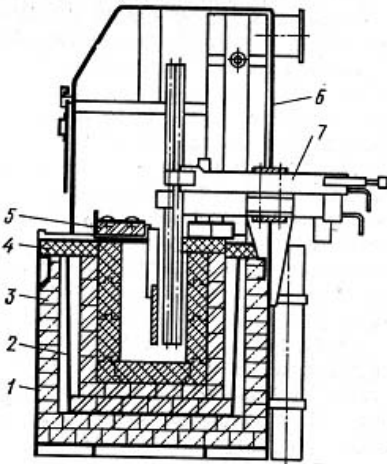


Рис. 12. Електродна соляна ванна

В ванну зверху опущені три електроди, які не доходять до дна ванни на 100-150 мм. Кожен електрод закріплений в водоохолоджуваному електро-тримачі, до якого приєднують шини, які йдуть від трансформатора. Вздовж фронту електродів, середовищі розплавленої солі, підвішена масивна перегородка з листової сталі. Вона огорожує робочу частину ванни від простору, де розміщені електроди. В трьохфазній системі при з'єднанні електродів по схемі зірочка перегородка з'єднується з нулем зірочки. Вирівнюючи нерівномірне

навантаження по фазах, яке виникає через розміщення електродів в одну лінію, перегородка, крім того, створює інтенсивну електромагнітну і теплову циркуляцію розплавленої солі між робочою частиною ванни і простором, де розміщені електроди. Одночасно вона захищає деталі, що нагріваються, від короткого замикання при зануренні їх в розплав.

Деталі, що нагріваються підвішують до кришки. Крупні деталі підвішують по одній штуці, а дрібні завантажують в пристосування, яке також підвішують до кришки, яка має на нижній поверхні спеціальні тримачі.

Вимірювання і автоматичне регулювання температури розплавленої солі здійснюється за допомогою радіаційного пірометра. Телескоп пірометра направлений на дзеркало ванни, з поверхні якої потоком повітря здувається шлак. Потік повітря поступає через повітряний патрубок захисної арматури пірометра, що одночасно охолоджує телескоп і захищає його від попадання парів солі на оптичний елемент телескопа.

Пуск електродної ванни починають з ретельного просушування вогнетривкої кладки газовою горілкою. При цьому в початковий період просушування не повинно бути гострого факела, викликаючого місцевий перегрів. Для розігріву солі при пуску ванни в сіль поміщають знімний блок нагрівачів з ніхрому. При підключенні цих нагрівачів до мережі вони розігріваються і сіль починає розплавлятися. Нагрівачі розраховані на напругу 8,3 В і мають потужність 10 кВт. Після попереднього розплавлення солі блок нагрівачів видаляють з ванни і подають напругу на електроди.

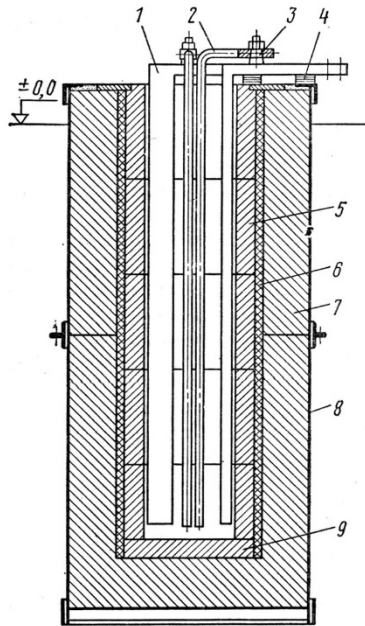


Рис. 13. Електродна соляна ванна для довгих деталей

По закінченню робіт на ванні в розплавлену сіль опускають блок нагрівачів, який охолоджується разом з ванною. При наступному пуску ванни її розігрів знову проводиться за допомогою блоку ніхромових нагрівачів.

Для нагріву під гартування до 1300 °С довгих деталей, наприклад протяжок, використовують електродну ванну (Рис. 13.). Вогнетривка кладка ванни обхвачена сталевим каркасом циліндричної форми. Внутрішній шар вогнетривкої кладки, який дотикається з розплавленою сіллю, виготовлений з високоглиноземистих блоків, які вміщують 65% Al_2O_3 . Робочий простір ванни має глибину 2400 м. По висоті ванни встановлено п'ять рядів високоглиноземистих блоків в кожному ряді. Дно робочого

простору ванни складене з чотирьох високо глиноземистих плит. При монтажі ванни високоглиноземисті блоки і плити ретельно підганяють один до одного. З'єднувальні поверхні попередньо покривають тонким шаром сметаноподібного високоглиноземистого бетону. Теплоізоляційний шар кладки виготовлений з легковагових вогнетривких матеріалів. Простір між теплоізоляційним шаром і високо глиноземистими блоками заповнено високоглиноземистим бетоном. Дана конструкція вогнетривкої кладки володіє високою вогнетривкістю, добрими теплоізоляційними властивостями і має мінімальну кількість швів на поверхні, які дотикаються з розплавленою сіллю.

Форма робочого простору ванни в плані представляє собою рівносторонній трикутник з зрізаними вершинами, в яких розміщені три електрода 1. електроди опущені в ванну майже на всю її глибину. Відстань між електродом і дном ванни складає 75 мм. Довжина електрода біля 2500 мм, а поперечне січення 150×60 мм.

Так як електроди розміщені між собою під кутом 120°, по всій висоті ванни між електродами в розплавленій солі проходить електричний струм, забезпечуючи рівномірний прогрів ванни.

Сіль в твердому стані не є електропровідною, тому спочатку її потрібно розплавити, а потім проводити нагрів ванни до 1300...1350 °С шляхом подачі напруги на електроди. Для попереднього розплавлення солі призначенні три пускових стержня 2. Стержень встановлюється на конус 3 в верхній частині електрода.

Перед розплавленням солі вогнетривка кладка ванни повинна бути ретельно просушена для попередження викиду солі з ванни в випадку випаровування вологи, що залишилась. Просушування ванни відбувається переносними електричними нагрівачами або газовою горілкою.

Розплавлення солі пусковими електродами відбувається в такій послідовності. На дно ванни насипають шар солі товщиною 1500-200 мм. По центру ванни в шарі солі роблять заглиблення і в нього опускають пускові стержні. Відстань між пусковими стержнями складає біля 30-50 мм. В верхній частині кожного пускового стержня є конусне гніздо, яке надягається на конус електрода і суцільно прижимається різьбовим пристроєм (див. Рис.). Перед встановленням в ванну кінці пускових стержнів попередньо розігрівають в ванні попереднього підігріву до 700...800 °С.

Після закріплення пускових електродів трансформатор включають на самий високий ступінь на пускові електроди подають напругу. За допомогою черпака або спеціального вичерпуючого пристрою з шаровим клапаном порцію попередньо розплавленої солі опускають на дно ванни і виливають в впадину в твердій солі. По розплавленні всієї завантаженої солі в ванну добавляють наступну порцію попередньо просушеної твердої солі, яка також розплавляється.

Зі зростанням рівня розплавленої солі зростає споживання струму, тому трансформатор потрібно переключити на більш низьку ступінь, щоб використання струму не перевищувало вказану в інструкції величину.

Заповнення ванни сіллю повинно проводитись повільно, щоб забезпечити прогрів електродів ванни. Після заповнення ванни на $\frac{3}{4}$ її об'єму відключають трансформатор, послаблюють кріплення стержнем на електродах і стержні виймають з ванни. Їх підвішують вертикально, щоб уникнути короблення. Трансформатор знову включають на ступінь, необхідний для забезпечення в ванні робочої температури.

Під час роботи температуру в ванні можна вимірювати як оптичним приладом, так і термопарою занурення. Глибина занурення термопари рівна десятикратному діаметру захисної трубки, в якій знаходиться термопара. Щоб система регулювання могла працювати безінерційно, термопару розміщують біля електродів, але на відстані не ближче 50 мм з метою запобігання розплавлення захисної трубки або помилкових показів.

Після закінчення роботи сіль з ванни видаляють вичерпуючим пристроєм, який складається з товстостінного циліндричного сталюого кожуха і підйомного пристрою. На дні вичерпуючого пристрою є оснащений важелем кульковий клапан.

Вичерпуючий пристрій можна занурювати в розплавлену сіль тільки в абсолютно сухому стані. При відкритому кульковому клапані вичерпуючий пристрій пускають в ванну і залишають на деякий час для прогріву. Закривши кульковий клапан, підйомним пристосуванням вичерпуючий пристрій виймають з ванни і виливають з нього сіль. Цю операцію повторюють декілька разів до повного вивільнення ванни.

В ряді випадків, наприклад при обробці інструмента з швидко ріжучої сталі, в одну лінію монтують три або чотири електродні ванни. Кожна ванна призначена для окремої операції: перша використовується для попереднього нагріву до 650 °С, друга – для наступного підігріву до 850 °С, а третя – для кінцевого нагріву до 1280 °С і четверта – для попереднього охолодження при ступінчастому гартуванні.

Кожна ванна має по два сталюих електроди діаметром 30-40 мм, опущених зверху в розплавлену сіль. В першій ванні знаходиться суміш двох солей: 50% KCl і Na_2CO_3 , в другій – також суміш двох солей: 70% $BaCl_2$ і 30% KCl і в третій – одна сіль: $BaCl_2$.

В низькотемпературних ваннах температуру вимірюють за допомогою термопари в захисному чохлі, поміщеної в розплавлену сіль.

У високотемпературній ванні температуру вимірюють радіаційним пірометром, телескоп якого спрямований на дзеркало ванни. Розміщення деяких електродних ванн в лінію дозволяє механізувати процес подачі з однієї ванни в другу. В цьому випадку вздовж лінії над ваннами

встановлюють підвісний конвеєр на висоті 800-900 мм. До ланцюга конвеєра прикріплені підвіски з корзинами або іншими пристосуваннями, в які вкладають деталі, що нагріваються.

Відстань між підвісками конвеєра відповідає відстані між ваннами, тому при періодичному включенні конвеєра кожна підвіска з корзиною з однієї ванни переходить в іншу. Вертикальне переміщення підвісок відбувається за рахунок встановлення в кожній ванні зірочок, що змінюють напрямок руху конвеєра.

11. Побудова печей

Заводські печі працюють в дуже несприятливих умовах. Температура в робочому просторі досягає 1400°C, а інколи і дещо більше, і може різко змінюватися при посадках холодного металу, зупинці печі. Крім цього, кладка черені робочого простору печі піддається тиску заготовок, що нагріваються, ударом при їх посадці, а також руйнівній дії окалини і шлаку.

Кладка печей виконується звичайно у два шари: внутрішній шар, який називається футерівкою, виконується з вогнетривкого матеріалу; для зовнішнього шару, який являється теплоізоляційним, необхідний матеріал з найменшою теплопровідністю.

Вогнетривкі матеріали

Значення вогнетривких матеріалів (в.м.) як основного будівельного матеріалу для печей дуже велике.

Для футерівки печей застосовуються такі вироби з в.м.: шамотні, диасові, магнезитові, талькові, а також вогнетривка глина і шамот.

Виходячи з умов роботи печі, матеріал футерівки її повинен бути:

1) вогнетривким, тобто не повинен розм'якати і оплавитись при роботі печі;

2) термостійким – добре протистояти різким коливанням температури;

3) будівельно – міцним в процесі роботи печі, зберігаючи при цьому постійність об'єму, оскільки зміна об'єму порушує міцність кладки; (розкриття швів і т.д.);

4) хімічно – стійким, тобто протистояти роз'їдаючій дії окалини і шлаку, які утворюються при роботі печі.

Але повністю всім вказаним умовам одночасно не відповідає не один вогнетривкий матеріал. Тому вірний вибір матеріалу для побудови печі багато в чому визначає її роботу, час між ремонтами, збереження форми і інше.

Вироби з вогнетривких матеріалів

За формою вогнетривкі вироби поділяються на нормальну цеглу і фасонні вироби. До нормальних відносяться пряма і клинова цегла, яка набула найбільш широкого застосування при побудові печей.

Шамотна цегла.

Найпоширенішим вогнетривким матеріалом для кладки печей є шамотна цегла, яка виготовляється з вогнетривкої глини. До складу вогнетривкої глини в основному входить глинозем Al_2O_3 і кремнезем SiO_2 . Вміст глинозему в вогнетривких глинах коливається у широких межах: для вогнетривких виробів використовують глини з вмістом глинозему до 45%. За вмістом глинозему глини розділяються на кислі ($\text{Al}_2\text{O}_3 < 15\%$), напівкислі (Al_2O_3 до 30%) і основні (30...45% Al_2O_3); чим більше глинозему в глині, тим краща отримується з неї цегла.

Для виготовлення цегли вогнетривку глину випалюють при 1300 - 1400°C, а потім розпилюють. Приготовлена таким способом вогнетривка маса називається шамотом. Попереднє випалювання глини необхідне тому, що приготована з сирієї глини цегла при випалюванні розтріскується. Шамот можна отримати і з шамотних виробів, які були у використанні, шляхом розмелювання їх в дрібну зернисту масу.

Для виготовлення шамотної цегли шамот змішують з підсушеною і розмолотою вогнетривкою глиною. Звичайно беруть 3 частини шамоту і 3 частини глини із отриманої суміші після її зволоження і обробки на глином'ялці формують на пресах цеглу, яку сушать і випалюють протягом 6 - 7 діб при температурі 1350°C.

Шамотна цегла має світло-жовтий колір і рівномірний зернистий злам.

За вогнетривкістю шамотна цегла ділиться на три класи: А - 1730°C, Б - 1670°C, В - 1580°C.

Цегла повинна бути не тільки вогнетривкою, але й міцною. При високій температурі будівельна міцність цегли зменшується; шамотна цегла починає розм'якати при температурі 1360°C, температура початку розм'якання тим нижча, чим більший тиск на цеглу.

З кращих сортів цегли викладаються склепіння і стінки топків, а також склепіння робочих камер; інші сорти ідуть на викладку стінок робочих камер, череней і ін. Цінною якістю шамотної цегли є її висока термостійкість, що є однією з причин широкого її застосування для побудови нагрівальних печей.

Недоліком шамотної цегли є невисока хімічна стійкість – роз'їдання її окалиною. Тому необхідно стежити за своєчасним видаленням з черені окалини і шлаку.

Динасова цегла.

Динасова цегла для печей застосовується рідко, в окремих випадках – для кладки топків, склепіння і стінок камер високої температури методичних і напівметодичних печей. Динасова цегла виготовляється з кварцових порід, відповідно, основним складовим елементом цієї цегли є SiO_2 (94...96%), чим і визначаються властивості цегли, яка має явно виражений кислий характер.

При виготовленні динасової цегли попередньо розмолотий кварц змішується з мінералізаторами (FeO – окалина і ін.), які додають для прискорення при випаленні переродження кварцу в інші модифікації.

З приготовленої маси формують на пресах цеглу, потім її випалюють при поступовому підвищенні температури до $1450\text{ }^\circ\text{C}$. Динасова цегла має білий і злегка жовтуватий колір, на зломі видні зерна кварцу. Кращою цеглою практично являється найбільш легка.

Вогнетривкість динасової цегли $1690\text{-}1730\text{ }^\circ\text{C}$. Цінною властивістю цієї цегли є близькість температури її деформації під навантаженнями до вогнетривкості. Термостійкість динасової цегли нижча, ніж шамотової, тому при швидкому охолодженні або нагріванні печі динасова цегла дає тріщини. Якщо навіть тільки окремі частини кладки печі викладені з динасової цегли, розігрів і охолодження такої печі необхідно проводити обережно (особливо в межах температур $200\text{...}600\text{ }^\circ\text{C}$).

Магнезитова цегла.

Магнезитова цегла готується з магнезиту MgCO_3 . При її приготуванні для видалення вуглекислоти CO_2 магнезит піддають випалюванню при температурі $1400\text{...}1700\text{ }^\circ\text{C}$. Випалену масу, яка складається переважно з кристалічного окису магнію MgO , розмелюють, а потім зменшують з $6\text{-}7\%$ легко випаленого магнезиту або вогнетривкої глини, зволожують і піддають вселенуванню. Формування цегли виконується на пресах. Після сушіння цегла випалюється при температурі $1550\text{-}1600\text{ }^\circ\text{C}$. Магнезитова цегла має темно-коричневий колір. Магнезитова цегла, володіючи високою вогнетривкістю (біля $2000\text{ }^\circ\text{C}$), не має достатньої міцності при високій температурі – температура деформації лежить в межах $1650\text{...}1700\text{ }^\circ\text{C}$. До того ж ця цегла при швидких змінах температури тріскається, а тому нагрів і охолодження печей з магнезитовою кладкою слід проводити особливо повільно. Руйнівній дії залізної окалини магнезитова цегла піддається важко, і тому якби не перешкождала їй висока вартість, для викладки череней нагрівальних печей.

Магнезит діє руйнуюче на шамот, тому при викладці магнезитової черені необхідно магнезитову цеглу відокремлювати від шамотних, нейтральним матеріалом, тобто таким, який не діє руйнуюче ні на магнезит, ні на шамот. Одним з таких матеріалів є хромиста цегла.

Хромисті і хромомагнезитові вогнетривкі матеріали.

Хромисті вогнетривкі матеріали виготовляються з хромистого залізняка (вміст Cr_2O_3 не менше 25%) з добавкою магнезійних високотривких матеріалів, а хромомагнезитові вогнетривкі матеріали – з розмолотого хромистого залізняка (Cr_2O_3 – $10\text{...}30\%$) і випаленого магнезиту (MgO – $30\text{...}70\%$).

Хромисті і хромомагнетитові вогнетривкі матеріали виготовляються у вигляді сирцю, а також із подальшим їх випаленням.

Карборундова цегла.

Карборунд (70,4% Si і 29,6% C) отримується із суміші чистого кварцу і коксу шляхом обробки її в електричній печі при температурі 1600 – 2000°C.

Приготована з карборунду цегла має високу вогнетривкість і міцність до температури 1700°C, але швидко руйнується в окислювальній атмосфері. Вироби з карборунду (цегла, плити і ін.) застосовують переважно в електропечах.

Талькова цегла.

Цю цеглу випилюють з природного талькового каменю, а потім піддають випаленню. Вогнетривкість талькової цегли біля 1600°C, розм'якнення настає при температурі 1350°C. Застосовується талькова цегла для кладки череней нагрівальних печей, викладений з неї під шлакостійкій і не піддається руйнівній дії залізної окалини.

Теплоізоляційні матеріали

Теплоізоляційні матеріали повинні мати низьку теплопровідність, достатню теплостійкість, невелику об'ємну масу і невисоку вартість.

В якості теплоізоляційних матеріалів застосовують азбест, шлакову і зольну засипку, легковагові вогнетривкі матеріали, теплоізоляційну цеглу, пінобетон і ін.

Теплоізоляційні матеріали у вигляді засипок (шлак і зола) доцільно застосовувати для ізоляції склепінь печей. Застосування засипок для стінок печі, як показала практика, не виправдало себе. Засипні ізоляції важче виконувати, вони ненадійні в експлуатації (висипаються і ін.).

Легковагові вогнетривкі матеріали

З легковагових вогнетривких матеріалів все більшого застосування набувають легковагові шамоти – пориста шамотна цегла, яка виготовляється трьома способами: хімічним, піношамотним і способом вигоряючих добавок.

При хімічному способі в якості початкового матеріалу застосовують суміш шамоту з невеликою кількістю вогнетривкої глини, доломіту (CaCO_3 , MgCO_3), сірчаної кислоти і гіпсу. Доломіт розкладається і виділяється вуглекислий газ, бульбашки якого, розподіляючись рівномірно у масі, роблять її пористою. Добавка гіпсу перешкоджає ущільненню маси в процесі сушки. Приготовлені з маси вироби сушать і випалюють при температурі 1300°C.

При піношамотному способі готується піномаса із шамоту, глини, води й емульсії каніфольного мила; остання і сприяє стійкому утворенню піномаси. Вироби отримують шляхом заливання піномаси у відповідні форми. Потім сушать вироби і випалюють при температурі 1300°C. Отримані таким способом вироби носять назву піношамотних.

Способом вигоряючих добавок вогнетривкі легковагові матеріали готуються із зволоженої суміші шамоту, глини і вигоряючих добавок (стружка, пробка, деревне вугілля, торф і ін.). Приготовані формуваннями виробу випалюють так само, як і звичайні шамотні виробу. При цьому добавки вигорають, утворюючи пористу будову виробів.

Для печей з невисокою температурою (не вище 1100°C) і для печей, в яких кладка не піддається значним механічним впливам (стиранню і ударом), легковагові вогнетривкі матеріали можуть цілком замінити звичайні вогнетривкі матеріали. Що стосується застосування легковагових вогнетривких матеріалів для зовнішнього шару пічної кладки, то це безумовно, доцільно для всіх печей заводів машинобудівної промисловості.

Для ізоляції стінок (особливо великих печей) недоцільно застосовувати легковагову цеглу з питомою вагою менше 700 кг/м³ (враховуючи потрібну міцність на стиснення); і тільки для ізоляції склепіння можна застосувати легковагові матеріали з меншою питомою вагою.

Застосування легковагових матеріалів сприяє не тільки зменшенню витрат тепла через кладку назовні при усталеній роботі печей, але й зменшує втрати від охолодження, а також час на розігрів печі в 2 – 4 рази. Це особливо важливо для печей, які працюють періодично, тобто з частими перервами.

До недоліків легковагових матеріалів слід віднести значне стирання, недостатню шлакостійкість, високу газопроникність і чутливість до струсів. Боротьба з вказаними недоліками може успішно проводитись за допомогою спеціальних захисних вогнетривких обмазок.

Захисні обмазки

Обмазки, окрім вогнетривкості і термічної стійкості, повинні мати хороше зчеплення з матеріалом, на який вони наносяться, і мати однаковий з ним коефіцієнт теплового розширення.

Для внутрішньої поверхні стінок печей, викладених з шамотної цегли, слід рекомендувати застосування обмазки наступного складу: 50 – 60 % шамоту, 50 – 40 % вогнетривкої глини і 4 – 5 % рідкого скла. Для стінок викладених з динасу, рекомендують обмазку наступного складу: 70 % - кварцового річного гіпсу, 14 % вогнетривкої глини, 10 % рідкого скла і 6 % азбесту. Нанесення обмазки виконується вручну або стисненим повітрям.

Зовнішня теплоізоляція.

Матеріали зовнішньої теплоізоляції стінок печей знаходяться в більш сприятливих умовах ніж вогнетривка кладка. Будучи на зовнішній поверхні вогнетривкої кладки печі, вони менше нагріваються, не піддаються руйнівній дії шлаків і ударів при завантаженні і вивантаженні заготовок з печі. Відповідно, основною вимогою до матеріалів для зовнішньої теплоізоляції є найменша теплопровідність при значно меншій вогнетривкості і міцності.

Ці матеріали застосовуються у вигляді цегли, плит і листів. Найбільш поширеним матеріалом для зовнішньої теплоізоляції є діатоміт і трепел. Діатоміт являє собою скупчення скелетів дрібних водоростей – діатомей, які складаються з SiO₂ і пронизаних мікроскопічними порами.

Трепел має той же склад, але з більш дрібніших скупчень. Ці матеріали застосовуються у вигляді засипки і цегли. Пористу діатомітову цеглу виготовляють способом вигоряючих добавок і піноспособом, і може застосовуватись до температури 900 – 950 °С.

Для зовнішньої теплоізоляції печей може застосовуватись також пінобетон у вигляді плит, які легко випилюються із будівельних блоків пінобетону. При викладці ізоляції з пінобетону необхідно залишати повітряний проміжок між кладкою печі і ізоляцією.

Кладка печей Розчини для кладки

Кладку печей виконують на спеціальних розчинах, основне призначення яких заповнювати шви кладки. Розчини по своїм властивостям і складу повинні бути однаковими з вогнетривкою цеглою або наближатися до нього.

Для приготування вогнетривких розчинів застосовують наступні матеріали:

шамотний порошок (шамот), товщина помелу 0,3...3 мм;

динасовий порошок, товщина помелу 0,3...3 мм;

кварцовий пісок, по можливості чистий, з товщиною зерна до 3мм;

вогнетривку глину невипалену, пластичну, щоб надати розчину в'язучих властивостей.

В таблиці 1 подано розчини для шамотної і динасової кладки.

Для інших кладок застосовують такі розчини і порошки:

1) для магнезитової кладки без розчину – магнезитовий порошок просіяний і просушений;

2) хромомагнезитової кладки – розчин, який складається з хромистого порошку – 90%, вогнетривкої глини 10%; при кладці без розчину – сухий хромистий або магнезитовий порошок;

3) для трепельної кладки – трепельний або шамотний розчин на вогнетривкій глині складу: трепельного або шамотного порошку 60 – 70%, глини 40 – 30%, а також цементно – трепельний розчин складу 1:5 (цемент: трепельний порошок).

4) розчин – цементно – глиняний такого складу: 1:1:5 (цемент: глина: пісок) або цементно – вапняний розчин складу: 1:2:9 (цемент: вапно: пісок).

Води від 400 до 600 л на 1 м³ сухої суміші в залежності від густоти розчину.

Таблиця 1 – Розчини для кладки печей

Назва і призначення розчину	Склад в об'ємних, %	Витрати сухої суміші води на 1 м ³ ВЛ
Густий шамотний розчин для бутової шамотної кладки. Товщина помелу до 3 мм.	Вогнетривкої глини 30% Кварцового піску 70%	400
Напівгустий шамотний розчин для звичайної шамотної кладки. Товщина помелу до 2 мм.	Вогнетривкої глини 30% Шамоту 40% Кварцового піску 30%	500
Рідкий шамотний розчин для щільної кладки/ Товщина помелу до 0,5мм	Кварцового піску 30%, вогнетривкої глини 40– 30%, Шамоту 60 – 70%	600
Напівгустий динасовий розчин для звичайної динасової кладки Товщина помелу до 2 мм.	Вогнетривкої глини 15 – 25, кварцового піску 75 – 85	500
Рідкий динасовий розчин для щільної динасової кладки Товщина помелу до 1 мм	Вогнетривкої глини 15 Динасового порошку 85	600

Фундамент печі звичайно викладається у вигляді плити товщиною від 250 до 500 мм, розміри фундаменту в плані дещо більші зовнішнього габариту печі. Малі печі і переносні встановлюються безпосередньо на бетонну підлогу цеху, яка має звичайно товщину 100 – 200 мм.

Товщина кладки

Кладка печей у процесі її роботи нагрівається нерівномірно: внутрішня її поверхня до більш високих температур, ніж зовнішня, що приводить до нерівномірної зміни її об'єму і виникненню внутрішніх напружень. Це одна з причин поступового руйнування кладки.

Стінки нагрівальних печей викладаються або цілком з шамотної цегли, або частіше, з зовнішнім шаром з теплоізоляційної цегли.

В першому випадку стінки викладаються товщиною в 1,5 – 2 вогнетривкої цегли, в другому – товщиною в 1 – 1,5 вогнетривкої цегли і 0,5 – 1 теплоізоляційної цегли. Більш товстою викладається та стінка, в якій робляться отвори для горілок (форсунок).

Склепіння звичайно викладається товщиною в цеглу з засипкою зверху золою або шлаком, чи кладкою теплоізоляційного шару. Для кладки черені в печах, які працюють при температурі вище 1100°С, необхідно застосовувати талькову або інші цегли, які важко піддаються руйнівній дії окалини.

При виборі товщини кладки необхідно враховувати режим роботи печі. При періодичній роботі печі з великими перервами не слід футерівку стінок роботи надто товстою для уникнення втрати тепла на акумуляцію кладки печі.

12. Використання тепла димових газів

З теплового балансу печі видно, що найбільш ефективним засобом підвищення тепловикористання в печах, а відповідно і економії палива, є використання тепла димових газів. Втрати тепла з димовими газами в камерних печах досягають 60% від тепла палива, що спалюється, тому що вони залишають робочу камеру печі з температурою 1100...1400 °С, тобто на 50...100 °С вище кінцевої температури нагрівання металу, що значно знижує к.к.д. печі.

Велика втрата тепла в печах пояснюється тим, що в них використовується тільки та частина тепла, яка віддається паливом у межах, які лежать вище температури димових газів, обумовленої вимогами технологічного процесу. Тепло димових газів використовується на попередній підігрів повітря, що надходить для горіння, і газоподібного чи рідкого палива, чи того й іншого разом, а також на попередній підігрів металу. Крім того, тепло димових газів може бути використане і далі: у котлах-утилізаторах і водонагрівачах.

Рекуператори

Рекуператор є пристроєм неперервної дії, у якому нагрів повітря від димових газів відбувається через поділяючу їхню стінку. Наприклад, холодне повітря пропускається по трубах, що із зовнішньої сторони обігриваються димовими газами, які ідуть з печі. Таким чином, у рекуператорах теплопередача від одного середовища, більш нагрітого, до іншого, менш нагрітого, здійснюється безперервно через стінку, що розділяє ці середовища.

Залежно від температури підігріву повітря застосовують металеві чи керамічні рекуператори; металеві (сталеві і чавунні) – для підігріву повітря до температури 600–800 °С, а керамічні (шамотні карборундові й ін.) – для підігріву повітря до температури 600–1000 °С.

Керамічні рекуператори громіздкі і недостатньо герметичні, а тому застосовуються переважно у великих печах для підігріву повітря до температури вище 600 °С.

При підігріві повітря в металевих рекуператорах до температур не вище 350–400° С елементи їх виготовляють із сірого чавуну й вуглецевої сталі. При більш високих температурах підігріву повітря (чи газу) елементи рекуператорів виготовляють з жароміцних сплавів.

З жароміцних чавунів застосовують хромистий чавун з вмістом до 30% Cr і до 6,5% Si .

Для підвищення теплотривкості рекуператорних елементів з вуглецевої сталі в деяких випадках застосовують насичення їхньої поверхні алюмінієм (алітування), що значно знижує окислення сталі, підвищуючи термін роботи рекуператора. Для збільшення терміну служби рекуператорів необхідно передбачати правильний напрямок потоків повітря і димових газів, що виключає місцеві перегріву, які призводять до короблення і прогару елементів рекуператора. Необхідно також обмежувати температуру димових газів перед рекуператором до величини, безпечної для елементів рекуператора, шляхом подачі холодного повітря для охолодження димових газів у каналі перед рекуператором.

Завдяки високому коефіцієнту теплопередачі металеві рекуператори компактні, що дозволяє встановлювати їхній не тільки в підчереневій камері печі, але й над піччю й у димоході. Велика герметичність металевих рекуператорів, особливо зі зварними елементами, дозволяє застосовувати їх для підігріву газу. Крім того, металеві рекуператори можна з успіхом застосовувати в печах з низькою температурою димових газів, що відходять, (500...600 °С), що розширює область їхнього застосування.

Недолік металевих рекуператорів – їхня недовговічність і висока вартість при виготовленні з жароміцних металів.

Сьогодні найбільш поширені наступні конструкції металевих рекуператорів: трубчасті, голчасті, термоблоки і радіаційні.

Трубчасті рекуператори. На рис. 14. показаний трубчастий рекуператор, встановлений у димоході печі. Кінці труб рекуператора уварені в дірчасті плити, що є днищами повітряних колекторів. Через один колектор підводиться холодне повітря, а через інший колектор відводиться гаряче повітря з труб рекуператора.

У тих випадках, коли димові гази видаляються з печі через робоче вікно, трубчастий рекуператор доцільно встановлювати між передньою стінкою і фронтним щитком-екраном печі. Такий трубчастий рекуператор складається з великої кількості дугоподібних труб діаметром 30...35 мм. Кінці труб приєднані до колекторів. Через колектор 1 підводиться холодне повітря, а через колектор 2 відводиться підігріте повітря, що надходить далі до пальників (форсунок).

При такому розташуванні рекуператора можна установити велику кількість труб, що збільшує поверхню його нагрівання; наприклад, у печі з площею черені 2,3 м² встановлюється рекуператор з поверхнею нагрівання 6,0 м². Рекуператори такої конструкції досить стійкі і, за даними заводів, можуть стояти без ремонту понад рік.

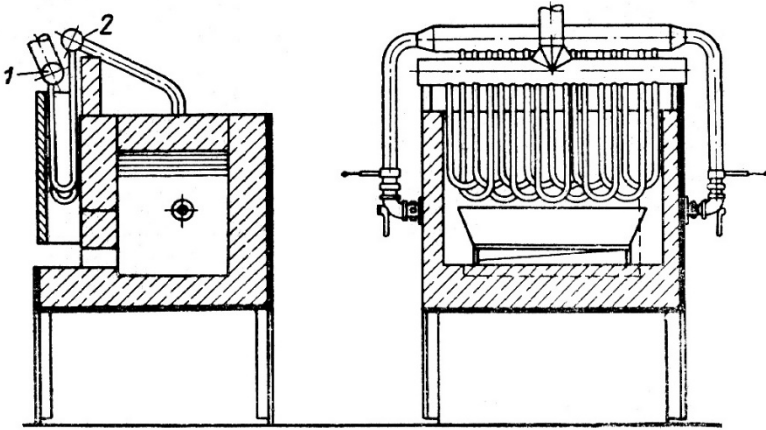


Рис. 14. Трубчастий рекуператор

Завдяки високій газощільності трубчасті рекуператори застосовують і для підігріву компресорного повітря. На рис. 15. показане встановлення двох трубчастих рекуператорів у каналах підчеренової кладки камерної печі для підігріву повітря до форсунок і стиснутого повітря до молота.

Рекуператор 1 використовується для підігріву компресорного повітря, що живить молот цеху, а рекуператор 2 – для підігріву вентиляторного повітря. Труби рекуператорів відділені від безпосереднього омивання димовими газами вогнетривкими стінками 3, що надійно зберігає рекуператори від прогару.

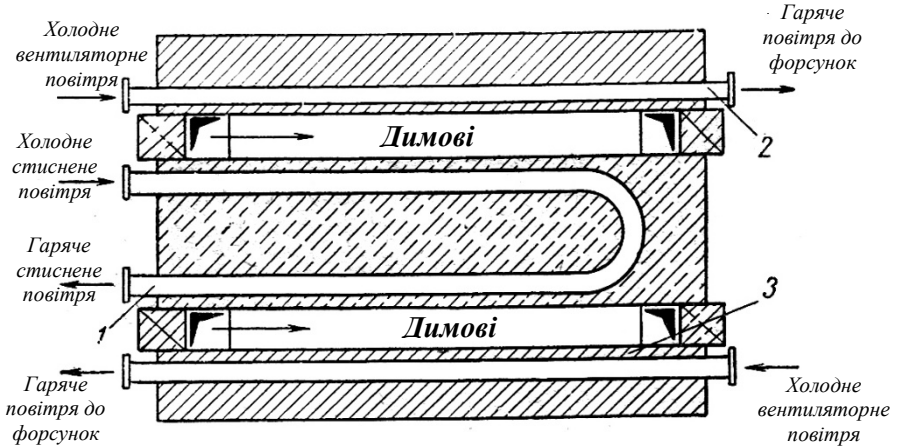


Рис. 15. Встановлення двох трубчастих рекуператорів у каналах підчеренової кладки камерної печі

На рис. 16. показаний ребристий рекуператор, установлюваний над піччю. Рекуператор складається з чавунної ребристої труби 1, через яку відводяться димові гази, поміщеної в циліндричному чавунному кожусі 2. Холодне повітря від вентилятора надходить через патрубок 3 у простір між кожухом і ребристою трубою, обтікає нижню частину рекуператора, яка більше нагрівається, піднімається нагору між ребрами і через патрубок 4 виходить з рекуператора.

Ребра на трубі збільшують поверхню нагріву рекуператора, завдяки чому коефіцієнт теплопередачі в ребристого рекуператора (віднесений до гладкої труби) вищий, ніж у рекуператора з гладкими трубами. Рекуператор призначений для невеликих печей і особливо зручний для печей, що працюють на твердому паливі і вугільному пилу, тобто коли димові гази сильно запилені. Підігрів повітря в рекуператорах із гладких труб і ребристих рекуператорів досягає температури 150...250 °С.

Рекуператори з гладких труб прості у виготовленні, недорогі, труби, що прогоріли в них, легко доступні для заміни. Звичайно трубчасті рекуператори виконуються суцільнозварними, а тому вони є газошільними і можуть застосовуватися для підігріву газу. Трубчасті рекуператори особливо зручні для великих нагрівальних печей, де термоблоки і голчасті рекуператори встановлювати недоцільно; перші внаслідок їхньої громіздкості, а другі тому, що при великих розмірах у них знижується газошільність.

Голчасті рекуператори. Основним елементом голчастого рекуператора є чавунна голчаста труба (Рис. 17.) овальної перетину з зовнішніми і внутрішніми голками (чи тільки внутрішніми) обтічної форми. Повітря проходить усередині труби, а димові гази обігрівають трубу ззовні. З таких труб і монтується рекуператори. Перевагою голчастого рекуператора є велика поверхня нагріву і можливість збирання рекуператорів різного розміру з обмеженої кількості типових елементів.

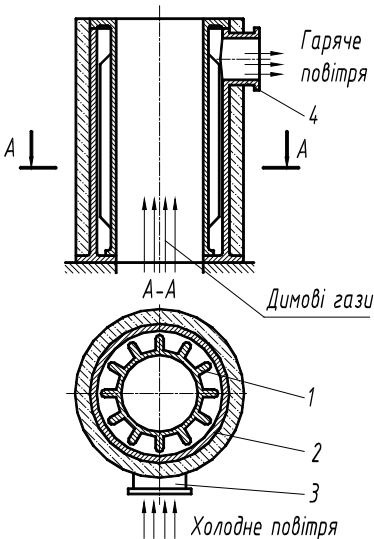


Рис. 16. Ребристий рекуператор

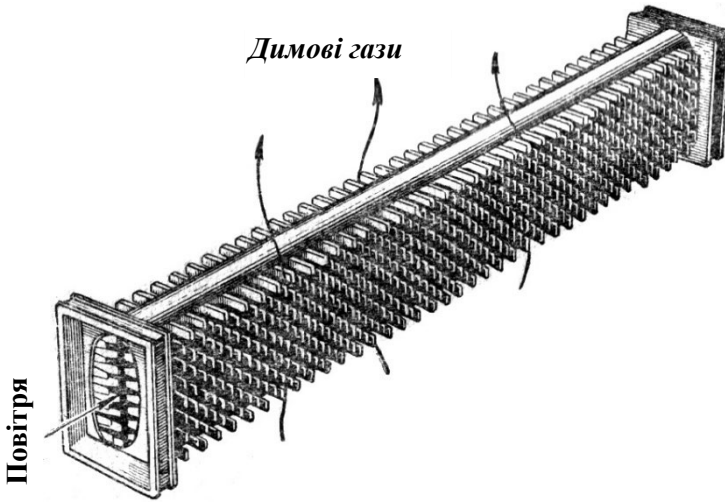


Рис. 17. Голчастий рекуператор

Великі рекуператори монтуються на місці встановлення з окремих секцій, зібраних з типових голчастих труб. Застосовують три типи голчастих труб з відстанню між голками на повітряній стороні всіх труб 14 мм.

1. Труби типу 17,5 з голками на повітряній і димовій сторонах 1 відстанню між голками на димовій стороні 17,5 мм. Призначені для рекуператорів, що встановлюються на печах, які працюють на чистому газі.

2. Труби типу 28 з голками на повітряній і димовій сторонах і відстанню між голками на димовій стороні 28 мм. Призначені для рекуператорів, що встановлюються на печах, які працюють на неочищеному газі і мазуті.

3. Труби з обтічними голками на повітряній стороні і з гладкої (без голок) димовою стороною (односторонньо-голчасті). Призначені для рекуператорів, установлюваних на печах, димові гази яких сильно забруднені пилом, наприклад, що працюють на пиловугільному паливі. Односторонньо-голчасті труби при інших однакових умовах більш теплотривкі, ніж труби з голками на обох сторонах.

Голчасті труби всіх трьох типів виготовляються такої довжини: 880, 1135, 1385 і 1640 мм. Характеристика голчастих труб наведена в табл. 2.

Зібрана з декількох труб секція (блок) рекуператора, через яку повітря проходить тільки один раз, не змінюючи напрямку, називається “ходом”. Вибір числа “ходів” голчастого рекуператора визначається тиском дуття повітря і температурою підігріву повітря.

Таблиця 2

Довжина труби, мм	Умова поверхня для розрахунку теплопередачі без врахування голок, мм	Вільний перетин у м ²				Вага в кг		
		Для проходу повітря	Для проходу димових газів (тип 17,5)	Для проходу димових газів (тип 28)	Для проходу димових газів в односторонньо-голкових трубах	Труб тип 17,5	Труб тип 28	односторонньо-голкових труб
880	0,25	0,008	0,06	0,07	0,042	46	41	31
1135	0,33	0,008	0,08	0,092	0,055	57	52	39
1385	0,425	0,008	0,10	0,114	0,067	68	63	47
1640	0,50	0,008	0,12	0,136	0,080	80	76	55

Одноходовий голчастий рекуператор забезпечує підігрів повітря до 150...200° С. Частіше застосовується двоходовий рекуператор, у якому досягається підігрів повітря до 300...400° С при температурі димових газів перед рекуператором 750...800° С. При підігріві повітря понад 400° С установлюється чотириходовий рекуператор. При виборі “ходів” рекуператора необхідно враховувати, що опір для проходу повітря через рекуператор збільшується прямо пропорційно числу ходів, отже, застосування багатогодового рекуператора вимагає підвищеного тиску дуття. Рекуператори встановлюються над піччю і в димоході. Для меншого засмічення доцільно голчастий рекуператор установлювати так, щоб потік димових газів проходив через нього вертикально. Крім того, рекуператор повинний бути легко доступний для чищення і ремонту.

Для невеликих печей найбільш зручним є рекуператор голчастий малий з голчастою трубою довжиною 1130 мм. Ці рекуператори роблять з однієї, двома і трьома голчастими трубами однакової конструкції.

Основним недоліком голчастих рекуператорів є недостатня герметичність, що збільшується зі збільшенням труб у блоці.

Голчасті рекуператори доцільно застосовувати в напівметодичних печах, що працюють з відносно невисокою температурою димових газів, що відходять, (700-1100° С).

Рекуператор “Термоблок”, (Рис. 18.) – чавунний виливок із залитими в неї двома пучками сталевих труб. Пучки труб, якими проходять повітря і димові гази, розташовані у взаємоперпендикулярних напрямках. Діаметр

труб у повітряному пучку 12...18 мм і в пучку для димових газів 25...30 мм. У такому монолітному блоці рекуператора забезпечується надійне розз'єднання димових газів і середовища, яке нагрівається, що дає можливість підігрівати в термоблоці і газ. З метою спрощення конструкції термоблоку його іноді відливають з одним пучком труб для проходження повітря, а для димових газів у виливку роблять канали між рядами труб перпендикулярно руху повітря; розмір каналів 30x100 мм. У термоблоці вагою 200...250 кг можна підігріти 250...300 м³/год повітря до температури 200...250 °С.

Для підвищення температури і кількості повітря, що підігрівається, застосовують двоходові збірні термоблоки. На рис. 19. показаний елемент однієї з конструкцій такого термоблоку, у якому повітря проходить через залиті в елементі дугоподібні труби 1 діаметром 19...25 мм. Кінці труб уварені в два колектора 2 і 3 діаметром 102 мм. Для проходження димових газів у виливку елемента зроблені канали 4 перетином 30 x 108 мм. Такі ж канали утворюються між двома поруч розташованими елементами завдяки наявності на бічних стінках елементів припливів 5 висотою 15 мм.

Рекуператор “Термоблок” не застосовують для великих печей унаслідок великої ваги. Установлюють його звичайно над піччю.

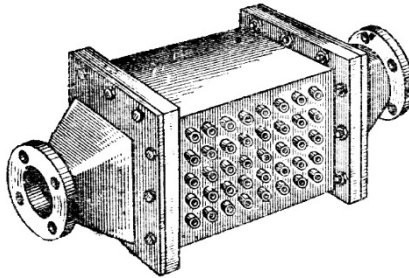


Рис. 18. Рекуператор “Термоблок”

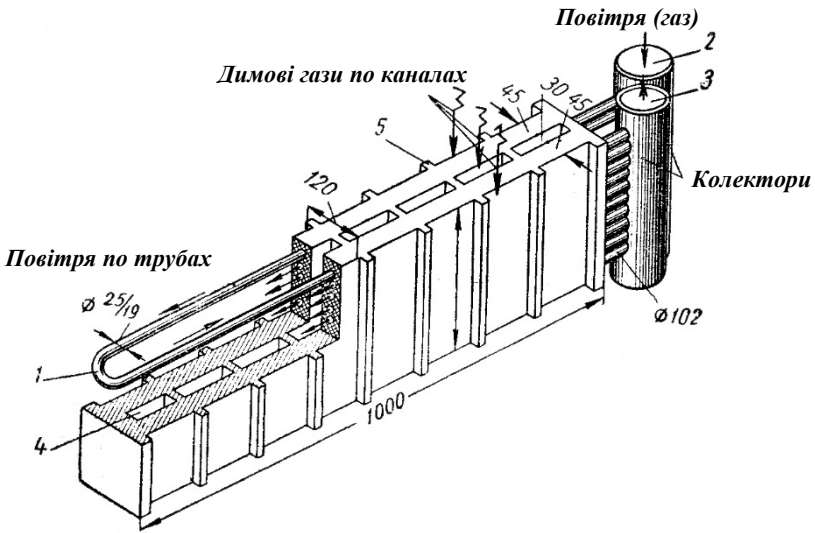


Рис. 19. Двоходовий збірний термоблок

Радіаційні рекуператори набувають усе більшого застосування. У найбільш простому конструктивному оформленні (Рис. 20.) такий рекуператор складається з двох труб 1 і 2, зварених з листів жароміцної сталі товщиною 4...6 мм. Труба меншого діаметра концентрично розташована в трубі більшого діаметра. По внутрішній трубі 1 проходять димові гази, а по кільцевому просторі між трубами проходить повітря, що нагрівається, зі швидкістю 0,25...0,5 м/с. Ширина кільцевого простору робиться від 10 до 70 мм, а діаметр внутрішньої труби від 0,3 до 1,6 м. На кінцях рекуператора розташовані коробки 3 і 4, через одну з яких підводиться в рекуператор холодне повітря, а через іншу відводиться нагріте повітря. Рівномірний розподіл повітря по кільцевій щілині рекуператора досягається тангенціальним підведенням повітря в коробки рекуператора. З цієї ж метою, а також і для

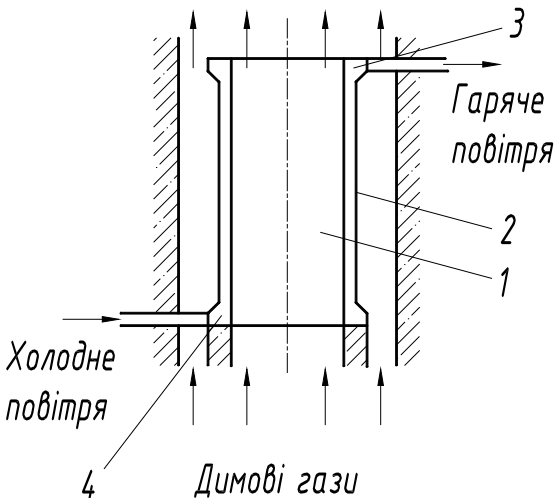


Рис. 20. Радіаційний рекуператор

З цієї ж метою, а також і для

збільшення поверхні теплопередачі рекуператора в кільцевій щілині (між трубами) установлюють направляючі перегородки (ребра). Основна перевага радіаційного рекуператора перед іншими полягає в його підвищеній стійкості при підігріві повітря до 800 °С і вище. Високотемпературний підігрів повітря в радіаційних рекуператорах досягається завдяки великому тепловому навантаженню поверхні теплообміну. У конвективних рекуператорах інтенсивність теплообміну складає 12...16 тис. ккал/м²-год, а в радіаційних підвищується до 50- 80 тис. ккал/м². Пояснюється це тим, що димові гази проходять у рекуператорі по каналі великого перетину, тобто газовий потік має велику товщину, а відомо, що чим більша товщина газового потоку і вище його температура, тим вища теплопередача випромінюванням (радіацією).

Тепловіддачі в радіаційному рекуператорі сприяє також випромінювання футеровки і димових газів рекуператорної камери.

Вибір рекуператора і місця установки його

Ефект роботи рекуператорних печей багато в чому визначається правильним вибором рекуператора і місця його установки. Вибір рекуператора визначається насамперед розмірами печі, її конструктивними особливостями, що визначають місце установки рекуператора, температурою нагрівання повітря і видом палива, що спалюється.

Для невеликих печей (плавильних і нагрівальних) при установці рекуператора над піччю доцільно застосовувати чавунний ребристий рекуператор і термоблок. Простим і зручним рекуператором для установки в підчереневій камері печі чи в димовому каналі є трубчастий рекуператор.

Місце установки рекуператора визначається системою відводу димових газів з печі. При відводі їх по каналах у стінках печі нагору рекуператор установлюється над піччю. У тих випадках, коли димові гази видаляються з печі через робоче вікно, рекуператор (трубчастий) доцільно встановлювати між передньою стінкою і фронтним щитком печі. При більш досконалій системі відводу димових газів униз по підземному димоході рекуператор встановлюється в підчереневій камері печі чи в димоході.

Для одержання бажаного ефекту від установки рекуператора важливим є не тільки правильний вибір його конструкції і місця установки, але і якість обслуговування, останнє є вирішальним для нормальної роботи рекуперативних печей. В усіх випадках установки рекуператорів необхідна ретельна теплоізоляція відкритих частин рекуператора і повітрепроводів, що підводять нагріте повітря до форсунок (пальників).

13. Індукційний нагрів основи індукційного нагріву

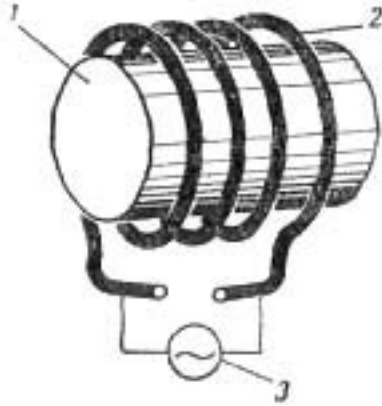


Рис. 21. Схема індуктора з заготовкою, що нагрівається: 1 – заготовка, що нагрівається; 2 – спіраль індуктора; 3 – генератор струму високої частоти.

Сутність індукційного нагріву полягає в тому, що металева заготовка, поміщена в змінне магнітне поле, нагрівається за рахунок джоулевого тепла, що виникає в ній унаслідок індуктованих вихрових струмів.

Як джерела змінного магнітного поля при індукційному нагріві застосовуються пристрої, які називаються індукторами.

Індуктор (Рис. 21.) є, власне кажучи, соленоїдом, по якому пропускається змінний струм. Усередину індуктора поміщається заготовка, що нагрівається. Вона виконує роль сердечника. При пропусканні по обмотці індуктора змінного струму виникає магнітне поле індукції, під впливом якого в заготівлі індукуються вихрові струми (струми Фуко), що замикаються в площинах,

перпендикулярних до вектора магнітної індукції, викликають нагрівання заготівлі.

Характерною рисою індукційного нагріву є той факт, що все необхідне для нагрівання заготовки тепло виникає в самій заготівці. Ця обставина вигідно відрізняє метод індукційного нагріву від інших методів, дозволяючи збільшити швидкість нагріву і тим самим різко скоротити втрати за рахунок випромінювання.

Іншими позитивними факторами, що вигідно відрізняють метод індукційного нагріву, є:

- 1) майже повна відсутність окалини, що забезпечує економію металу і впровадження в практику прогресивних технологічних процесів;
- 2) стабільність режиму нагрівання, що дозволяє автоматизувати процеси нагріву заготовок і подальшу їхню обробку;
- 3) відсутність зневуглецелення поверхонь заготовок, що нагріваються, і збереження механічних властивостей металу;
- 4) зменшення необхідної виробничої площі і значне полегшення праці робітників;

5) висока швидкість нагрівання, що дозволяє в значній мірі підвищувати продуктивність нагрівальних пристроїв і зв'язувати їхню роботу безупинним циклом з кувальними, прокатними та іншими механізмами.

До недоліку індукційного нагріву варто віднести необхідність перетворення електричного струму, що приводить до значних втрат енергії (до 30%).

Основи розрахунку індукційних нагрівальних пристроїв

Зміст розрахунку. Розрахунок індукційних нагрівальних пристроїв зводиться до визначення потужності і типу генератора, розмірів і числа витків індуктора, перетину трубки індуктора, а також реактивної потужності і кількості банок конденсаторів. Вихідними даними для розрахунку є матеріал і розміри заготовок, що підлягають нагріванню; температура, до якого повинна нагріватися заготівля; продуктивність технологічного обладнання.

Розглянемо більш докладно порядок розрахунку багатовиткового циліндричного і квадратного індукторів, найбільш розповсюджених у виробництві.

Вибір типу генератора. Вибір типу генератора, призначеного для харчування індуктора, виконується з урахуванням необхідної частоти струму I і орієнтованого значення потужності P_z , що забезпечує нагрівання заготівель у заданий час t .

Типом обраного генератора обумовлюється напруга V , подаване на індуктор. Значення V служить одним з основних параметрів при подальшому розрахунку індуктора.

Частота струму при виборі генератора визначається з умови забезпечення максимального значення к. к. д. нагрівального пристрою. Найбільше значення к. к. д. індуктора для циліндричних заготівель досягає при відношенні діаметра заготівлі D до глибини проникнення струму δ , рівному 3–8.

При відомому співвідношенні D/δ оптимальна частота визначається з рівняння (1), вирішеного відносно f

$$f = \frac{503^2 \rho}{\mu_r \delta^2}, \quad (1)$$

де ρ – питомий електричний опір;

μ_r – магнітна проникність.

У випадку нагрівання сталевих виробів значення ρ і μ_r вибираються з урахуванням максимальної заданої температури заготовок.

Орієнтоване значення потужності генератора P_2 визначається за формулою

$$P_2' = WG \text{ кВт}, \quad (2)$$

де W -орієнтоване значення питомої витрати енергії, затрачуваної для нагрівання 1 кг металу (практикою встановлено, що $W \approx 0,4 \dots 0,5$ кВт·год/кг);

G – вага металу, що нагрівається індуктором протягом години; визначається за формулою

$$G = gn \text{ кг}, \quad (3)$$

де g – вага однієї заготовки, кг;

n – кількість заготовок, що нагріваються в індукторі протягом години.

Необхідно відмітити, що при наступному розрахунку індуктора значення потужності генератора уточниться, що може привести до заміни типу генератора, обраного на підставі міркувань, наведених раніше.

Внутрішній діаметр спирали індуктора. Внутрішній діаметр спирали індуктора $D_{U_{\min}}$ визначається за формулою

$$D_{U_{\min}} = D_3 + \Delta_n + 2\Delta_m + \Delta_e + h_n, \quad (4)$$

де D_3 – діаметр заготівлі;

Δ_n – величина повітряного зазору між заготівлею і тепловою ізоляцією;

Δ_m – товщина теплової ізоляції;

Δ_e – товщина електричної ізоляції;

h_n – висота напрямних для переміщення заготівлі в індукторі.

Величина повітряного зазору і товщина теплової ізоляції в значною мірою впливають на електричний к. п. д. нагрівального пристрою. Зі збільшенням повітряного зазору і товщини теплової ізоляції електричний к. п. д. різко падає. У той же час зменшення товщини теплової ізоляції призводить до перегріву індуктора і зменшенню термічного к. к. д.

Практикою експлуатації індукційних нагрівачів встановлено, що найвигідніше співвідношення між електричним і термічним к. к. д. має місце при товщині шару теплової ізоляції 10–25 мм.

Шар товщиною 25 мм звичайно застосовується в індукторах, призначених для нагрівання заготівель діаметром 50 мм і більш. При нагріванні заготівель діаметром менш 50 мм допускається зменшення шару теплової ізоляції до 15 і навіть 10 мм.

Що стосується повітряного зазору, то практикою встановлено, що його величина Δ_n повинна бути не менше 2 мм. При меншому повітряному зазорі можливі механічні ушкодження теплової ізоляції індуктора.

Товщина електричної ізоляції береться при розрахунку рівної 2 мм (товщина міканітової гільзи). Висота направляючих, використовуваних для захисту теплової ізоляції від механічних ушкоджень, звичайно не перевищує

4...6 мм. З урахуванням наведених вище міркувань формула (4) набуде вигляду

$$D_{U_{\min}} = D_3 + (30...60 \text{ мм}) \quad (5)$$

У випадках, коли той самий індуктор передбачається використовувати для нагріву заготовок різного перетину, внутрішній діаметр спіралі варто розраховувати, виходячи з найбільшого перетину заготовки. Нагрівання в такому індукторі заготовок меншого діаметра неминуче приведе до зниження к. к. д. установки. Однак у практиці вважають доцільним використовувати один індуктор для нагрівання заготовок різного перетину за умови, якщо при перерахуванні на найбільш невідгідний випадок нагрівання к. к. д. індуктора буде більше чи рівний 50%.

Довжина індуктора

Довжина індуктора залежить від призначення нагрівального пристрою і визначається розмірами заготовок, часом їх нагріву і іншого технологічного обладнання.

При розрахунку індуктора періодичної дії довжина його визначається за формулою:

$$\Delta l = l_3 + \Delta l, \quad (6)$$

де l_3 – довжина заготовки, або тієї її частини, що нагрівається;

Δl – величина, яка враховує вплив крайового ефекту.

Довжина індуктора методичної дії бути визначена за формулою:

$$l_u = n l_3 + \Delta l, \quad (7)$$

де n – число заготовок, що одночасно нагріваються в індукторі.

Для визначення довжини індуктора з неперервним рухом заготовки можна користуватись формулою:

$$l_u = V t_n + \Delta l, \quad (8)$$

де V – швидкість переміщення заготовки в індукторі;

t_n – час, який необхідний для нагріву заготовки до заданої температури.

У формулах (6)–(8) величина Δl , яка враховує вплив крайового ефекту, звичайно береться рівною 1...1,5 діаметра індуктора.

У формулі (7) число заготовок n визначається:

$$n = \frac{t_n}{t_k}, \quad (9)$$

де t_k – інтервал часу, через який нагріті заготовки повинні подаватись до іншого технологічного обладнання.

Якщо в результаті розрахунку за формулами (7), (8) довжина індуктора вийде більше 1 м, слід використовувати декілька індукторів, які працюють паралельно (багатопотокова система). Довжина кожного індуктора в цьому випадку може бути скорочена порівняно з розрахунковою у стільки разів, скільки буде збільшено кількість індукторів. Використання для нагріву

заготовок індукторів з довжиною більш ніж 1м недоцільно через складність конструкції і незручність експлуатації.

Число витків індуктора

Число витків індуктора визначається:

$$\omega = \frac{U}{z'} \sqrt{\frac{R'_e}{P_u}}, \quad (10)$$

де U – напруга генератора;

z' – повний опір індуктора, віднесений до одного витка;

R'_e – еквівалентний активний опір індуктора віднесений до одного витку;

P_u – електрична потужність, що підводиться до індуктора.

Повний опір індуктора, віднесений до одного витка:

$$z' = \sqrt{(R'_e)^2 + (X'_e)^2}, \quad (11)$$

де R'_e і X'_e – еквіваленти активні і реактивні опори віднесені до одного витку.

В свою чергу R'_e і X'_e можуть бути визначені:

$$R'_e = R'_1 + R'_2 \text{ Ом}; \quad (12)$$

$$X'_e = X'_1 + X'_2 \text{ Ом}. \quad (13)$$

Де R'_1 і X'_1 – активний і реактивний опори індуктора, віднесені до 1 витку

R'_2 і X'_2 - активний і реактивний опори, які вносяться заготовкою, що нагрівається, і також віднесені до одного витка.

$$R'_1 = \rho_1 \frac{\pi D_{u_{\min}}}{l_u \delta_1} \text{ Ом}; \quad (14)$$

$$X'_1 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_{u_{\min}}^2}{l_u} k_1 \text{ Ом}; \quad (15)$$

$$R'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_3^2}{nl_3} A\beta \text{ Ом}; \quad (16)$$

$$X'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_3^2}{nl_3} (1-B)\beta k_2 \text{ Ом}, \quad (17)$$

де $D_{u_{\min}}$ і D_3^2 – внутрішній діаметр спіралі індуктора і діаметр заготовки;

l_u і l_3 – довжина індуктора і заготовки;

ρ_1 – питомий електричний опір матеріалу спіралі індуктора;

δ_1 – глибина проникнення струму в матеріал спіралі індуктора;

f – частота струму;

n – кількість заготовок, які одночасно нагріваються.

K_1, K_2 і β – коефіцієнти, які вносять поправки при розрахунках складових опорів індуктора.

При $\ell_u / Du_{\min} \geq 5$ коефіцієнти K_1, K_2 і β беруться рівними 1.

При $\ell_u / Du_{\min} < 5$ коефіцієнти K_1, K_2 і β можуть приблизно визначатись за формулами:

$$k_1 = 0,97 - 0,29 \frac{Du_{\min}}{l_u}; \quad (18)$$

$$k_2 = 0,97 - 0,29 \frac{D_3}{l_3}; \quad (19)$$

$$\beta = k_m^2 \frac{1 + A^2}{k_2^2 + A^2}. \quad (20)$$

Коефіцієнти A і B , які входять у формули (16), (17), (20) є функціями відношення діаметра заготовки до глибини проникнення в неї струму.

Визначення P_u .

Електрична потужність P_u , яка підводиться до індуктора:

$$P_u = \frac{P'_3}{\eta_e \eta_m} \text{ кВт}, \quad (21)$$

де P'_3 – корисна потужність, необхідна для нагріву заготовок до заданої температури

η_e – електричний к.к.д. індуктора;

η_m – термічний к.к.д. індуктора.

Корисна потужність знаходиться за формулою:

$$P'_3 = \frac{C(T_k - T_n) Gn}{0,24t_n} \text{ кВт}, \quad (22)$$

де C – теплоємність заготовки, що нагрівається в ккал/кг $^{\circ}\text{C}$;

T_k – задана температура нагріву заготовки в $^{\circ}\text{C}$;

T_n – початкова температура заготовки;

G – маса однієї заготовки, або її частини, що нагрівається в кг;

t_n – час нагріву заготовки в с при частоті струму генератора f ;

n – число заготовок, які одночасно нагріваються в індукторі.

Електричний к.к.д. визначається відношенням:

$$\eta_e = \frac{R'_2}{R'_e}. \quad (23)$$

Термічний к.к.д. знаходиться з виразу:

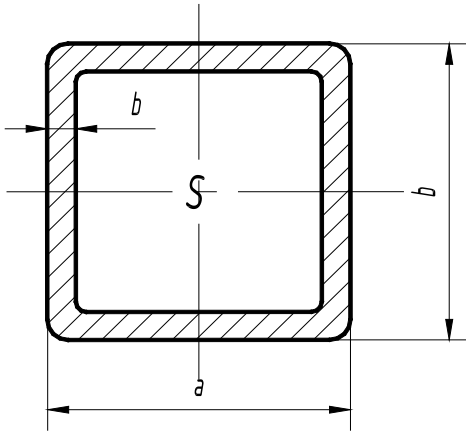


Рис.22. Схема поперечного перерізу трубки спіралі індуктора.

$$\eta_m = \frac{P'_3}{P'_3 + P_\phi}, \quad (24)$$

де P_ϕ – електрична потужність, яка необхідна для компенсації теплових втрат через футерівку;

P_ϕ визначається за формулою:

$$P_\phi = \frac{2\pi l_\phi \lambda}{860 \ln \frac{D_{\phi 1}}{D_{\phi 2}}} (T_2 - T_1) \text{ кВт}, \quad (25)$$

де l_ϕ – довжина футерівки в м, рівна довжині індикатора l_u ;

λ – коефіцієнт теплопровідності футерівки;

$D_{\phi 1}$ і $D_{\phi 2}$ – зовнішній і внутрішній діаметр футерівки (при розрахунку звичайно береться $D_{\phi 1} = D_{u \min}$, $D_{\phi 2} = D_3$);

T_2 і T_1 – температура зовнішньої і внутрішньої поверхні футерівки (при розрахунку звичайно приймається $T_2 = T_k$ і $T_1 = 60^\circ \text{C}$, що відповідає температурі трубки індуктора).

Розміри трубки спіралі індуктора

При визначенні розмірів трубки спіралі індуктора розраховуються: ширина трубки a (Рис.22.), товщина стінки трубки b , площа отвору трубки δ_1 , щільність струму в спіралі індуктора і при відомому перерізі трубки.

Ширина трубки індуктора визначається за формулою:

$$a = \frac{l_u k_3}{\omega + 1} \text{ мм}, \quad (26)$$

де ω – число

k_3 – коефіцієнт заповнення, який враховує наявність ізоляція між витками, при розрахунку величина k_3 береться рівною 0,8...0,9.

Товщина стінки трубки визначається з виразу:

$$b = 1,3 \dots 1,4 \delta_1 \text{ мм}, \quad (27)$$

де δ_1 – глибина проникнення струму в матеріал спіралі редуктора в мм. Площа отвору трубки розраховується за формулою:

$$S = \frac{P_u (1 - \eta_e \eta_m)}{4,18 V_e (T_1 - T_0)}, \quad (28)$$

де P_u – потужність, яка підводиться до індуктора;

V_e – швидкість руху води в спіралі індуктора в м/с (у випадку використання для охолодження індуктора води з водопровідної мережі V_e береться рівною 1...1,5 м/с);

T_1 і T_0 – температура вхідної і вихідної води (звичайно приймається $T_0 = 15...20$ °C, $T_1 = 60$ °C).

Висота трубки індуктора визначається за формулою:

$$h = \frac{S}{a - 2b} + 2b. \quad (29)$$

Якщо в результаті розрахунку h вийде, що висота трубки в 1,5...2 рази більше її ширини, доцільно переходити до використання декількох гілок охолодження, відповідно зменшуючи при цьому висоту трубки.

Визначення щільності струму в спіралі індуктора виконується за формулою:

$$i = \frac{I_u}{a \delta_1} \text{ A/мм}^2, \quad (30)$$

де I_u – струм індуктора в амперах рівний $U/\omega^2 z'$.

При водяному охолодженні значення i не повинно перевищувати 150 А/мм².

Реактивна потужність конденсаторної батареї і кількість банок конденсатора.

Реактивна потужність конденсаторної батареї P_c визначається за формулою:

$$P_c = \frac{P_u}{\cos \varphi} \text{ кВА}, \quad (31)$$

$$\text{де } \cos \varphi = \frac{R'_e}{z}. \quad (32)$$

Кількість банок конденсатора n_c знаходиться із співвідношення:

$$n_c = \frac{P_c}{P_{c1}}, \quad (33)$$

де P_{c1} – реактивна потужність однієї банки конденсатора.

14. Контактний електронагрів

Під контактним нагріванням розуміють електронагрів заготовки, послідовно включеної в ланцюг електричного струму, як показано на рис. 23.

При проходженні струму по заготовці електричні заряди, що рухаються в ній, зіштовхуються з атомами речовини і віддають їм частину своєї електричної енергії. У результаті таких зіткнень атоми починають коливатися з більшою інтенсивністю, що призводить до підвищення температури заготовки.

Контактне нагрівання має всі переваги електронагріву і є особливо ефективним при нагріванні пруткового матеріалу з діаметром до 70 мм і відношенням довжини l до квадрату діаметру d^2 не менш 1. У цьому випадку контактне нагрівання вигідніше індукційного, тому що відбувається з більшою швидкістю і з меншою витратою електроенергії і вимагає менших капітальних витрат. Однак при нагріванні заготівель з діаметром більше 70 мм і при відношенні l/d^2 заготовки, що нагрівається, менше одиниці контактне нагрівання поступається індукційному. Розглянемо більш докладно процеси, що відбуваються в заготівлі при контактному нагріванні.

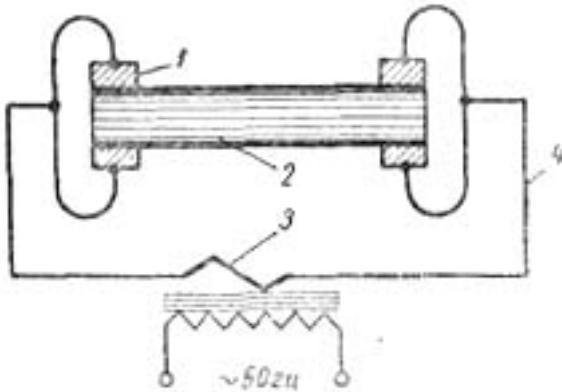


Рис. 23. Схема установки контактної нагрівки:
1 – контакти; 2 – заготовка, що нагрівається;
3 – силовий трансформатор; 4 – підвідні шини.

Проходження змінного струму через заготовку, що нагрівається

Теплова дія струму, що проходить по провіднику (заготівки, що нагрівається), визначається з відомого закону Джоуля-Ленца, математичне вираження якого має вигляд:

$$Q = I^2 R t \text{ Дж}, \quad (34)$$

де Q – кількість тепла, що виділилося в провіднику при проходженні по ньому струму;

A – робота електричного струму в джоулях, рівна добутку квадрата величини струму (I) на опір (R) і на час дії (t).

У випадку, коли через провідник (заготовку) пропускається постійний струм, і коли величина опору залежить лише від температури, визначення Q не складає труднощів. Нескладним також буде визначення величини напруги, яку необхідно підвести до заготовки, і часу нагріву при заданій напрузі.

Інакший стан справ, коли через провідник пропускається змінний струм, що звичайно має місце при контактному нагріві. У цьому випадку величина опору провідника (заготовки, що нагрівається,) буде залежати не тільки від питомого опору, що змінюється з підвищенням температури, але також і від ряду інших факторів, головними з яких будуть частота струму, магнітні властивості матеріалу заготовки і її діаметр.

В електротехніці відома формула, що приблизно встановлює співвідношення між величинами опору металевого провідника при проходженні по ньому постійного і змінного струмів

$$R_A = R_{nm} 0,45d \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}, \quad (35)$$

де R_A – активний опір провідника при проходженні по ньому перемінного струму, Ом;

R_{nm} – опір провідника при проходженні по ньому постійного струму, Ом;

d – діаметр провідника, м;

f – частота струму в Гц;

ρ – питомий опір у Ом·м;

μ – магнітна проникність.

При нагріванні провідника значення R_{nm} може бути виражене, як

$$R_{nm} = \frac{\rho_t l}{S} \text{ Ом}, \quad (36)$$

де

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \text{ Ом}. \quad (37)$$

У формулах (36), (37) ρ_t і ρ_{20} – питомі опори провідника при температурі t і 20°C ;

l і S – довжина і площа поперечного перерізу провідника;

α – температурний коефіцієнт.

Для випадку нагрітого провідника (заготовки) з діаметром d формула (188). набуде вигляду

$$R_A = \frac{0,45 \rho_t l}{Sd} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho_t}} = 0,57 \frac{l}{d} \sqrt{\mu \rho_t} \text{ Ом}, \quad (38)$$

де R_A – активний опір провідника (заготовки), нагрітого до температури t °C.

Аналіз правої частини формули (38) показує, що при нагріванні провідника (заготовки) зміні піддаються магнітна проникність і питомий електричний опір. Інші величини (l, d, f) у процесі нагріву не змінюються і не впливають на величину R_A .

Магнітна проникність при нагріві різко падає, що призводить до збільшення глибини проникнення струму, а, отже, і до зменшення активного опору. При цьому вплив μ на величину активного опору при нагріванні позначається тим сильніше, чим менше відношення

$$\frac{d}{2\delta},$$

де d – діаметр провідника;

δ – глибина проникнення в нього струму (визначається по формулі Штейнметца).

Інакше кажучи, вплив μ , на величину активного опору зростає зі збільшенням діаметра заготовки, що нагрівається.

Що стосується питомого електричного опору, то з підвищенням температури провідника (заготовки) величина питомого опору зростає, що, у свою чергу, призводить і до збільшення значення R_A .

Розглянемо, як буде змінюватися струм, що проходить через заготовку, яка нагрівається. За законом Ома для ділянки ланцюга з активним R_A і індуктивним X_L опором ефективна величина струму (I), що викликає теплову дію, визначиться, як

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_A^2 + X_L^2}} A, \quad (39)$$

де U – напруга, прикладена до ланцюга, В.

Для випадку нагрітого провідника при $R_A = R_{A_t}$ і $X_L = X_{L_t}$ формула (39) набуде вигляду

$$I_t = \frac{U}{\sqrt{R_{A_t}^2 + X_{L_t}^2}} A, \quad (40)$$

де I_t – ефективна величина струму, що проходить через провідник (заготовку) з температурою t °C, А.

Індуктивний опір X_L , що входить у формулу (40), залежить від величини струму, що проходить по провіднику, і при незмінній частоті і напрузі буде тим вище, чим більший діаметр провідника (заготовки, що нагрівається).

Література

1. Мохорт, А. В. Термічна обробка металів [Текст] : навч. посібник / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак . – К. : Либідь, 2020. – 512 с.
2. Теорія термічної обробки [Електронний ресурс] : конспект лекцій / укладач: М. М. Бобіна. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
3. Автоматизація виробничих процесів: підручник / О.І. Черевко, Л.В. Кіптєла, В.М. Михайлов, О.Є. Загорулько; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2022. – 186с.
4. Practical Heat Treating: Basic Principles – Jon L. Dossett (ASM International), 2020. – 404 p.
5. Practical Heat Treating: Processes and Practices Paperback – November 1, 2024. – 260 с.

Зміст

Вступ	3
1 Паливо і його спалювання.....	6
2 Спалювання газоподібного палива.....	15
3 Спалювання рідкого палива	21
4 Рух газів у печах.....	27
5. Теплообмін у печах.....	33
6. Нагрівання й охолодження металу	38
7. Типи і конструкції термічних печей.....	49
8. Електричні печі	57
9. Електронагрів. Нагрівальні елементи	62
10. Печі-ванни на рідкому і газоподібному паливі і електронагріві	65
11. Побудова печей	71
12. Використання тепла димових газів	78
13. Індукційний нагрів основи індукційного нагріву	87
14. Контактний електронагрів.....	94
Література	98

Устаткування процесів теплової обробки : Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 100 с.

Комп'ютерний набір С.В. Мисковець
Редактор Д.А. Гусачук

Підп. до друку 20.10.2025 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman
Ум. друк. арк. 6,25. Обл.-вид. арк. 3,83