

**Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»**

Кафедра ОМТ

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Технологія нагрівання та нагрівальне обладнання"
для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка,
освітньої програми (спеціалізації) "Обладнання
та технології пластичного формування
конструкцій машинобудування"
всіх форм навчання**

Запоріжжя 2019

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Технологія нагрівання та нагрівальне обладнання" для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка, освітньої програми (спеціалізації) «Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування» всіх форм навчання.
/Укл.: Бень А.М. - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019.
- 38 с.

Укладач: А.М. Бень, ст. викл.

Рецензент: В.В. Широкобоков, доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск: А.М. Бень, ст. викл.

Затверджено
на засіданні кафедри ОМТ
протокол № 4 від 09.10.2019

Рекомендовано до видання
НМК машинобудівного факультету
Протокол № 3 від 10.12.2019

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота №1 Визначення окалиноутворення при нагріванні сталевих заготовок.....	5
Лабораторна робота №2 Визначення ККД електропечі.....	8
Лабораторна робота №3 Визначення втрат тепла через стінки та вікна електропечі.....	11
Лабораторна робота №4 Експлуатація та характеристика ковальського індукційного нагрівача.....	14
Лабораторна робота №5 Конструкція та обслуговування вакуумної електропечі.....	18
Лабораторна робота №6 Розрахунок повного горіння природного газу (звичайне нагрівання).....	22
Лабораторна робота №7 Розрахунок неповного горіння палива (безокислювальне нагрівання).....	26
Література	38

Вступ

В ковальсько-штампувальному виробництві нагрівання металу перед куванням та гарячим штампуванням – відповідальна та складна технологічна операція. Від вірно вибраного способу та режиму нагрівання залежить не тільки якість отриманих поковок, стійкість штампів, економні витрати металу, палива та електроенергії, але й зріст продуктивності праці, зниження потрібного зусилля ковальсько-пресового обладнання та культури виробництва.

Характерна особливість сучасної теорії та практики нагрівання - комплексний підхід до вивчення теплофізичних процесів при гарячій обробці металів тиском з урахуванням окислення та газонасичення металу, теплової роботи нагрівального обладнання, режимів нагрівання та охолодження, термомеханічних властивостей поковок, теплової роботи інструмента та інших чинників, які визначають продуктивність обладнання та якість продукції, що випускається.

Лабораторна робота №1

Визначення окалиноутворення при нагріванні сталевих заготовок

Мета роботи. Визначення втрат металу від його окислення при нагріванні в електричній печі в атмосфері повітря, а також визначення впливу тривалості і температури нагрівання на окалиноутворення.

Матеріали, інструмент, обладнання. Заготовки для досліджень процесу окалиноутворення – відрізки дроту з вуглецевої сталі діаметром 4...6 мм та довжиною 60...70 мм (поверхневі дефекти та сліди корозії на заготовках не допускаються); електрична нагрівальна піч (нагрівальні елементи – ніхромові спіралі або силітові стрижні); температура печі регулюється та задається за допомогою електричного автоматичного потенціометра (наприклад, типу ПСР). Матеріал футеровки печі - шамотна цегла класу А.

Теоретичні відомості. При нагріванні металів в полумєневих печах окрім процесів, пов'язаних з передачею тепла, відбуваються також процеси хімічної взаємодії між пічними газами та поверхнею металу, що нагрівається. До вмісту продуктів згорання звичайно входять вуглецевий газ CO_2 , кисень O_2 , водяна пара H_2O , азот N_2 , його оксиди N_xO_y , а також в невеликих кількостях оксид сірки SO_2 , оксид вуглецю CO і водень H_2 . При високих температурах кисень, пари води, вуглецевий газ та оксид сірки можуть окислювати метал. Цей процес – наслідок дифузії кисню з пічних газів до поверхні заготовок, що нагріваються, адсорбції його на поверхні, дифузії реагуючих речовин через шар окалини назустріч кисню та кристалографічним перетворенням. При цьому утворюються оксиди заліза (II) та заліза (III) FeO та Fe_2O_3 , а також суміш Fe_3O_4 .

При окисленні металів в полумєневих печах на величину вигару впливає вміст газів, температура та тривалість нагрівання, форма та розміри заготовок, хімічний склад металу та інші чинники.

Втрати металу від окислення можна кількісно визначити:

1. Масове окалиноутворення (вигар) – кількість металу, що окислився в процесі нагрівання, визначений у відсотках від його початкової маси:

$$X = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де q_1 та q_2 – маса заготовки до нагрівання та після нагрівання та чищення відповідно, г.

2. Поверхнєве окалиноутворення – кількість окисленого металу, яка віднесена до одиниці поверхні заготовки, що нагрівається, г/см²:

$$A = \frac{q_1 - q_2}{S} \quad (1.2)$$

3. Швидкість окислення – відношення величини поверхневого окалиноутворення до часу нагрівання, г/(см² · год):

$$\omega = \frac{q_1 - q_2}{S \cdot \tau}, \quad (1.3)$$

де τ – час нагрівання заготовки, год.

Порядок проведення роботи. Чотири чистих сталевих заготовки із дроту зважити на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г. Після цього заготовки закласти в шамотні підставки і завантажити в піч. Підставки мають бути пронумеровані.

Температуру печі довести до необхідної в залежності від марки сталі, а потім фіксувати через кожні 3 хв.

Для визначення впливу тривалості нагрівання на окалиноутворення заготовки витягати з печі через кожні 10 хв.

Витягнуту з печі заготовку охолодити в посудині з водою для того, щоб до втрат металу від окислення в печі не додалися втрати від окалиноутворення на повітрі при охолодженні заготовки. Охолоджену заготовку відокремити від окалини.

Після очищення кожену заготовку зважити повторно і визначити величини окалиноутворення і швидкість окислення за формулами (1.1) - (1.3).

При визначенні поверхневого окалиноутворення торцевими площинами зневажати.

Результати замірювань занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Окалиноутворення заготовок

№ заготовки	Маса заготовки до нагрівання, г	Середня температура печі, °С	Тривалість нагрівання, год	Маса заготовки після нагрівання, г	Масовий вигар, %	Поверхневий вигар, г/см ²	Швидкість окислення, г/см ² год

Зміст звіту. Вказати тему та мету роботи. Дати характеристику лабораторній установці, матеріалам. Коротко викласти суть процесу окалиноутворення та основні його характеристики. Всі експериментальні та розрахункові дані звести в таблицю. Побудувати графіки: $X = f(\tau)$, $A = f(\tau)$ та $\omega = f(\tau)$.

Контрольні запитання.

1. Які чинники впливають на процес окалиноутворення?
2. Структура окалини. Окалиноутворення на поверхні заготовок із вуглецевої та легованої сталі.
3. Засоби зменшення окалиноутворення при нагріванні в печач відкритого полум'я.

Література: [1], [2], [3].

Лабораторна робота №2 Визначення ККД електропечі

Мета роботи. Визначення термічного ККД лабораторної електричної печі при нагрівання сталевих заготовок.

Матеріали, інструмент, обладнання. Заготовки з вуглецевої сталі діаметром *50...60 мм* та довжиною *150 мм* (в заготовці висвердлюється радіальний отвір діаметром *2...4 мм* на глибину *25...30 мм* для встановлення платинородій-платинової термопари, яка є датчиком визначення температури металу); лабораторна однофазова електрична піч (перетворення електричної енергії в теплову здійснюється в нагрівальних елементах, які виготовлені у вигляді спіралі з ніхромового дроту або силітових стрижнів); амперметр і вольтметр, які включаються в силовий ланцюг печі для визначення параметрів струму, що використовується. Піч обладнана системою автоматичного керування тепловим режимом з електронним потенціометром; платинородій-платинова термопара і мілівольтметр проградуєований в градусах для замірювання температури заготовки.

Теоретичні відомості. При розрахунку параметрів теплової роботи печі, а також для порівняльної оцінки нагрівального обладнання розрізняють термічний та ефективний ККД пічних агрегатів.

Термічний ККД – це відношення кількості корисного тепла, яке іде на нагрівання металу, до всієї кількості тепла, яка виникає в нагрівальному устаткуванні при його тепловій роботі [2]:

$$\eta_m = \frac{Q_m}{Q_n} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

де Q_m – кількість тепла, яке іде на нагрівання металу, *кДж*;

Q_n – загальна кількість тепла в печі, яке виникло під час згорання палива, *кДж*.

Ефективний ККД – це відношення кількості тепла, що використовується корисно, в нагрівальному обладнанні до кількості тепла, яке залишилось в печі:

$$\eta_e = \frac{Q_m}{Q_3} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

де Q_3 – кількість тепла, яке залишилося в печі при згоранні палива, *кДж*.

Для нагрівального обладнання оптимальним показником є термічний ККД.

Стосовно електричної печі опору ККД можна визначити таким чином.

Потужність, яка використовується піччю, *кВт*:

$$W = \frac{I \cdot U}{1000}, \quad (2.3)$$

де I – сила струму, *A*;

U – напруга в силовому ланцюзі, *B*.

Загальна кількість теплової енергії, еквівалентна електричній, *кДж*:

$$Q_m = 3600 \cdot W_c \cdot \tau, \quad (2.4)$$

де W_c – середня потужність за час нагрівання, *кВт*;

τ – тривалість роботи печі, *год*.

Кількість тепла, яка іде на нагрівання металу, *кДж*:

$$Q_m = q \cdot (C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1), \quad (2.5)$$

де q – маса заготовки, *кг*;

C_1 та C_2 – відповідно початкова та кінцева теплоємність металу заготовки, *кДж / кг · град*;

t_1 і t_2 – відповідно початкова та кінцева температура заготовки, *°C*.

В залежності від типу нагрівального обладнання, його конструктивного виконання, роду палива, степені використання тепла відпрацьованих пічних газів, термічний ККД може коливатися в широких межах (8...35%).

Порядок проведення роботи. Робота зводиться до визначення загальної кількості енергії, яка використовується піччю під час нагрівання, і кількості енергії, що іде безпосередньо на нагрівання металу.

Заготовку зважити, у завчасно висвердлений отвір помістити гарячий спай термопару та розмістити в робочій зоні печі.

Ввімкнути піч, автоматичним електронним потенціометром задати певну температуру нагрівання.

Через кожні 5...7 хв реєструвати покази амперметра, вольтметра та мілівольтметра (термометра).

Після того, як температура заготовки досягне заданої, піч вимкнути, зафіксувати час закінчення досліду.

Покази приладів занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Робочі параметри електропечі

Час, год	Сила струму I, A	Напруга U, B	Потужність $W, кВт$	Температура, °C

Зміст звіту. По залежностям (2.4) і (2.5) визначити Q_m та Q_t . Термічний ККД визначається за залежністю (2.1). На підставі табличних даних побудувати графік потужності печі, яка використовується при нагріванні, і температуру заготовки в функції часу нагрівання $W = f(\tau)$ та $t = f(\tau)$.

Надати електричну принципову схему лабораторної печі.

Контрольні запитання.

1. Визначення ефективного та термічного ККД нагрівального обладнання.
2. Термічний ККД та метод оцінки теплоізоляції печі.
3. Способи підвищення ККД печей.

Література: [1], [2], [3].

Лабораторна робота №3

Визначення втрат тепла через стінки та вікна електропечі

Мета роботи. Визначення втрат тепла через стінки та завантажувально-розвантажувальні вікна стаціонарно працюючої печі, визначення температури на межі вогнетрива та теплоізоляції, на зовнішній поверхні стінки печі.

Матеріал, інструментарій, обладнання. Пірометри для вимірювання температури. Лінійки для заміру розмірів вікон. Піч електрична камерна моделі ПЕК02 з робочим об'ємом $0,35 \text{ м}^2$ та двошаровою стінкою: футерівка та теплоізоляція.

Теоретичні відомості. При роботі полуменевих та електричних печей ковальсько-штампувального виробництва частина отриманого нагрівальним обладнанням тепла витрачається через стінки кладки та відкриті вікна під час завантажувально-розвантажувальних операцій.

Щільність теплового потоку, який проходить через стінку печі [1], $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q = \frac{t_n - t_c}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3.1)$$

де t_n – температура на внутрішній поверхні стінки, тобто температура в печі, $^{\circ}\text{C}$;

t_c – температура навколишнього середовища, тобто температура в цеху, $^{\circ}\text{C}$;

α_1 – зведений коефіцієнт тепловіддачі від пічного середовища до внутрішньої поверхні стінки, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

n – кількість шарів кладки стінки;

S_i – товщина i -го шару кладки, м ;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару кладки, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

α_2 – зведений коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки в навколишнє середовище, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Тоді витрати тепла через стінки печі, Вт :

$$Q_{cm} = q \cdot \sum F, \quad (3.2)$$

де $\sum F$ – сумарна поверхня всіх стінок та склепіння печі, m^2 .

За умов стаціонарного режиму роботи печі легко знайти температуру на межі шарів кладки та температуру на зовнішній поверхні стінки печі.

Температура на поверхні межі футеровки та теплоізоляції:

$$t_{\phi} = t_n - q \cdot \frac{S_{\phi}}{\lambda_{\phi}}, \quad (3.3)$$

де S_{ϕ} – товщина першого (внутрішнього) шару стінки печі, m ;

λ_{ϕ} – коефіцієнт теплопровідності внутрішнього шару кладки, $Bm/m^2 \text{ } ^\circ C$.

Температура на зовнішній поверхні стінки печі:

$$t_{cm} = t_{\phi m} - q \cdot \frac{S_2}{\lambda_2}, \quad (3.4)$$

де S_2 – товщина шару теплоізоляції, m ;

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, $Bm/m^2 \text{ } ^\circ C$.

$t_{\phi m}$ – температура на внутрішній стінці печі, $^\circ C$.

Втрати тепла через відкриті завантажувально-розвантажувальні вікна, Bm :

$$Q_v = C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot k \cdot F, \quad (3.5)$$

де $C_0 = 5.7 Bm/m^2 \times ^\circ K$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

T_n, T_c – абсолютна температура в печі та навколишнього середовища, $^\circ K$;

F – площа відкритого вікна, m^2 ;

k – коефіцієнт діафрагмування:

$$k = 0.5 \cdot (1 + \varphi), \quad (3.6)$$

$$\text{де } \varphi = \frac{l}{l+c}, \quad (3.7)$$

l – еквівалентний розмір порожнини вікна, м:

$$l = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot c}{(a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)}, \quad (3.8)$$

де a та b – ширина та висота вікна, м;

c – товщина стінки вікна, м.

Послідовність проведення роботи. Електрична піч вмикається в електричну мережу з доведенням в ній температури відповідно 1000; 1100; 1200; 1300 С. При досягненні в печі заданої температури, через 10...15 хв. замірюється температура на поверхні зовнішньої стінки. Визначається щільність теплового потоку, що проходить через піч, за виразом (3.1); втрати тепла через стінки та склепіння (3.2); температури на межі шарів футеровки та теплоізоляції (3.3); температури на зовнішній стінці за формулою (3.4) та витрати тепла через вікна за виразом (3.5). Вихідні дані зведемо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри електропечі

Матеріал футеровки			Матеріал теплоізоляції			Розміри вікна, м		
Марка	$S_{\phi}, \text{ м}$	$\lambda_{\phi}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}$	Марка	$S_2, \text{ м}$	$\lambda_2, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}$	Ширина, $a, \text{ м}$	Висота, $b, \text{ м}$	Товщина, $c, \text{ м}$

Зміст звіту. Згідно з отриманими значеннями витрат тепла через стінки та вікна, а також температур на межі футеровки і теплоізоляції на поверхні зовнішньої стінки будуюмо графіки: $q(t_n)$, $Q_{cm}(t_n)$, $Q_{\phi}(t_n)$. Робляться відповідні висновки.

Контрольні запитання.

1. Причини втрати тепла при нагріванні заготовок.
2. Методи оцінки теплоізоляції печі.
3. Способи підвищення ККД печей.

Література: [1], [2].

Лабораторна робота №4

Експлуатація та характеристика ковальського індукційного нагрівача

Мета роботи. Ознайомлення з принципом дії і конструкцією ковальського індукційного нагрівача в лабораторних умовах.

Визначення часу нагрівання та необхідної потужності для нагрівання циліндричних заготовок з вуглецевої сталі в КІНі.

Обладнання, матеріали, інструмент. Електричний силовий ланцюг ковальського індукційного нагрівача, який складається з генератора струмів високої та підвищеної частоти, конденсаторів, контактів та комплекту вимірювальних приладів:

1. Високочастотний генератор служить для живлення індукційного обладнання. Найбільш широко розповсюджені машинні генератори, які складаються з електродвигуна трьохфазного струму (асинхронного або синхронного), який вмикається в мережу промислової частоти. На одному валу з двигуном монтується генератор, який складається із зубчастого ротора, що обертається в середині статора. В обмотках останнього індуються змінний струм підвищеної частоти.

2. Індуктор є основним елементом КІНу. Від геометричних розмірів і конструкції його в значній мірі залежить ККД та експлуатаційні характеристики усього обладнання. Форма індуктора, в залежності від розмірів та форми заготовок, може бути циліндричною, овальною, квадратною та щілинною. Індуктор складається з дроту (мідна трубка квадратного перерізу, яка охолоджується водою), укладеного спіраллю, тепло- та електроізоляції, напрямних штаб та системи охолодження. Вказані елементи розміщені в корпус з листової сталі.

3. Конденсаторна батарея в КІНі служить для підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$). Якщо індуктор виконує роль своєрідного акумулятора електромагнітної енергії, то конденсатори по суті є накопичувачами електростатичної енергії. Це призводить до підвищення номінальної активної потужності генератора і ККД усього обладнання; вольтметр, амперметр, ваттметр і фазометр, які входять в комплект вимірювальних приладів КІНу; виштовхувачі (пневматичні, гідравлічні та механічні) для подачі і виштовхування заготовок з

індуктора; спеціальні пристрої (бункерного або лоткового типу) для завантаження заготовок в ковальський індукційний нагрівач; оптичні або фотоелектричні пірометри для вимірювання температури заготовок, що нагріваються в індукторі КНУ.

Теоретичні відомості. Один із самих прогресивних видів нагрівання металу перед штампуванням – нагрівання струмом високої та промислової частот в ковальських індукційних нагрівачах [2].

Суть індукційного нагрівання полягає в тому, що металева заготовка, яка укладається в змінне магнітне поле, нагрівається за рахунок тепла, яке виникає в ній внаслідок індукційних віхрьових струмів. Електрорушійна сила і струм розподіляються за перерізом заготовки нерівномірно і підлягають експоненціальному закону від поверхні до центру заготовки.

Товщину (Δ) поверхневого шару заготовки, по якому проходить змінний високочастотний струм, називають глибиною проникнення струму і визначають за формулою:

$$\Delta = 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (4.1)$$

де ρ - питомий електричний опір, 10^{-6} Ом·м;

μ – магнітна проникність;

f – частота струму, Гц.

Процес нагрівання металу в індукторі можна розглядати так:

1. Нагрівання металу, шар якого знаходиться в межах глибини проникнення струму, відбувається безпосередньо за рахунок проходження електричного струму.

2. Нагрівання металу, який розташований в центрі заготовки, за межами глибини проникнення струму, відбувається за рахунок теплопровідності з поверхневих шарів.

Необхідна для нагрівання потужність ($\kappa Вт$):

$$N = \frac{C \cdot t_{\max} \cdot q \cdot n}{\tau}, \quad (4.2)$$

де C – середня теплоємність сталі при температурі нагрівання, $\kappa Дж / (\kappa г \cdot град)$;

t_{\max} – максимальна температура нагрівання, $^{\circ}C$;

q – маса заготовки, що нагрівається, кг;

n – кількість заготовок, що нагріваються одночасно;

τ – час нагрівання, с.

Для того, щоб індукційне нагрівання було ефективним та економічно доцільним, треба мати найбільш високий ККД нагрівального обладнання. Із формули (4.1) витікає, що для одного і того ж матеріалу заготовки, глибина проникнення струму в основному залежить від його частоти. Практично, вибір частоти вважається задовільним, якщо відношення діаметра заготовки, що нагрівається, до глибини проникнення струму лежить в межах 2,5...6,0.

При визначенні часу нагрівання в КІНі, наприклад з частотою струму 2500 Гц, беруться заготовки з вуглецевої сталі довжиною 200 мм та ϕ 30, 50, 70, 90 мм (по 3 одиниці кожного перерізу).

Порядок проведення роботи. Вивчити принцип дії, призначення та конструктивні особливості системи високочастотний генератор – ковальський індукційний нагрівач в лабораторних або заводських умовах. Визначити параметри головних елементів КІНу. Вивчити положення інструкції з експлуатації індукційного нагрівача.

Зважити заготовки.

Для визначення часу нагрівання заготовок в індукторі, застосуємо, наприклад, оптичний пірометр. Його разташовують нерухомо на підставці так, щоб його оптична вісь перетиналась з центром торця встановленої в індуктор заготовки. Одночасно з вмиканням індуктора вмикається секундомір.

При досягненні заданої, в залежності від марки сталі, температури нагрівання, яка контролюється пірометром, вимкнути КІН і зафіксувати час. По заміряній температурі і часу нагрівання відповідно (4.2) знайти потужність, яка необхідна для нагрівання заготовок.

Результати вимірювань та розрахунків занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри заготовки при нагріванні

Діаметр заготовки <i>мм</i>	Маса заготовки, <i>кг</i>	Температура нагрівання, <i>°C</i>	Час нагрівання, <i>с</i>	Необхідна потужність нагрівання, <i>кВт</i>

Зміст звіту. Скласти силову електричну схему ковальського індукційного нагрівача.

Скласти технічну характеристику КІНу за формою (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Технічна характеристика КІНа

Параметр	Значення
Діаметр заготовки, мм	
Довжина заготовки, мм	
Час нагрівання, с	
Температура нагрівання, °С	
Форма індуктора	
Внутрішній діаметр, мм	
Активна довжина, мм	
Тип генератора	
Частота струму, Гц	
Напруга, В	
Потужність, кВт	
Тип конденсаторних батарей	
Частота струму, Гц	
Напруга, В	
Ємність, мкф	
Реактивна потужність, квар	
Кількість банок, од	

Подати графічну залежність терміну нагрівання та необхідної потужності в функції діаметра заготовок: $N = f(d_3)$, $\tau_n = f(d_3)$ при $t_{\max} = const$.

Контрольні запитання.

1. Яка фізична картина нагрівання металів струмом високої частоти?
2. Який режим роботи КІНу?
3. У чому полягають особливості нагрівання феромагнітних, діамагнітних та парамагнітних металів?

Література: [2], [3].

Лабораторна робота №5

Конструкція та обслуговування вакуумної електропечі

Мета роботи. Ознайомлення з принципом дії вакуумної камерної електричної печі опору моделі СНВ-1.3. Проведення паспортизації печі з визначенням її складових частин і основних параметрів. Ведення технології нагрівання заготовок із титанового сплаву згідно з режимом його теплової обробки та вивчення особливостей завантаження, вакуумації, нагрівання та розвантаження садки.

Обладнання та прилади. Електрична вакуумна піч

Загальні положення. Деякі кольорові метали та сплави на їхній основі, а також спеціальні сталі дуже вибагливі до атмосфери нагрівання. За цих умов найкраща якість теплової обробки таких металів досягається при застосуванні вакуумних печей.

Вакуумна піч - складне обладнання і має високу вартість. В ній, в умовах вакууму, ведуть нагрівання, відпалення, спікання, дегазацію, плавлення, тощо.

Вакуумна нагрівальна піч має в своєму складі такі основні елементи: камеру нагрівальну; блок вакуумний; систему керування; трансформатор та тиристорний регулятор напруги.

Робоча нагрівальна вакуумна камера обладнана нагрівачами опору та екранною тепловою ізоляцією. Матеріал нагрівачів - вольфрамовий дріт.

Нагрівальна камера - горизонтального типу, циліндричної форми, з водяним охолодженням. На корпусі камери є патрубок для сполучення з вакуумним блоком. Отвір патрубка перекривається охолоджувачем, який влаштовано в корпусі камери. В камері є входи для термопар.

Спереду камера зачиняється водоохолоджувальною кришкою. Кришка має віконце для нагляду за садкою. Камера також має задню кришку. До цієї кришки на водоохолоджувальних підвісках кріпиться блок з нагрівачами.

Блок нагрівальний - це екранна теплоізоляція. Вона виконана у вигляді пакетів. Кожний пакет вмістить шість екранів. При складанні

пакетів екранів створюється прямокутний блок. На верхньому пакеті екранів влаштовуються нагрівачі та струмопідводи.

Нагрівачі зигзагоподібного типу виконані із вольфрамового дроту та влаштовуються по боковим та торцевим поверхням пакету. Струмопідводи нагрівачів водоохолоджуються та виводяться через задню кришку камери.

Блок вакуумний для зручності обслуговування виконаний відкритим. В ньому влаштовані: паромастильний насос; механічний насос; засувка вакуумна ДУ-260 та вентилі.

В системі (на щиті) керування влаштовані прилади, апарати керування та сигналізація. Зі щита ведеться керування насосами та вакуумними затворами.

Вимір вакууму здійснюється вакууметром, датчиками його є манометричні термодарні та іонізаційні перетворювачі. Температура в робочій камері вимірюється вольфрамрениєвою термодарою. Тиск захисного газу (при його вживанні) фіксується мановакууметром.

Споживання нагрівачів ведеться від знижуючого трансформатора, він розміщується поруч із піччю. В первинну обмотку знижуючого трансформатора вмикається теристорний регулятор напруги.

Послідовність проведення роботи. Піч живиться від мережі змінного струму з напругою 380 В з нулем. Силовий ланцюг нагрівачів вмикається з допомогою автоматичного пристрою С1, а ланцюг керування та вакуумна система - автоматом С2. Стосовно блокування безпеки: автомат С1 вмикається тільки при ввімкненому автоматі С2.

Регулювання температури печі виконується або вручну, або автоматично, згідно режиму нагрівання.

Система керування печі забезпечує такі режими роботи: В - ввімкнута; Д - ручне керування; А - автоматичне керування.

В печі є блокування для вимикання нагрівачів при порушенні в системі водоохолодження. Аналогічна система діє для захисту насосів.

Для охолодження систем проточною водою вона повинна бути під тиском не нижче 0,2 МПа (2 атм), причому температура води на вході повинна бути близько 20 С, а на виході - не більше 40 С.

Нагрівання заготовок (садки) відбувається в наступній послідовності:

- подати електроживлення на щит керування;
 - відчинити передню кришку печі;
 - відчинити передній екран та завантажити заготовки;
 - зачинити екран та кришку;
 - створити в камері робочий вакуум;
 - ввімкнути нагрівачі;
 - провести нагрівання відповідно технологічного режиму;
 - вимкнути нагрівачі;
 - зняти вакуум, напустити повітря в робочу камеру та відчинити кришку;
 - відчинити торцевий екран та вивантажити садку.
- Скласти технічну характеристику печі згідно таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічна характеристика вакуумної електропечі

	Параметр	Величина
1	Робоча потужність, <i>кВт</i>	
2	Потужність холостого ходу, <i>кВт</i>	
3	Номінальна температура, <i>°C</i>	
4	Розміри робочої камери, <i>мм</i> (ширина, довжина, висота)	
5	Маса садки, <i>кг</i>	
6	Середовище робочого простору	
7	Вакуум в холодному стані, <i>Па</i>	
8	Напруга споживчої мережі, <i>В</i>	
9	Частота струму, <i>Гц</i>	
10	Кількість фаз струму	
11	Витрати води на охолодження, <i>м³/год</i>	
12	Ресурс роботи нагрівачів, <i>год</i>	
13	Матеріал нагрівачів	
14	Габарити печі, <i>мм</i> (ширина, довжина, висота)	
15	Маса печі, <i>т</i>	

Примітка: при роботі з інертним газом його тиск не повинен перевищувати 0,12 МПа.

Зміст звіту. Дати перелік основних складових печі. Скласти технічну характеристику печі, описати порядок її роботи. Перерахувати контрольно-вимірювальні прилади.

Контрольні запитання:

1. Призначення електричної вакуумної печі.
2. Основні елементи електричної вакуумної печі.
3. Особливості роботи з піччю.

Література: [1], [2], [3].

Лабораторна робота №6

Розрахунок повного горіння природного газу (звичайне нагрівання)

Мета: виконати спрощений розрахунок горіння природного газу із визначенням:

- витрат повітря на горіння;
- кількості та складу продуктів згоряння;
- теплоти згоряння;
- калориметричної та дійсної температури горіння.

Вихідні дані подано в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Склад вологого природного газу (робочий склад)

Варіант	Склад, %						
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10} і вище	CO_2	N_2	H_2O
1	94,5	1,5	0,8	0,2	0,1	1,1	1,8
2	96,6	1,2	0,2	0,3	0,5	—	1,2
3	92,6	2,2	1,2	1,0	0,2	0,8	2,0
4	90,3	2,7	2,0	0,8	1,2	1,2	1,8
5	87,2	4,2	3,6	2,0	0,8	1,0	1,2
6	91,7	3,3	1,4	0,6	1,1	—	1,9
7	93,0	2,0	1,2	0,8	0,1	1,9	1,0
8	97,8	0,5	0,2	0,1	0,1	—	1,3
9	79,1	10,9	4,0	3,0	0,1	1,8	1,1
10	97,2	0,8	0,7	0,3	—	—	1,0

Розрахунок виконати відповідно з коефіцієнтами:

$\alpha_n = 1,05$ - коефіцієнт надлишку повітря;

$k = 3,76$ - коефіцієнт вмісту азоту в повітрі;

$\mu = 0,65 \dots 0,85$ - пірометричний коефіцієнт.

Як приклад, приведемо спрощений розрахунок природного вологого газу зі складом:

$CH_4 = 94,0\%$, $C_2H_6 = 2,0\%$, $C_3H_8 = 1,0\%$, $C_4H_{10} = 0,4\%$

$CO_2 = 0,2\%$, $N_2 = 0,5\%$, $H_2O = 1,9\%$

Грунтуючись на стехіометричних рівняннях визначимо витрати кисню на горіння 1 м^3 газу, $\text{м}^3(\text{м}^3/\text{м}^3)$:

$$\begin{aligned} V_{O_2} &= 0,01 \cdot (n + m/4) \cdot \sum C_n H_m = \\ &= 0,01 \cdot (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10}) = \\ &= 0,01 \cdot (2 \cdot 94 + 3,5 \cdot 2 + 5 \cdot 1 + 6,5 \cdot 0,4) = 2,026 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

Теоретичні витрати повітря:

$$L_m = (1 + k) \cdot V_{O_2} = 4,76 \cdot 2,026 = 9,65 \text{ м}^3 / \text{м}^3,$$

де $k = 3,76$ - коефіцієнт вмісту азоту в повітрі.

Дійсні витрати повітря згідно з формули:

$$L_g = a_n \cdot L_m = 1,1 \cdot 9,65 = 10,62 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Об'єми окремих складових продуктів згорання:

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= 0,01 \cdot (CO_2 + n \sum C_n H_m) = \\ &= 0,01 \cdot (CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10}) = \\ &= 0,01 \cdot (0,2 + 94 + 2 \cdot 2 + 31 + 4 \cdot 0,4) = 1,028 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 0,01 \cdot (H_2O + 0,5m \sum C_n H_m) = \\ &= 0,01 \cdot (H_2O + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10}) = \\ &= 0,01 \cdot (1,9 + 2 \cdot 94 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 5 \cdot 0,4) = 2,019 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

$$V_{N_2} = 0,01N_2 + a_n k V_{O_2} = 0,01 \cdot 0,5 + 1,1 \cdot 3,76 \cdot 2,026 = 8,385 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Об'єм надлишкового кисню:

$$V_{O_2}^{nad} = (a_n - 1) \cdot V_{O_2} = 0,1 \cdot 2,026 = 0,203 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Загальна кількість продуктів згоряння:

$$V_{\Sigma} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} = 1,028 + 2,019 + 0,203 + 8,385 = \\ = 11,64 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Склад продуктів згоряння згідно з формулою:

$$CO_2 = 100 V_{CO_2} / V_{\Sigma} = 100 \cdot 1,028 / 11,64 = 8,83\%$$

$$H_2O = 100 \cdot 2,019 / 11,64 = 17,32\%$$

$$N_2 = 100 \cdot 8,385 / 11,64 = 72,1\%$$

$$O_2 = 1,75\%$$

Теплота згоряння газу:

$$Q_n^p = 358CH_4 + 636C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} = \\ = 358 \cdot 94 + 636 \cdot 2 + 913 \cdot 1 + 1185 \cdot 0,4 = 36328 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Хімічна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_x = Q_n^p / V_{\Sigma} = 36328 / 11,64 = 3120 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Знайдемо калориметричну температуру згоряння газу за умов, що повітря подається в пальники підігрітим, наприклад, до 400°C. Тоді ентальпія підігрітого повітря:

$$i_n = t_n \cdot C_{II}^{400} = 532 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

Тоді загальна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_{\Sigma} = i_x + i_n L_g / V_{\Sigma} = 3120 + 532 \cdot (10,62/11,64) = 3605 \text{ кДж/м}^3$$

Згідно з табл. 6.2 калориметрична температура згорання газу дорівнює 2090°C.

Таблиця 6.2 - Калориметрична температура горіння природного газу та мазуту в залежності від ентальпії продуктів згорання

$t, ^\circ\text{C}$	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$i, \text{Дж/м}^3$	2405	2585	2785	2955	3170	3385
$t, ^\circ\text{C}$	2100	2200	2300	2400	2500	-
$i, \text{Дж/м}^3$	3625	3890	4190	4520	5015	-

Дійсна температура горіння буде:

$$t_g = \mu \cdot t_k = 0,65 \cdot 2090 = 1358 \approx 1360^0 \text{ C},$$

де $t_k = 0,65$ - пірометричний коефіцієнт.

Лабораторна робота №7

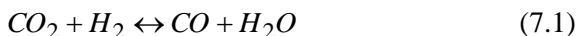
Розрахунок неповного горіння палива (безокислювальне нагрівання)

Методика розрахунку.

В печах безокислювального нагрівання для отримання окислювально-відновних процесів необхідно спалювати паливо з коефіцієнтом надлишку повітря близько 0,5. Розрахунок такого горіння має певні ознаки, відмінні в порівнянні із розрахунком звичайного горіння.

Наведемо методику розрахунку неповного горіння газового палива, яка базується на законі збереження маси речовини та зводиться до складу рівнянь матеріальних балансів по вуглецю, водню та кисню.

Оскільки продукти неповного згорання містять гази CO_2 , CO , H_2 та H_2O , які знаходяться в рівновазі, згідно з рівнянням реакції водяного газу:



тоді до балансового рівняння по вуглецю, водню та кисню додається рівняння константи реакції водяного газу:

$$k = f(t) = (CO \cdot H_2O) / (CO_2 \cdot H_2) \quad (7.2)$$

Таким чином, знаючи склад палива та умови його спалення, тобто температуру та коефіцієнт надлишку повітря, можна визначити склад продуктів неповного згорання спільним рішенням рівнянь матеріальних балансів та рівноваги в реакції водяного газу. Наведемо такі умовні позначення:

$V_{O_2}^0$ - питомий фактичний об'єм кисню, що надходить з повітрям, при $a_{II} = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ газу;

$V_{N_2}^0$ - питомий теоретичний об'єм азоту, що надходить з повітрям, при $a_{II} = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ газу;

$V_{N_2}^{\text{II}}$ - питомий об'єм азоту в газовому паливі, м³/м³ газу;

V_{N_2} - питомий фактичний об'єм азоту в продуктах неповного згоряння, м³/м³ газу;

V_g^0 - питомий теоретичний об'єм продуктів згоряння, м³/м³ газу;

V_g - питомий фактичний об'єм продуктів неповного згоряння, м³/м³ газу;

$V_{CO_2}^0$ та $V_{H_2O}^0$ - питомий теоретичний об'єм вуглекислого газу та водяної пари в продуктах повного згоряння, м³/м³ газу;

x, y, z та q - вміст в продуктах неповного згоряння відповідно CO_2, CO, H_2 та H_2O , %.

Складаємо балансові рівняння.

По вуглецю:

$$x + y = V_{CO_2}^0 \quad (7.3)$$

або
$$x + y = (CO_2 + CO + CH_4 + nC_nH_m) \cdot 0,01$$

По водню:

$$z + q = V_{H_2O}^0 \quad (7.4)$$

або
$$z + q = (H_2 + H_2O + 2CH_4 + 0,5mC_nH_m) \cdot 0,01$$

По кисню:

$$2x + y + z = 2V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 - 2V_{O_2}^0 \cdot (1 - a_{\text{II}}) \quad (7.5)$$

або
$$2x + y + z = (2CO_2 + CO + H_2O + 2O_2) \cdot 0,01 + 2V_{O_2}^0$$

Константа рівноваги реакції водяного газу:

$$k = (CO \cdot H_2O)/(CO_2 \cdot H_2) = y \cdot z / x \cdot q \quad (7.6)$$

Розв'язуючи рівняння (7.3)...(7.5) відносно x та підставляючи вирази для y , z та q через x в рівнянні (7.6), отримуємо:

$$y = V_{CO_2}^0 - x, \quad (7.7)$$

$$z = V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 - x - 2 \cdot (1 - a_{II}) \cdot V_{O_2}^0 \quad (7.8)$$

$$q = x + 2 \cdot (1 - a_n) \cdot V_{O_2}^0 - V_{CO_2}^0 \quad (7.9)$$

Тоді

$$k = \left\{ \left[V_{CO_2}^0 - x \right] \cdot \left[V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 - 2(1 - a_n) \cdot V_{O_2}^0 - x \right] \right\} / \left\{ x \cdot \left[x + 2 \cdot (1 - a_n) \cdot V_{O_2}^0 - V_{CO_2}^0 \right] \right\} \quad (7.10)$$

Надалі задаємося значеннями коефіцієнту надлишку повітря a_n та температурою, за якою визначимо константу рівноваги окислювально-відновних реакцій безокислювального нагрівання k по табл. 7.1.

Таблиця 7.1 - Константи рівноваги k при різних температурах

500	600	700	800	900	1000	1050	1100	1150	$t, ^\circ\text{C}$	1200	1250	1300
0,205	0,392	0,65	0,96	1,32	1,73	1,94	2,15	2,37	k	2,58	2,79	3,00

Підставляємо значення a_n та k в рівняння (7.10) для отримання значення x , а потім, за рівняннями (7.7)...(7.9) також визначимо y , z та q .

Загальний питомий об'єм продуктів неповного згоряння, віднесений до 1 м^3 газоподібного палива буде, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_G = x + y + z + q + \sum V_{N_2} \quad (7.11)$$

Склад продуктів неповного згоріння визначимо за формулами, %:

$$CO_2 = (x/V_G) \cdot 100 \quad (7.12)$$

$$CO = (y/V_G) \cdot 100 \quad (7.13)$$

$$H_2O = (z/V_G) \cdot 100 \quad (7.14)$$

$$H_2 = (q/V_G) \cdot 100 \quad (7.15)$$

$$N_2 = (\sum V_{N_2} / V_G) \cdot 100 \quad (7.16)$$

При безокислювальному нагріванні, коли горіння відбувається з $a_n < 1$, температура в робочому просторі печі знижується. Визначимо кількість теплоти, що не отримана піччю внаслідок хімічної неповноти горіння за вмістом в пічних газах CO , H_2 , CH_4 , $кДж/м^3$.

$$Q_{XH}^p = (126,8CO + 107,9H_2 + 359,1CH_4) \cdot V_G^a, \quad (7.17)$$

де CO , H_2 та CH_4 - вміст цих газів в продуктах згоріння, %;

V_G^a - питомий об'єм продуктів згоріння при заданому a_n , $м^3/м^3$.

Тоді калориметрична температура неповного згоріння згідно з формулою (7.12) буде, $^{\circ}C$:

$$t_k = \left(Q_H^p + Q_{nl}^{\phi} + Q_{ng}^{\phi} - Q_{xn}^p \right) / (C_H \cdot V_G^a), \quad (7.18)$$

де Q_{nl}^{ϕ} та Q_{ng}^{ϕ} - фізична теплота палива та повітря при їх підігріванні перед горінням;

C_H - середня теплоємність продуктів неповного згоріння.

Приклад розрахунку неповного горіння палива.

При розв'язанні цієї задачі, для різних значень коефіцієнту надлишку повітря $a_n = 0,4 \dots 1,0$, з кроком $a_n = 0,1$ визначимо:

- об'єм кисню та повітря для горіння;

- об'єм та склад продуктів згоряння;
- хімічну неповноту згоряння;
- калориметричну температуру згоряння та необхідну температуру передчасного нагрівання компонентів горючої суміші для отримання технологічно необхідної температури в печі.

Вихідні дані надано в табл. 7.2

Таблиця 7.2 - Склад сухого природного газу

Варіанти	Склад, %					
	CH ₄	C ₂ H ₆	CH ₈	C ₄ H	CO ₂	N
1	96,3	1,5	0,8	0,2	0,1	1,1
2	97,8	1,2	0,2	0,3	—	1,2
3	94,6	2,2	1,2	1,0	0,2	0,8
4	92,1	2,7	2,0	0,8	1,2	1,2
5	88,4	4,2	3,6	2,0	0,8	1,0
6	93,6	3,3	1,4	0,6	1,1	—
7	94,0	2,0	1,2	0,8	0,1	1,9
8	99,1	0,5	0,2	0,1	0,1	—
9	82,2	10,9	4,0	3,0	0,1	1,8
10	98,2	0,8	0,7	0,3	—	—

Як приклад наведемо розрахунок неповного горіння газу зі складом, %:

$$CH_4 = 98,3; C_2H_6 = 0,3; C_3H_8 = 0,12; C_4H_{10} = 0,15;$$

$$CO_2 = 0,1; N_2 = 1,03$$

Необхідний об'єм кисню визначимо за формулою $V_{O_2} = 0,21a_n \cdot L_m$. Питомий теоретичний об'єм повітря

Знайдемо L_m , $м^3/м^3$:

$$L_m = 0,0476 \cdot [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum(n + m/4) \cdot C_nH_m - O_2] \cdot (1 + 0,00124 g_e)$$

де $g_e = 10 \text{ г}/м^3$ - вміст вологи в сухому повітрі.

$$L_m = 0,0476 \cdot [2 \cdot 98,3 + 3,5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,12 + 6,5 \cdot 0,15] \cdot (1 - 0,00124 \cdot 10) = 9,6 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Об'єм кисню V_{O_2} при коефіцієнтах надлишку повітря $a_n = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ відповідно буде $\text{м}^3 / \text{м}^3$ (0,8; 1,01; 1,21; 1,41; 1,61; 1,81; 2,02).

Разом з киснем вноситься певний об'єм азоту, який визначимо:

$$V_{N_2}^0 = (79 / 21) \cdot V_{O_2}^0$$

Загальний об'єм N_2 з урахуванням азоту палива:

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,01 \cdot V_{N_2}^{\Pi},$$

де - $V_{N_2}^{\Pi}$ вміст азоту в паливі, %.

Для розрахункових значень коефіцієнтів надлишку повітря загальний об'єм N_2 буде $\text{м}^3 / \text{м}^3$: 3,06; 3,86; 4,56; 5,31; 6,06; 6,82; 7,61.

Визначимо об'єм та склад продуктів згоряння для $a_n = 1,0$:

$$V_g^0 = V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}$$

$$V_{CO_2}^0 = 0,01 \cdot (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \sum C_n H_m) \cdot$$

$$0,01 \cdot (0,1 + 98,3 + 2 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,12 + 4 \cdot 0,15) = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (2\text{CH}_4 + m / 2 \cdot \sum C_n H_m + 0,124 \cdot L_m \cdot g_{\beta}) =$$

$$= 0,01 \cdot (2 \cdot 98,3 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,15 + 0,124 \cdot 10 \cdot 9,6) = 2,11 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot (N_{N_2}^{\Pi} + 79L_m) = 0,01 \cdot (1,03 + 79 \cdot 9,6) = 7,59 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Тоді

$$V_g^0 = 1,0 + 2,11 + 7,59 = 10,7 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Визначимо склад продуктів згоряння при $a_n = 0,4 \dots 0,9$, складемо балансові рівняння по вуглецю, водню та кисню згідно формул (7.3)...(7.5).

По балансу за формулою (7.3):

$$\begin{aligned} x + y &= (CO_2 + CO + CH_4 + nC_nH_m) \cdot 0,01 = \\ &= (0,1 + 98,3 + 2 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,12 + 4 \cdot 0,15) \cdot 0,01 = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

По балансу водню (7.5):

$$\begin{aligned} z + q &= (H_2 + H_2O + 2CH_4 + 0,5m \cdot C_nH_m) \cdot 0,01 = \\ &= (2 \cdot 98,3 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,15) \cdot 0,01 = 1,99 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

$$2x + y + z = (2CO_2 + CO + H_2O + 20) \cdot 0,01 + 2V_{O_2} \cdot$$

Знайдено значення $2x + y + z$ при $a_n = 0,4$. Раніше було визначено, що для такого коефіцієнту надлишку повітря $V_{O_2} = 0,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ тоді:

$$2x + y + z = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,8 = 1,62 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Аналогічно отримуємо для $a_n = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ баланс по кисню відповідно: 2,0; 2,42; 2,82; 3,22; 3,62 $\text{м}^3 / \text{м}^3$.

Для зручності наступних розрахунків введемо позначення:

$$x + y = A$$

$$z + q = B$$

$$2x + y + z = C$$

За цих позначень, згідно виразу (7.10), рівняння константи реакції водяного газу буде:

$$k = (A - x) \cdot (C - A - x) / x \cdot (B - C + A + x)$$

Значення k знайдемо за табл. 7.1. При температурі 1300°C константа $k = 3,0$. Тоді, при $a_n = 0,4$ це рівняння прийме вигляд:

$$3 = (1,0 - x) \cdot (1,62 - 1,0 - x) / x \cdot (1,99 - 1,62 + 1,0 + x)$$

А після перетворення: $2x^2 + 5,77x - 0,6 = 0$; $x = 0,11$. Таким чином при $a_n = 0,4$ значення $x = 0,11$; при інших значеннях $a_n = 0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ ця величина відповідно становить $0,19$; $0,3$; $0,43$; $0,60$; $0,79$.

На основі рівнянь (7.7)...(7.9), підставляючи отримане значення $x = 0,11$ визначимо значення y , z та q для $a_n = 0,4$:

$$y = A - x = 1,0 - 0,11 = 0,89$$

$$z = C - 2x - y = C - A - x = 0,52$$

$$q = B - z = B - C + A + x = 1,47$$

Загальний об'єм продуктів згоряння при $a_n = 0,4$ отримаємо згідно з (7.11):

$$V_z = X + y + z + q + \sum N_2 = 0,11 + 0,89 + 0,52 + 1,47 + 3,06 = 6,05 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Склад продуктів неповного згоряння згідно формул 7.12...7.16 буде:

$$\text{CO}_2 = 1,82\%; \text{CO} = 14,71\%; \text{H}_2\text{O} = 8,6\%; \text{H}_2 = 24,3\%;$$

$$\text{N}_2 = 50,57\%.$$

Аналогічно проведемо відповідні розрахунки для $a_n = 0,5 \dots 0,9$. Отримані значення занесемо в таблицю 7.3

Таблиця 7.3 – Об'єм і склад продуктів згоряння при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт a_n		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
CO_2	m^3/m^3	0,11	0,19	0,30	0,43	0,60	0,79	1,00
	%	1,82	2,78	3,98	5,19	6,64	8,06	9,34
CO	m^3/m^3	0,89	0,81	0,70	0,57	0,40	0,21	-
	%	14,71	11,86	9,28	6,88	4,43	2,14	-
H_2O	m^3/m^3	0,52	0,83	1,12	1,39	1,62	1,83	2,11
	%	8,6	12,15	14,68	16,76	17,92	18,68	19,72
H_2	m^3/m^3	1,47	1,16	0,87	0,60	0,37	0,16	-
	%	24,3	16,98	11,54	7,24	4,09	1,63	-
N_2	m^3/m^3	3,06	3,84	4,55	5,30	6,05	6,81	7,59
	%	50,57	56,23	60,34	63,93	66,92	69,49	70,94
Об'єм продуктів згоряння, $V_g, m^3/m^3$		6,05	6,83	7,54	8,29	9,04	9,80	10,70

Знайдемо теплотворну здатність нашого газу:

$$Q_H^p = 358 \cdot CH_4 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} =$$

$$= 358 \cdot 98,3 + 636 \cdot 0,3 + 913 \cdot 0,12 + 1185 \cdot 0,15 = 35667 \text{ кДж/м}^3$$

Визначимо кількість теплоти витраченої внаслідок хімічної неповноти згоряння Q_{xp}^p (7.17) та кількість теплоти Q_a^p , що отримана при горінні газу з коефіцієнтом надлишку повітря $a_n = 0,5$:

$$Q_{xH}^p = (126,8 \cdot CO + 107,9 \cdot H_2 + 359,1 \cdot CH_4) \cdot V =$$

$$= (126,8 \cdot 11,86 + 107,9 \cdot 16,98) \cdot 6,83 = 22140 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_a^p = Q_H^p - Q_{xH}^p = 35667 - 22740 = 12927 \text{ кДж/м}^3$$

Визначимо калориметричну та дійсну температуру горіння при $a_n = 0,5$ методом послідовних наближень. Спочатку знайдемо теплоємність (ентальпію) продуктів неповного згоряння при $a_n = 0,5$:

$$i = Q_a^p / V_g^a = 12927/6,83 = 1892,6 \text{ кДж/м}^3,$$

де $V_{CO_2}^a = 6,83 \text{ м}^3/\text{м}^3$ - знайдемо по таблиці 7.3.

Далі задамо калориметричною температурою продуктів неповного згоряння $t_k = 1200^\circ\text{C}$ та визначимо теплоємність окремих складових газів, що входять до продуктів згоряння:

$$i_{CO_2} = V_{CO_2}^a \cdot t_k \cdot C / 100 = 2,78 \cdot 1200 \cdot 2,289 / 100 = 76,26 \text{ кДж/м}^3$$

де $V_{CO_2}^a = 2,78\%$ - вміст CO_2 в продуктах згоряння при $a_n = 0,5$ (табл. 7.3);

$$t_k = 1200^\circ\text{C}; C = 2,289 \text{ кДж/м}^3.$$

Аналогічно отримуємо теплоємність інших елементарних газів продуктів згоряння кДж/м^3 :

$$\begin{aligned} i_{CO} &= 205,6 \text{ кДж/м}^3 & i_{H_2O} &= 258,4 \text{ кДж/м}^3 \\ i_{H_2} &= 274,7 \text{ кДж/м}^3 & i_{N_2} &= 963,5 \text{ кДж/м}^3 \end{aligned}$$

Просумуємо отримані значення i та знайдемо загальну теплоємність $i_{\Sigma}^{1200} = 1778,5 \text{ кДж/м}^3$.

Отже, при спаленні газу з не підігрітим повітрям при $a_n = 0,5$ калориметрична температура повинна бути дещо вищою. Для її уточнення визначимо теплоємність складових продукту неповного згоряння при $t_k = 1300^\circ\text{C}$, кДж/м^3 :

$$i_{CO_2} = 2,78 \cdot 1300 \cdot 2,31 / 100 = 83,5 \text{ кДж/м}^3;$$

Аналогічно отримаємо для інших складових, отже
 $i_{CO} = 224,8 \text{ кДж/м}^3$;

$$\begin{aligned} i_{H_2O} &= 283,3 \text{ кДж/м}^3 & i_{H_2} &= 299,5 \text{ кДж/м}^3 \\ i_{N_2} &= 1043,8 \text{ кДж/м}^3 & i_{\Sigma}^{1300} &= 1934,9 \text{ кДж/м}^3 \end{aligned}$$

Необхідна калориметрична температура лежить в межах 1200...1300°C. Її точне значення знайдемо інтерполяцією:

$$t_k = 1200 + (1892,6 - 1778,5 / 1934,9 - 1778,5) \cdot 100 = 1200 + 72 \approx 1270^\circ C$$

Задамося пірометричним коефіцієнтом $\eta_n = 0,75$ та визначимо дійсну температуру в робочій камері безокислувальної печі при $a_n = 0,5$:

$$t_g = t_k \cdot \eta_n = 1270 \cdot 0,75 = 953^\circ C$$

Така температура не відповідає вимогам технології нагрівання сталі перед обробкою тиском. За цих обставин, для отримання бажаної дійсної температури в печі $t_g = 1300^\circ C$ необхідно заздалегідь підігрівати або обидва компоненти горючої суміші, або лише повітря.

Визначимо температуру підігрівання повітря. При бажаній $t_g = 1300^\circ C$ калориметрична температура повинна бути $t_k = t_g / \eta_n = 1300 / 0,75 = 1733^\circ C$.

Знайдемо теплоємність окремих складових продуктів згорання при $t_k = 1733^\circ C$ та $a_n = 0,5$:

$$i_{CO_2} = 2,78 \cdot 1733 \cdot 2,41 / 100 = 116,1 \text{ кДж/м}^3.$$

Аналогічно отримаємо відповідні значення для інших елементних газів:

$$\begin{aligned}
 i_{CO} &= 306,6 \text{ кДж/м}^3 & i_{H_2O} &= 402,9 \text{ кДж/м}^3 \\
 i_{H_2} &= 411,8 \text{ кДж/м}^3 & i_{N_2} &= 1441,4 \text{ кДж/м}^3
 \end{aligned}$$

Загальна (сумарна) теплоємність пiчних газiв при $t_n = 1733^\circ\text{C}$ буде $2561,9 \text{ кДж/м}^3$. Визначимо кiлькiсть теплоти, яка повинна бути внесена в пiч внаслiдок передчасно нагритого повітря:

$$Q_{ПО}^\phi = i_\Sigma^{1733} - I = 2678 - 1892,6 = 786,2 \text{ кДж/м}^3$$

Температуру пiдгритого повітря знайдемо з виразу:

$$Q_{ПО}^\phi = L_{ПО}^a \cdot t_{ПО}^\phi \cdot C_{ПО}^\phi / V_g^a,$$

тодi:

$$t_{ПО}^\phi = Q_{ПО}^\phi \cdot V_g^a / L_{ПО}^a \cdot C_{ПО}^\phi = 786,2 \cdot 6,83 / 4,8 \cdot 1,34 = 840^\circ\text{C},$$

де $L_{ПО}^a = 4,8 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ – кiлькiсть повітря необхідного для спалення газу при $a_n = 0,5$.

Отже, для забезпечення в робочій камері безокислювальної печі необхідної технологiчної температури необхідно заздалегiдь пiдгiривати повітря до температури 840°C .

Література

1. Колесник Ф.И. Нагрев и нагревательные устройства, сб. "Машины и технология обработки металлов давлением".- К.:Вища школа, 1987 - с. 112...124.
2. Краснокутський П.Г., Колесник Ф.І. Теплотехнічні процеси і конструкції нагрівальних печей. - К.:Вікол,1995 – 246 с.
3. Телегин А.С., Авдеева В.Г. Теплотехника и нагревательные устройства. - М.: Машиностроение, 1985. – 237 с.
4. Филимонов Ю.П., Громова Н.С. Топливо и печи. - М.: Металлургия, 1987. - 318 с.