# **РОЗДІЛ 7. Практика розрахунків тепломасообміних процесів**

В металургії та машинобудуванні, при виробництві різних технологічних продуктів одним з основних видів устаткування є високотемпературні теплотехнологічні установки – промислові печі, в яких здійснюється нагрів або термічна обробка сталі та сплавів. Якість роботи печей визначає якість готової продукції. В прокатних цехах металургійних заводів метал нагрівають для збільшення його пластичності в печах різного типу: нагрівальних колодязях, в методичних печах, в печах з крокуючим подом і з крокуючими балками, в печах з обертаючимся та викочуючимся подом, в печах швидкісного нагріву.

На заводах чорної металургії термічній обробці з метою зміни структури і споживацьких властивостей піддається сортовий прокат, листи, рейки та інші продукти. Для отжигу сортового прокату частіше всього застосовують термічні печі камерного типу. Перевага камерних печей в їх універсальності, оскільки в них можуть бути забезпечені практично будь-які режими нагріву. В той же час їм властивий значний недолік – в них не досягається абсолютна рівномірність нагріву металу і вони не придатні для безперервного потокового виробництва.

В даному прикладі буде розглянутий один з поширених режимів нагріву металу в камерних термічних печах.

Метою розрахунку є побудова графіка нагріву, на якому повинні бути відображені зміни в часі температури поверхні і центру заготівок, зміни температури печі, зміни температури кладки, зміни температури газів, а також величина щільності теплового потоку на поверхню металу.

**7.1.** **Основні відомості для розрахунку нагріву металу**

Розрахунку нагріву металу передують розрахунки горіння палива, а саме: перерахунок сухого складу палива на вологий газ, визначення теплоти згоряння палива і визначення частки первинних газів в робочій суміші, визначення теоретично і дійсно необхідної кількості повітря, визначення кількості і складу димових газів, визначення густини палива і густини продуктів повного згоряння палива. Для перевірки розраховують матеріальний баланс процесу горіння. Проводять розрахунок розмірів робочого простору печі, виходячи з кількості, розміщення і розміру заготівок, а потім виконують розрахунок параметрів теплообміну в робочому просторі.

Основною задачею розрахунків нагріву металу в печах є знаходження зміни температури поверхні і центру заготівок в часі . При нагріві у виробі виникає перепад температур **Δt**між більш нагрітими шарами поверхні з температурою **tп** і найменш нагрітими внутрішніми шарами з температурою **tц**, тобто різниця температур буде складати Δt = tп – tц.

Перепад температур визначається тепловим опором виробу Rλ = S/λ (**S** - товщина металу, що прогрівається, **λ** - коефіцієнта теплопровідності) і залежить від умов нагріву металу, а саме: коефіцієнту тепловіддачі на поверхні **α***,* щільностітеплового потоку **q**, швидкості нагріву тощо.

У багатьох випадках різниця температур по перетину металу виявляється незначною, якою можна знехтувати. Такі вироби називаються *термічно «тонкими» тілами*. Вони характеризуються або невеликою товщиною шару **S**, що прогрівається, або великим значенням коефіцієнта теплопровідності ***λ***при невеликій інтенсивності нагріву. Умовно розділити тіла, що нагріваються, на *термічно «тонкі»* і *термічно «масивні»* можна визначивши *критерій Біо*

.

Вироби поводяться при нагріві як *термічно «тонкі» тіла* за умови, що критерій Біо має значення . При значеннях критерію Біо  тіла можуть бути віднесений як до термічно «тонких» тіл так і до термічно «масивних» тіл залежно від цілі розрахунку та рішення дослідника.

Якщо значення критерію Біо має значення *Bi ≥ 0,5*, то тіла в процесі нагріву визначаються як *термічно «масивні»*, для яких не можна нехтувати перепадом температур по перетину тіла **Δt**.

Для розрахунку нагріву металу необхідно знати його теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності **λ**, питому теплоємність **с**, енталь-пію (тепловміщення) **i***,* щільність сталі **ρ**, коефіцієнт температуропровідності **а**. Якщо ці характеристики не задані у вигляді явної залежності від температури λ=f(t), с=f(t), i=f(t)*,* то необхідно спочатку визначити склад сталі по довіднику (додаток Б, таблиця 1), а потім розрахувати теплофізичні характеристики.

Розрахувати коефіцієнт теплопровідності **λ** вуглецевої сталі в залежності від її складу при 0°С можна по емпіричній формулі, Вт/(м⋅К)

,

де С, Mn, Si– вміст вуглецю, марганцю та кремнію в сталі, %.

Значення коефіцієнту теплопровідності **λ** при різних температурах визначаються по наступній залежності [1]:

λ200 = 0,95 λ0; λ600 = 0,75 λ0; λ1000 = 0,68 λ0;

λ400 = 0,85 λ0; λ800 = 0,68 λ0; λ1200 = 0,73 λ0.

Далі необхідно побудувати графік залежності коефіцієнта теплопровідності від температури λ=f(t)*.*

Визначити щільність сталі **ρ**можна по формулі, кг/м3:

,

де С, Mn, Si– вміст вуглецю, марганцю і кремнію в сталі, %.

За даними додатку Б, таблиці 2, 3 необхідно побудувати функцію залежності тепловміщення (ентальпії) сталі від температури i=f(t)*.*

Для розрахунків рекомендується прийняти режим нагріву, що складається з двох періодів:

***перший період*** – нагрів при постійній температурі печі (tпіч=const);

***другий період*** – період витримки, вирівнювання температур протікає при постійній температурі поверхні металу (tп = const).

Розбиваємо у свою чергу перший період нагріву при tпіч = const*,* на два інтервали:

* в *першому інтервалі* першого періодуметал нагрівається від заданої початкової температури поверхні**tп0** до деякої проміжної температури поверхні, що приймається на рівні *tn1* = (600...650) °*С*;
* в *другому* *інтервалі* першого періоду метал нагрівається від прийнятої *tn1* до заданої кінцевої температури поверхні металу **tn.к.**, яка визначається за завданням.

Приймаємо температуру печі **tпіч** в першому інтервалі рівній температурі гріючого середовища, яка на 100 °С вище, ніж кінцева температура поверхні заготівки за завданням

tпіч = (tп.к +100)°С*.*

Нагрів металу в печі може бути *одностороннім*, якщо метал укладений безпосередньо на подину печі, або *двостороннім*, якщо метал розташований на спеціальних металевих підставках (проложках). Якщо був заданий односторонній нагрів (заготівки укладені на поду печі без зазорів), то прогріваєма товщина металу **S** рівна висоті садження S = hc, а саме товщині заготівки S = hc= ас*.* При двошаровому укладанні прогріваєма товщина металу **S** рівна подвоєній товщині заготівки S = hc = 2⋅ас. Якщо заданий двосторонній нагрів, то прогріваєма товщина рівна половині висоти садження **hc**:S = hc /2*.*

**7.2. Вихідні дані для розрахунку**

Для розрахунку нагріву металу потрібні наступні вихідні дані.

Вид термообробки - отжиг.

Спосіб укладання нагріваємих заготівок, один із запропонованих:

1) на поду печі без зазорів;

2) на поду печі в два шари без зазорів;

3) на підставках (проложках) без зазорів;

4) на підставках (проложках) в два шари без зазорів.

Матеріал нагріваємих заготівок – марка сталі.

Товщина заготівки, що нагрівається, – **ас***.*

Початкова температура металу – **t0**.

Кінцева температура поверхні металу – **tп.к**.

Перепад температур по перетину металу в кінці нагріву – **Δtк**.

Ступінь чорноти системи нагріву „газ-кладка-метал” – .

Ступінь чорноти системи нагріву „піч-метал” – .

Вихідні дані можуть бути вибрані студентом самостійно з додатку В, відповідно до свого варіанту. Правила формування варіантів вихідних даних для розрахунків пояснюються викладачем. Наприклад, варіант ***3М***, формується таким чином: ***3*** – *порядковий* *номер студента,* ***М*** *– перша літера повного ім’я.*

**7.3. Розрахунок нагріву металу**

## **7.3.1 Перший інтервал першого періоду нагріву**

7.3.1.1 Щільність теплового потоку на початку цього інтервалу, Вт/м2:

,

де **1,1**– коефіцієнт, що враховує тепловіддачу конвекцією (10%), оскільки тем-пература в печі вище 8000С; **Тпіч** – абсолютна температура печі, К; Тпіч= tпіч+273; **Тп0**– абсолютна початкова температура поверхні, К; Тп0 = t0+273; **Спіч -м** - коефіцієнт випромінювання системи «піч-метал», Вт/(м2⋅К4). Сп-м*=* Со, С0 = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорно-го тіла; ** - ступінь чорноти системи нагріву «піч-метал», за завданням.

7.3.1.2 Щільність теплового потоку в кінці першого інтервалу, Вт/м2:

,

де **Tп1** – абсолютна температура поверхні металу в кінці першого інтервалу, К; Тп1= tп1 +273.

7.3.1.3 Коефіцієнт тепловіддачі  на початку нагріву, Вт/(м2⋅К):

.

7.3.1.4 Коефіцієнт тепловіддачі  в кінці першого інтервалу нагріву, Вт/(м2⋅К): .

7.3.1.5 Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в першому інтервалі, Вт/(м2⋅К): .

7.3.1.6 Середнє значення коефіцієнта теплопровідності на початку нагріву визначається по формулі, Вт/(м⋅К):

,

де **λ1**, **λ2**, **λ3**– коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м⋅К), які визначені по графіку λ=f(t)або по таблицях*,* при відповідних температурах: **λ1**– при початковій температурі на поверхні **tп0***,* Вт/(м⋅К);**λ2**– при початковій температурі в центрі **tц0** (tц0 = tп0)*,* Вт/(м⋅К); **λ3**– при температурі на поверхні в кінці першого інтервалу **tn1**, яка була прийнята раніше, Вт/(м⋅К).

7.3.1.7 Критерій Біо **Bi** для визначення термічної масивності тіла в першому інтервалі визначається по формулі:

,

де **S**– прогріваєма товщина металу, м.

7.3.1.8 Температурний критерій поверхні в кінці першого інтервалу **Фп1** (іноді він позначається як **θ**):

,

де **Тср0** - абсолютна середня температура по перетину заготівки на початку першого інтервалу, К; (Увага! Тср0 = tср0+273, tср0 = t0).

7.3.1.9 Критерій Фурье **Fo1**  для відомих критеріїв **Bi1**і **Фп1** визначається:

.

Допоміжні коефіцієнти **δ2**та**P** залежать тільки від критерія Біо **Bi**, визначаються по таблиці 4 додатка Б.

Потім, використовуючи знайдене значення критерія Фурье **Fo1** і критерія Біо **Bi1**визначаємо температурний критерій центру **Фц1**за формулою

.

Температурний критерій центру **Фц1**містить потрібну температуру центру в кінці першого інтервалу **tц1**:

.

Допоміжні коефіцієнти **δ2***,* **P***,* **N** визначаються по таблиці 4 додатка В.

Температура центру заготівки в кінці першого інтервалу нагріву визначається з температурного критерію центру **Фц1**по формулі, °С:

.

7.3.1.10 По знайденому першому значенню **tц1** уточнюємо коефіцієнт теплопровідності, а потім відповідно уточнюємо наступні величини **λср1, Bi1, Фn1**, **Fo1**, **Фц1**, **tц1** (пункти 7/3/1.7–7/3/1.9). При цьому коефіцієнт **λср1**усередню-ється як по товщині заготівки, так і за часом, тобто за формулою:

,

де**λ4**– коефіцієнт теплопровідності при температурі центру в кінці першого інтервалу **tц1**; **λ1**, **λ2**, **λ3**– коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м⋅К), які були визначені в п. 7.3.1.6

Повторно розраховане (пункти 7.3.1.7–7.3.1.9), уточнене значення темпе-ратури центру **tц1**використовується в подальших обчисленнях.

7.3.1.11 Перепад температур по перетину заготівки в кінці першого інтервалу, °С: *.*

7.3.1.12 Середня температура по перетину заготівки в кінці першого інтервалу, оС: .

Визначивши середню температуру по перетину заготівки **tср1** по графіках i=f(t) або по таблицях віднаходимо значення тепловміщення (ентальпії) сталі при середній температурі **tср1**.

7.3.1.13 Розрахункова середня питома теплоємність сталі в першому інтервалі **сср1**, кДж/(кг⋅К): .

7.3.1.14 Середнє значення коефіцієнта температуропровідності **аср** в першому інтервалі, м2/с: ,

де **ρ**– щільність сталі, кг/м3.

Час нагріву (в секундах) в першому інтервалі **τ1**знаходимо із значення критерію Фурье в першому інтервалі: ,

де **S**– прогріваємо товщина металу, м.

Тоді тривалість нагріву в першому інтервалі, с: .

7.3.1.16 Температура газу на початку першого інтервалу нагріву металу, °С:

*,*

де **q0** – щільність теплового потоку на початку нагріву, визначений в пункті 7.3.1.1, Вт/м2; **Тп0** – абсолютна початкова температура поверхні металу, К; **Сг-к-м** *-* коефіцієнт випромінювання системи «газ-кладка-метал», Вт/(м2.К4).:

*Сг-к-м=Со*, де С0 = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання або-лютно чорного тіла; ** - ступінь чорноти системи нагріву «газ-кладка-метал», що приймається за завданням.

7.3.1.17 Температура газу в кінці першого інтервалу, °С:

*,*

де **q1** – щільність теплового потоку в кінці першого інтервалу, який був визначений в пункті 7.3.1.2, Вт/м2; **Тп1**– абсолютна температура металу в кінці першого інтервалу, К; **Сг-к-м**- коефіцієнт випромінювання системи «газ-кладка-метал», Вт/(м2⋅К4).

7.3.1.18 Температура кладки на початку нагріву **tкл0** визначається виходя-чи з температури кладки в кінці нагріву **tкл3** з урахуванням її охолоджування за час завантаження металу,°С: ,

де **tкл3** – температура кладки в кінці нагріву, °С (буде визначений пізніше, в пункті 7.3.12). Температура кладки в кінці першого інтервалу визначається за формулою, °С: *tкл1 = 2·tпіч - tг1* .

## **7.3.2 Другий інтервал першого періоду нагріву**

Другий інтервалпершого періоду нагріву розраховується аналогічно першому інтервалу, при цьому кінцеві значення температури і інших параметрів для першого інтервалу є початковими значеннями для другого.

При визначенні температурних критеріїв **Фп2**та**Фц2** замість **tср0**потрібно використовувати середню температуру по перетину заготівки в кінці першого інтервалу **tср1**, тобто:

,

.

Аналогічно розрахункам для першого інтервалу визначаємо для другого інтервалу величини **tц2**, **Δt2**, **tср2**, **сср2**, **aср2** і час нагріву в другому інтервалі **τ2**.

Загальний час нагріву в першому періоді *τI* складається з часу першого та другого інтервалів, с: .

Дані розрахунку двох інтервалів першого періоду нагріву будуть використані для побудови графіка нагріву металу в першому періоді.

## **7.3.3 Другий період нагріву – період витримки**

Тривалість другого періоду нагріву (періоду витримки), залежить від ступеня вирівнювання температур **δ**. Період витримки можна розглядати як третій розрахунковий інтервал (індекс у всіх параметрів **3** або **II**).

7.3.3.1 Ступінь вирівнювання температур: ,

де **Δtк** – задана різниця температур по перетину металу в кінці нагріву, °С;**Δt2** – різниця температур по перетину металу в кінці другого інтервалу, в кінці першого періоду, тобто на початку періоду витримки, °С.

7.3.3.2 Середнє значення коефіцієнта теплопровідності в періоді витримки, Вт/(м⋅К): ,

де **λ5**– коефіцієнт теплопровідності при температурі на поверхні **tn** в період витримки (tn= const*,* була задана), Вт/(м⋅К); λ6 – коефіцієнт теплопровід-ності при температурі в центрі на початку періоду витримки **tц2**, Вт/(м⋅К); **λ7**– коефіцієнт теплопровідності при температурі в центрі в кінці витримки **tц3**, Вт/(м⋅К).

7.3.3.3 Середня температура в кінці другого інтервалу **tср2** і в кінці періоду витримки (третього інтервалу) **tср3**, °С:



7.3.3.4 Розрахункова теплоємність в періоді витримки, кДж/(кг⋅К):

.

7.3.3.5 Середнє значення коефіцієнта температуропровідності, м2/с:

,

де **ρ** - щільність сталі, кг/м3.

7.3.3.6 Значення коефіцієнта вирівнювання **m**можна визначити по [1] (рис. 67 стор. 207). Приблизно коефіцієнт вирівнювання **m**для нашого випадку можна визначити по формулі:

*m = 0,15/δ* ,

де **δ**- ступінь вирівнювання температур (пункт 7.3.3.1).

7.3.3.7 Тривалість вирівнювання температур **τвир**в секундах одержуємо з урахуванням значення коефіцієнта вирівнювання **m**по формулі:

,

де **m** *-* коефіцієнт вирівнювання температур; **аср3** - середнє значення коефіцієнта температуропровідності, м2/с;**S**– прогріваєма товщина металу, м.

Тривалість витримки при термообробці **τII**для завершення структурних перетворень приймається рівній подвоєному часу вирівнювання, тобто:

.

7.3.3.9 Щільність теплового потоку на метал в кінці витримки, Вт/м2:

,

де **λср3** - середнє значення коефіцієнта теплопровідності в періоді витримки, Вт/(м⋅К); **Δtк** – задана різниця температур по перетину металу в кінці нагріву, °С; **S**– прогріваєма товщина металу, м.

7.3.3.10 Температура газу в кінці витримки °С:

**,

де **Тnз** – абсолютна температура поверхні заготівок в кінці нагріву, К.

Кінцева температура поверхні металу tп.к = tп3 визначається із завдання (Увага ! *Тп3=* *tп3+273*).

7.3.3.11 Температура печі в кінці витримки, °С:

.

7.3.3.12 Температура кладки в кінці витримки, °С:

.

7.3.3.13 Загальний час нагріву τзаг включає час першого і другого періоду, с: .

7.3.3.14 За даними розрахунків будуємо графік нагріву, на якому відображаємо зміну температури поверхні і центру заготівок, перепаду температур по перетину заготівки, температури печі, температури кладки, температури газів, а також величину щільності теплового потоку **q**, як функції часу (дивись рисунок 7.1).

**7.4 Приклад розрахунку нагіву металу.**

Розрахунок нагріву металу виконано для наступних вихідних даних:

Вид термообробки: отжиг.

Спосіб укладання заготівок, що нагріваються: 1) на поду печі без зазорів;

Матеріал заготівок, що нагріваються (марка сталі): сталь У10.

Товщина заготівки, що нагрівається, *ас*:

ас = 145 мм = 0,145м*.*

Початкова температура металу: t0 = 10 °С.

Кінцева температура поверхні металу: tп.к.= 790 °С.

Перепад температур по перетину металу в кінці нагріву: Δtк = 12 °С.

Ступінь чорноти системи нагріву „газ-кладка-метал”: = 0,66.

Ступінь чорноти системи нагріву „піч-метал”: ** = 0,80*.*

***Розрахунок нагріву металу***

Для розрахунку нагріву металу необхідно знати його теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності **λ**, питому теплоємність **с**, ентальпію (тепловміщення) **i**, щільність металу ****, коефіцієнт температуропровідності **а**тощо. Якщо ці характеристики не задані у вигляді явної залежності від температури λ=f(t), с=f(t), i=f(t),то необхідно спочатку визначити по довіднику склад сталі, що нагрівається, а потім розрахувати необхідні теплофізичні характеристики.

Визначаємо склад сталі У10, наприклад за додатком А або за даними [1, стор. 512]:

*C* = 1,0 %; *Mn* = 0,5 %; *Si* = 0,25 %; *P* = 0,045 %; *S* = 0,04 %,

де С, Mn, Si, P, S– відповідно вміст вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору та сірки в сталі, %.

Розраховуємо коефіцієнт теплопровідності 0 сталі У10 при 0 °С:

0 = 1,163(60 - 8,7 С - 14,4 Mn - 29,0 Si) =

= 1,163(60 - 8,7.1,0 - 14,4.0,5 - 29,0.0,25) = 42,86 Вт/(м⋅К).

Значення коефіцієнту теплопровідності  при різних температурах **t**:

200  = 0,95.0 = 0,95.42,86 = 40,72 Вт/(м.К);

400  = 0,85.0 = 0,85.42,86 = 36,43 Вт/(м.К);

600  = 0,75.0 = 0,75.42,86 = 32,14 Вт/(м.К);

800  = 0,68.0 = 0,68.42,86 = 29,14 Вт/(м.К);

1000 = 0,68.0 = 0,68.42,86 = 29,14 Вт/(м.К);

1200 = 0,73.0 = 0,73.42,86 = 31,23 Вт/(м.К).

Будуємо графік залежності коефіцієнта теплопровідності  від температури  = *f(t)*.

Визначаємо густину сталі  по формулі:

 = 7880 - 40C - 16Mn - 73Si;

 = 7880 - 40.1,0 - 16.0,5 - 73.0,25 = 7813,7 кг/м3.

За даними [додаток А, таблиця 2] визначаємо тепловміщення (ентальпію) стали **it**при різній температурі **t**:

t = 100 °С i100 = 48,6 кДж/кг; t = 700 °С i700 = 421,9 кДж/кг;

t = 200 °С i200 = 99,2 кДж/кг; t = 800 °С i800 = 544,3 кДж/кг;

t = 300 °С i300 = 154,5 кДж/кг; t = 900 °С i900 = 605,0 кДж/кг;

t = 400 °С i400 = 211,0 кДж/кг; t = 1000 °С i1000 = 670,7 кДж/кг;

t = 500 °С i500 = 274,1 кДж/кг; t = 1100 °С i1100 = 741,1 кДж/кг;

t = 600 °С i600 = 346,3 кДж/кг; t = 1200 °С i1200 = 804,3 кДж/кг.

Будуємо графік залежності ентальпії сталі У10 від температури i =f(t).

Для розрахунків приймаємо режим нагріву, що складається з двох періодів:

* ***перший період*** - нагрів при постійній температурі печі (*tпіч  = const*);
* ***другий період*** - період витримки, вирівнювання температур здійснюється при постійній температурі поверхні металу (*tп = 790 = const*).

Розбиваємо у свою чергу перший період нагріву на два інтервали. В першому інтервалі метал нагрівається від початкової температури поверхні tп0 = 10 °С до температури поверхні металу tп1 = 650 °С, в другому інтервалі - від tп1 = 650 °С до заданої температури поверхні металу в кінці нагріву tп.к = 790 °С.

Температура печі в першому інтервалі:

tпіч= tп.к + 100 =790 + 100 = 890 °С.

Нагрів приймаємо одностороннім, тому що заготівки укладені на поду печі без зазорів. Тоді товщина металу, що прогрівається **S**, дорівнює висоті садження та дорівнює висоті заготівки:

S = hc = ас = 0,145 м.

* + 1. **Перший інтервал першого періоду нагріву**

7.4.1.1 Щільність теплового потоку на початку першого інтервалу:





де 1,1 - коефіцієнт, що враховує тепловіддачу конвекцією (10%), оскільки

температура печі вище 800 °С; Спіч-м - коефіцієнт випромінювання системи «піч-метал», який визначається по формулі:

Спіч-м = Со.= 5,67⋅0,80 = 4,536 Вт/(м2⋅К4),

де С0 = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ** - ступінь чорноти системи нагріву «піч-метал», приймається за завданням *= 0,80*.

7.4.1.2 Щільність теплового потоку в кінці першого інтервалу:

,

.

7.4.1.3. Коефіцієнт тепловіддачі на початку нагріву (на початку першого інтервалу):

.

7.4.1.4 Коефіцієнт тепловіддачі в кінці першого інтервалу:

.

7.4.1.5 Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в першому інтервалі:

.

7.4.1.6 Середнє значення коефіцієнта теплопровідності в першому інтервалі за визначеними температурами, Вт/(м⋅К):



де λ1, λ2, λ3 - коефіцієнти теплопровідності, які визначаються по графіку =*f(t)* при відповідних температурах, а саме: λ1 - при початковій температурі на поверхні *tп0 = 10 °С,* Вт/(м⋅К); λ2 - при початковій температурі в центрі *tц0 = 10 °С*, Вт/(м⋅К); λ3 - при температурі на поверхні в кінці першого інтервалу *tп1=650 °С*, Вт/(м⋅К);

.

7.4.1.7 Значення критерію Біо в першому інтервалі:

.

7.4.1.8 Температурний критерій поверхні **Фn1** в кінці першого інтервалу нагріву: .

7.4.1.9 Для відомого значення критерія Вi1=0,62 по таблиці 4 додатку Б визначаємо допоміжні коефіцієнти: δ2 = 0,5104; P = 0,818; N = 1,083.

Для відомого температурного критерія Фn1=0,273 визначаємо критерій Фур’єдля першого інтервалу Fo1:

.

Знаючи критерій Фур’є визначимо температурний критерій центру для першого інтервалу  **Фц1**:

,

який містить шукану температуру центру **tц1** в кінці першого інтервалу.

Температура центру заготівки в кінці першого інтервалу нагріву для **Фц1**= 0,36:



7.4.1.10 По знайденому першому значенню **tц1** уточнюємо середній коефіцієнт теплопровідності *λср1*, а потім відповідно уточнюємо значення **Вi1**,**Фn1**, **Fo1**, **Фц1**, **tц1**(пункти 7.4.1.7–7.4.1.9). При цьому коефіцієнт **λср1**усередню-ється як по товщині заготівки, так і за часом, тому що вже відома температура центру **tц1**: ,

де *λ4* – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м⋅К), при температурі центру в кінці першого інтервалу **tц1.**

При температурі центру tц1 = 573,2 °С коефіцієнт теплопровідності λ4=32,71 Вт/(м⋅К).

Середній коефіцієнт теплопровідності:

*.*

Відповідно уточнюємо значення критеріїв **Вi1**, **Фn1**, **Fo1**, **Фц1**:

Вi1= 0,65; Фn1 = 0,273; Fo1 = 2,07; Фц1 =0,365 ,

та отримуємо уточнене значення температури центруtц1 =569 °С*.*

Оскільки різниця значень температури центру **tц1**(перше значення tц1 = 573,2 °С) не перевищує 1%, то уточнення закінчуємо, приймаємо tц1 =569 °С.

7.4.1.11 Перепад температур по перетину заготівки в кінці першого інтервалу: Δt1 = tп1 - tц1 = 650 – 569 = 81 °С.

7.4.1.12 Середня температура по перетину заготівки в кінці першого інтервалу: tср1= tп1 -2/3Δt1 =650-2/3 81= 596°С.

По графіку i=f(t)знаходимо значення тепловміщення сталі при середній температурі **tср1**: i(tср1) =343,4 кДж/кг.

7.4.1.13 Розрахункова середня теплоємність в першому інтервалі:

.

7.4.1.14 Середнє значення коефіцієнта температуропровідності *а* в першому інтервалі: .

7.4.1.15 Час нагріву (в секундах) в першому інтервалі **τ1** знаходимо зі уточненого значення критерію Фур’є Fo1 = 2,07:

,

.

7.4.1.16 Температура газу на початку першого інтервалу:

,

де  – щільність теплового потоку на початку нагріву, яка була визначена в пункті 7.4.1.1, q0 = 90961,8 Вт/м2;Сг-к-м *-*  коефіцієнт випромінювання системи «газ-кладка-метал», Вт/(м2.К4):

*Сг-к-м = Со.=* *5,67 0,66 = 3,74* *Вт/(м2⋅К4),*

деС0 = 5,67 Вт/(м2⋅К4) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

** - ступінь чорноти системи нагріву «газ-кладка-метал», що приймається за завданням *= 0,66*.

Тоді .

7.4.1.17 Температура газу в кінці першого інтервалу:

,

.

7.4.1.18 Температуру кладки на початку нагріву **tкл0** визначаємо виходячи з температури кладки в кінці нагріву **tкл3** з урахуванням її охолоджування за час завантаження металу на 100…300 °С (приймаємо охолодження рівним 200 °С):

tкл0 = tкл3 - 200 = 808 – 200 = 608°С,

де tкл3 – температура кладки в кінці нагріву °С (буде визначений пізніше, в пункті 7.4.3.12).

7.4.1.19 Температура кладки в кінці першого інтервалу, °С:

tкл1 = 2·tпіч - tг1 = 2·890 – 945 = 835 °С.

**7.4.2. Другий інтервал першого періоду нагріву**

Аналогічно першому розраховується другий інтервал першого періоду нагріву, при цьому кінцеві значення температури і інших параметрів для першого інтервалу є початковими значеннями для другого інтервалу.

7.4.2.1 Щільність теплового потоку та коефіцієнт тепловіддачі на початку другого інтервалу дорівнюють кінцевим значенням цих величин для першого інтервалу.

7.4.2.2 Щільність теплового потоку в кінці другого інтервалу:

,

.

7.4.2.3 Коефіцієнт тепловіддачі в кінці другого інтервалу:

.

7.4.2.4 Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в другому інтервалі:

.

7.4.2.5 Середнє значення коефіцієнта теплопровідності в другому інтервалі, Вт/(м⋅К): 

де λ3, λ4, λ5 - коефіцієнти теплопровідності, які визначаються по графіку *=f(t)* при відповідних температурах, а саме: λ3 - при початковій температурі на поверхні tп1 = 650 °С,Вт/(м⋅К); λ4 - при початковій температурі в центрі tц1 = 569 °С, Вт/(м⋅К); λ5 - при температурі на поверхні в кінці другого інтервалу tп2 = 790°С, Вт/(м⋅К);

.

7.4.2.6 Значення критерію Біо в другому інтервалі:

.

7.4.2.7 Температурний критерій в кінці другого інтервалу **Фn2**, з урахуванням того, що tп2 = tп.к = 790 °С, а tср1 = 596 °С (Увага! Т = t + 273);

.

7.4.2.8 Для відомого значення критерія Вi2 = 1,18 по таблиці 4 додатка Б визначаємо коефіцієнти: δ2 = 0,829; P = 0,694; N = 1,132.

Для відомого критерія Фn2 =0,34 визначаємо критерій Фур’є**Fo2**:

.

Знаючи критерій Фур’є визначимо температурний критерій центру **Фц2**:

,

який містить шукану температуру центру **tц2** в кінці другого інтервалу.

Температура центру заготівки в кінці другого інтервалу нагріву:

.

7.4.2.9 По знайденому першому значенню **tц2** уточнюємо коефіцієнт теплопровідності **λср2**, а потім відповідно уточнюємо**Вi2**, **Фn2**, **Fo2**, **Фц2**, **tц2**(пункти 7.4.2.6 – 7.4.2.8). При цьому коефіцієнт **λср2**усереднюється як по товщині заготівки, так і за часом, тому що вже відома температура центру **tц2**:

,

де**λ6**– коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м⋅К), при температурі центру в кінці другого інтервалу **tц2**. При температурі центру tц2 = 727,4 °С коефіцієнт теплопровідності λ6 = 32,14 Вт/(м⋅К).

Середній коефіцієнт теплопровідності:

*,*

Відповідно уточнюємо значення критеріїв та температуру центру **tц2**:

Вi2=1,18, Фn2 = 0,34, Fo2 =0,856, Фц2 =0,553 , tц2 =727,4 °С.

Оскільки різниця значень температури центру **tц2**не перевищує 1%, то уточнення закінчуємо, приймаємо остаточно tц2 =727,4 °С.

7.4.2.10 Перепад температур по перетину заготівки в кінці другого інтервалу: Δt2 = tп2 – tц2 *=* 790 – 727,4 = 62,6°*С*.

7.4.2.11 Середня температура по перетину заготівки в кінці другого інтервалу: tср2= tп2 -2/3Δt2 *=*790 - 2/3 62,6 = 748,3°*С.*

По графіку i=f(t)знаходимо значення тепловміщення сталі при середній температурі **tср2**: i(tср2) =481,0 кДж/кг*.*

7.4.2.12 Розрахункова середня теплоємність в другому інтервалі:

.

7.4.2.13 Середнє значення коефіцієнта температуропровідності *а* в другому інтервалі: .

7.4.2.14 Час нагріву в другому інтервалі:

.

7.4.2.15 Температура газу в кінці другого інтервалу:

,

.

7.4.2.16 Температура кладки в кінці другого інтервалу, °*С*:

tкл2 = 2·tпіч - tг2 = 2·890 – 918,3 ≈ 861,7*°С*

7.4.2.17 Загальний час нагріву в першому періоді **τI**:

τI =τ1+τ2 = 5250 +4092 = 9343с ≈ 2,6 ч

Отримані результати розрахунку використовуються для побудови графіка нагріву в першому періоді.

**7.4.3 Другий період нагріву – період витримки**

Тривалість другого періоду нагріву (періоду витримки), залежить від ступені вирівнювання температур **δ**.

7.4.3.1 Ступінь вирівнювання температур **δ**: ,

де Δtк = 12 °С- задана різниця температур по перетину металу в кінці нагріву;

Δt2 = 62,6 °С - різниця температур в кінці другого інтервалу, тобто на початку періоду витримки, °*С*.

7.4.3.2 Середнє значення коефіцієнта теплопровідності в періоді витримки, Вт/(м⋅К): ****,

де λ5, λ6, λ7 - коефіцієнти теплопровідності при відповідних температурах; λ5 - коефіцієнт теплопровідності при температурі на поверхні tп2 = tп3 = 790°С в період витримки (tп = const), Вт/(м⋅К); λ6 - коефіцієнт теплопровідності при температурі в центрі на початку витримки tц2 = 727,4°С*,* Вт/(м⋅К); λ7 - коефіцієнт теплопровідності при температурі в центрі в кінці витримки **tц3***,* Вт/(м⋅К)*.*

Температура в центрі в кінці витримки **tц3**:

*tц3*= *tп3 - Δtк = 790 - 12 = 778*°*С*.

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності в періоді витримки, Вт/(м⋅К):  *Вт/(м⋅К).*

7.4.3.3 Середня температура в кінці другого інтервалу**tср2** і в кінці періоду витримки (який можна враховувати як третій інтервал ) **tср3**:

, .

7.4.3.4 Розрахункова середня теплоємність в періоді витримки:

.

7.4.3.5 Середнє значення коефіцієнта температуропровідності **а**в періоді витримки: ,

де - щільність сталі, кг/м3.

7.4.3.6 Коефіцієнт вирівнювання температури **m**:

m=0,15/δ=0,15/0,192=0,781.

7.4.3.7 Тривалість вирівнювання температур:



7.4.3.8 Тривалість періоду витримки **τII** при термообробці для завершення структурних перетворень приймається рівній подвоєному часу вирівнювання:

τII=2τвир= 2·5292=10584 с ≈ 2,94 год.

7.4.3.9 Щільність теплового потоку в кінці періоду витримки:

.

7.4.3.10 Температура газу в кінці періоду витримки, °С :

,

,

де Тп3 - абсолютна температура поверхні заготівок в кінці нагріву, К;

Тп3 = 790 + 273 = 1063 К.

7.4.3.11 Температура печі в кінці витримки:



.

7.4.3.12 Температура кладки в кінці витримки:

tкл3 = 2·tпіч3 - tг3 = 2· 812 - 816 = 808 °С.

7.4.3.13 Загальний час нагріву, включаючи час першого і другого періодів:

*τзаг. = τI + τII = 9299,5+ 10584= 19872,5 с ≈ 5,5 год.*

7.4.3.14 За даними розрахунків будуємо ***графік нагріву***, на якому відображаємо зміну температури поверхні і центру заготівок, зміну температури печі, температури кладки, температури газів, перепаду температур по перетину заготівки, а також відбиваємо величину густини теплового потоку, як функції часу (рис.7.1).

Для зручності побудови графіку заносимо всі визначені параметри в таблицю 7.1.

*Таблиця 1*–

**Параметри для побудови графіку нагріву металу в камерній печі**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Періоди нагріву металу | | | |
| Початок нагріву,  τ = 0 | Кінець першого інтервалу,  τ = τ1 | Кінець другого інтервалу,  τ = τ2 | Кінець періоду витримки,  τ = τII |
| Температура поверхні **tп,**°С | 10.0 | 650.0 | 790.0 | 790.0 |
| Температура центру **tц,**°С | 10.0 | 569.0 | 727.4 | 778.0 |
| Перепад температур **∆t**,°С | 0.0 | 81.0 | 62.4 | 12.0 |
| Температура газового середовища **tг**,°С | 976.6 | 945.0 | 918.3 | 816.0 |
| Температура печі **tпіч**,°С | 890.0 | 890.0 | 890.0 | 812.0 |
| Температура кладки **tкл,**°С | 608.0 | 835.0 | 861.7 | 808.0 |
| Щільність теплового потоку **q**, Вт/м2 | 90961.8 | 55068.2 | 27573.2 | 4894.3 |

Рис.7.1 – Графік нагріву металу, зміни температури та щільності теплового потоку в часі