

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри МЛВ
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КУЗИК
« ____ » _____ 20 ____ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему:
"Проектування і розрахунок індукційної тигельної печі
продуктивністю 5 т/год."

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ПМ(ОЛ)-20
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Олександр РАДІОНОВ
« ____ » _____ 20 ____ р.

Керівник бакалаврської роботи
Старший викладач
_____ Микола БОСІЙ
« ____ » _____ 20 ____ р.

Рецензент
канд. техн. наук, старший викладач
_____ Любомир ОЛІЙНИЧЕНКО
« ____ » _____ 20 ____ р.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: механіко-технологічний

Кафедра: матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛІВ

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

«____» _____ 20__р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДО-
БУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Радіонова Олександра Петровича

- 1.Тема роботи: Проектування і розрахунок індукційної тигельної печі продуктивністю 5 т/год
2. Керівник роботи: Старший викладач Босий Микола Вікторович
3. Строк подання роботи до захисту
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи вивчення конструкції роботи тигельної печі та основних електротехнічних характеристик печі та розрахувати основні розміри проектованої печі. Визначити матеріальний і тепловий баланси печі.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення розрахунку основних розмірів, електротехнічних характеристик, матеріальний та тепловий		

	баланси проектного обладнання		
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівнику		
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту		
5	Перевірка роботи на плагіат		
6	Зовнішнє рецензування роботи		
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії		

Дата видачі завдання

«___»_____20__р.

Підпис керівника

_____ Микола БОСІЙ

Завдання прийнято до виконання

«___»_____20__р.

Підпис здобувача

_____ Олександр РАДІОНОВ

АНОТАЦІЯ

Радіонов О.П. "Проектування і розрахунок індукційної тигельної печі продуктивністю 5 т/год." спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024. – 40с. Матеріали ілюстрації 2 іл.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення конструкції роботи тигельної печі та основні електротехнічні характеристики печі і основні розміри проектованої печі. Визначити матеріальний і тепловий баланси печі.

В даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розрахована індукційна тигельна піч ємністю 5 т/год.

В розрахунок індукційної тигельної печі входять: розрахунок індукційної тигельної печі, розрахунок індуктора та його основних розмірів, а також матеріальний і тепловий баланси проектованого обладнання.

Графічна частина включає загальний вид індукційної тигельної печі а також індуктора.

індукційна тигельна піч, індуктор, матеріальний баланс, тепловий баланс.

ABSTRACT

Radionov O.P. "Design and calculation of an induction crucible furnace with a capacity of 5t/h." specialty 131 "Applied mechanics", OPP - "Computer engineering of technologies, robotics and 3D printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024. - 40p. Illustration materials 2 images.

The purpose of the qualification work is to study the design of the crucible furnace and the main electrical characteristics of the furnace and the main dimensions of the designed furnace. Determine the material and heat balances of the furnace.

In this bachelor's qualification work, an induction crucible furnace with a capacity of 5 t/h is calculated.

The calculation of the induction crucible furnace includes: the calculation of the induction crucible furnace, the calculation of the inductor and its main dimensions, as well as the material and heat balances of my equipment design.

The graphic part includes a general view of the induction crucible furnace and the inductor.

induction crucible furnace, inductor, material balance, heat balance.

З М І С Т

	Стор.
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ.....	8
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ.....	11
РОЗДІЛ 3. ТИГЕЛЬНА ІНДУКЦІЙНА ПІЧЬ ТА ЇЇ РОБОТА.....	16
РОЗДІЛ 4. ПРОЦЕС ПЛАВКИ ЧАВУНУ В ТИГЕЛЬНІЙ ПЕЧІ.....	19
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ.....	21
РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ	28
РОЗДІЛ 7. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ	32
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36
ДОДАТКИ.....	37
Додаток 1. Індукційно тигельна піч.....	38
Додаток 2. Основні розміри тигельної індукційної печі.....	39
Додаток 3. Індуктор тигельної індукційної печі.....	40

ВСТУП

Розвиток обладнання в машинобудівному виробництві на даному етапі вказує на застосування сучасних та дуже нових матеріалів, таких як метали та сплави, а також неметалеві матеріали з відповідними фізико-механічними властивостями [1,4,5].

Сталі та чавуни виплавляють в сучасних плавильних агрегатах, це конвертори, індукційно тигельні печі, дугові сталеплавильні печі.

В цих плавильних агрегатах забезпечується повне розкислення металу і його очищення від дуже шкідливих домішок, а також необхідне вигідне регулювання теплового режиму плавки [1,4,5].

Новітнє плавильне обладнання також забезпечує високу якість лиття сплаву, продуктивність та кращі умови праці і мінімальний угар елементів.

В індукційно тигельних печах (ІТП) плавлять високоякісний сплав чавуну та стал, а також кольорових сплавів. Ці сплави потребують високої чистоти, однорідності хімічного складу, що неможливо зробити в інших агрегатах для плавки металу [1,4,5].

При порівнянні плавильних агрегатів найбільш продуктивні печі, які виплавляють метал високої чистоти та якості з меншими втратами, низьким вмістом сірки в металі є відповідно тигельні індукційні печі [1,4,5].

РОЗДІЛ 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

У ІТП плавлять такі сплави, як сталь, чавун, а також і кольорові сплави (бронза, алюміній).

Принцип дії ІТП наступний: метал пронизують змінним магнітним полем, тому під дією електрорушійної сили в рідкому металі протікає електричний струм, при цьому метал буде нагріватися і здійснюватись його плавлення [1,2].

Тигель з вогнетривкого матеріалу розташовується в індукторі. Об'єм тигля заповнюється розплавленим металом. А сам тигель буде захищати індуктор від розплавленого сплаву. На електричні параметри печі впливає товщина стінки тигля, то тим більше буде кількість магнітних силових ліній, які пронизують котушку і також менше $\cos\varphi$ печі [1,2].

Щоб зменшити індуктивну потужність печі виконують наступне: паралельно індуктору підключають конденсатори, а саме число конденсаторів, які підключаються у ході плавки змінюється тому, що змінюється електричний опір шихти, а також її магнітні властивості.

Струм високої частоти проходить через індуктор та конденсаторну батарею. Шини і кабель достатнього перерізу треба використовувати для з'єднання індуктора з конденсаторною батареєю.

Призначення індуктора – це створення магнітного потоку, який проходить по замкнутим лініям.

Розрізняють відкриту, екрановану та закриту конструкцію печей в залежності від магнітного потоку, який проходить з боку індуктора.

Якщо маємо відкриту конструкцію печі то магнітний потік з боку індуктора проходить по повітрю. Навколо індуктора простір пронизують силові лінії магнітного поля. Каркас печі виготовляють з неметалевих матеріалів, які розташовуються на такій відстані від індуктора, щоб не впливало магнітне поле на них. Ближче до індуктора використовують дерев'яні конструкції або з азбоцементу. А ті елементи, які виготовляють зі сталі, то вони розташо-

вуються на більшій відстані від індуктора. Конструкція відкритих печей має звичайно невеликі габаритні розміри [1,2,3].

В екранованій конструкції печі з боку індуктора магнітний потік відділяється від сталевих конструкцій екраном із міді. Так як мідь володіє невеликим електричним опором, а виділення потужності в тілі, яке розташоване в електромагнітному полі буде залежати від його опору тому в мідному екрані енергія магнітного поля поглинається в меншій кількості [1,2,3].

При наявності екрану сталі елементи конструкції розташовуються на ближній відстані до індуктора, а це, в свою чергу, зменшує розміри плавильного агрегату.

В закритій конструкції плавильного агрегату з боку індуктора магнітний потік проходить по магнітопроводам, які розташовуються радіально з пакетів трансформаторної сталі. Так як магнітна проникність трансформаторної сталі в декілька разів більше магнітної проникності самого повітря, а весь магнітний потік буде проходити по магнітопроводам, тому самі магнітопроводи вигідно розташовувати ближче до індуктора, що зменшує розміри печі. В залежності від потужності печі і також від частоти живлячого струму та характеристики трансформаторної сталі визначають кількість магнітопроводів та їх розміри [1,2,3].

Закриту конструкцію печі використовують для більшої продуктивності.

Для роботи тигельної печі суттєве значення має частота струму, який живить індукційну піч, якщо відповідній продуктивності печі і електричному опору шихти відповідає ця певна частота струму. При цьому треба враховувати наступне, що внутрішній діаметр тигля завжди дорівнює 3,5 глибини проникнення струму в шихту при виборі частоти струму [1,2,3].

Переваги тигельної печі [1,2]:

- висока чистота сплаву;
- невелика кількість неметалевих включень;
- метал в печі менше поглинає водень;
- менше окислення ванни;

- однорідний сплав;
- рівномірний хімічний склад сплаву;
- отримання високих температур сплаву;
- невеликі габарити печі в порівнянні з іншими агрегатами;
- кращі техніко-економічні показники в порівнянні з іншими печами;

Недоліки ІТП [1,2,3]:

- холодні шлаки;
- забрудненні реакції між сплавом та шлаком;
- забрудненні процеси рафінування;
- більш вартісне обладнання;
- значні затрати на обслуговування;
- потрібно більш кваліфіковані фахівці для обслуговування обладнання печі.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

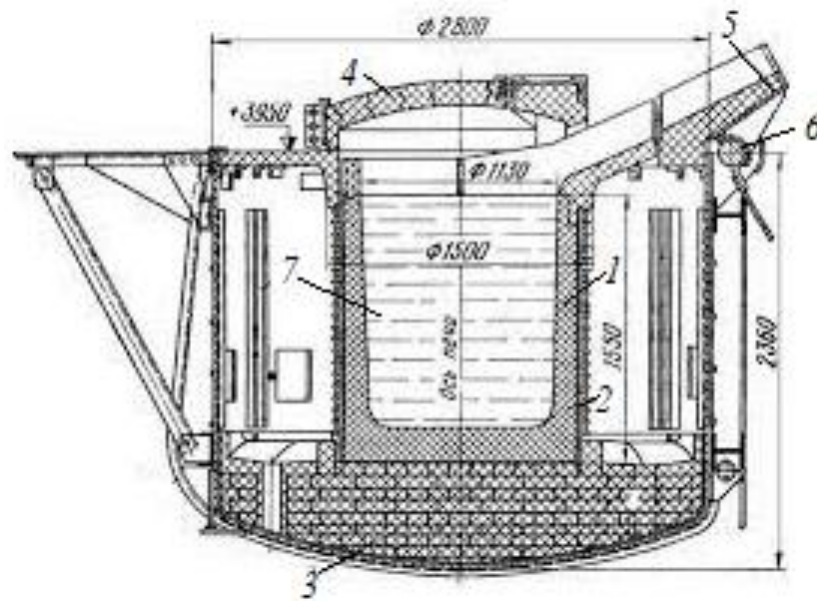


Рис. 1. Схема конструкції індукційної тигельної печі: 1 – тигель; 2 – індуктор; 3 – под печі; 4– футерована кришка; 5–сифонний жолоб; 6 – вісь поворотна; 7 – метал, який нагрівається

Основні частини тигельні печі наступні: індуктор, магнітопроводи, каркас, футеровка, механізм нахилу, електрообладнання та система охолодження печі (рис.1).

Індуктор. Індуктор має форму циліндричної котушки з мідною трубкою. Виготовляють його з міді тому, що такий сплав буде поглинати менше енергії електромагнітного поля, ніж інші, такі як сталь та інші сплави. Профіль мідної трубки може бути наступним: круглим, квадратним, прямокутним. В залежності від частоти струму також вибирають товщину стінки мідної трубки. Товщина мідної стінки трубки повинна бути більше глибини проникнення струму приблизно на 30 %, щоб забезпечити мінімальні втрати енергії в трубці. Також розмір отвору в трубці повинен бути відповідним витратам охолоджувальної води. А поперечний переріз мідної трубки повинен залежати від сили струму, який буде протікати по індуктору [1,2,3,6].

Індуктор також має штуцера, за допомогою яких відбуваються підведення і відведення води для процесу охолодження та електроенергії для живлення самого індуктора при процесі плавлення металу. За технологією плав-

ки металу між витками самого індуктора встановлюють також електроізоляційні прокладки. В індукторі надійна електрична ізоляція одного витка від іншого забезпечується покриттям шару епоксидної смоли.

Верхній рівень індуктора в тигельних печах встановлюють трохи нижче рівня металу, при цьому зменшується меніск на поверхні ванни і також неможливо викидання сплаву з тигля через електродинамічну циркуляцію.

Використовують наступну конструкцію для кріплення індуктора, в якій кожний виток індуктора кріпиться до вертикальних стійок латунними шпильками, а самі стійки виготовляють з азбоцементу або можливо також із твердих порід деревини [1,2,3,6].

Магнітопровід. Запобігаючи процесу нагрівання металевих частин тигельної печі магнітними полями розсіювання навколо індуктора необхідно встановлювати зовнішній магнітопровід з листової трансформаторної сталі. Магнітопровід, по можливості, складається також із окремих пакетів, які розташовані рівномірно по периметру самого індуктора.

Магнітопроводи за технологією для індукційних печей виготовляють зі сталі, товщиною 0,5 мм, а для печей, наприклад, підвищеної частоти це товщина 0,35 мм. Довжина відповідних пакетів магнітопроводу повинна бути більше висоти індуктора. До каркасу печі пакети із трансформаторної сталі повинні кріпитися відповідно болтами і їх встановлюють впритул до індуктора, це дає можливість забезпечувати жорсткість конструкції та мінімальне розсіяння магнітного потоку [1,2,3,6].

Каркас. Каркас індукційних печей повинен сприймати навантаження, які виникають при плавленні металу в печі, а також її нахилу, при зливанні металу та шлаку. Тому для печей невеликої продуктивності їх каркас можна виготовляти із деревини і азбоцементу та немагнітних металів. Для печей великої продуктивності каркас виготовляють із профільної сталі він повинен мати велику жорсткість і міцність [1,2,3,6].

Футеровка. До футеровки тигельної печі в процесі роботи печі пред'являються відповідні вимоги. Вона має властивість витримувати меха-

нічне навантаження рідкого сплаву, це дуже важливо для печей великої ємності. Властивістю футеровки для виплавлення металу в індукційній печі є велика щільність, для того щоб рідкий метал не просочився через неї. А от з боку індуктора футеровка тигля печі повинна бути незпikшоюся, це можливість попередження утворення в ній наскрізних тріщин. В щільному зпikшомуся шарі футеровки можуть утворитися тріщини при плавленні сплаву в печі, а рідкий метал, який потрапляє по них в незпikшийся шар, буде розігрівати його, і футеровка, зпикаючись, закриває при цьому тріщину. Щоб не проникав метал до індуктора необхідно наявність цього незпikшогося шару. Час служби печі залежить від стійкості самої футеровки. В процесі плавки металу в ІТП застосовують як кислі так і основні вогнетривкі матеріали [1,2,3,6].

Футеровка печі включає саму подину, тигля, верхнього кільця та кришки. Для виготовлення футеровки печі застосовують перше вогнетривкі маси, а для подини – це фасонні вогнетривкі вироби.

Механізм нахилу. В процесі розливки сплаву в форми каркас ІТП з індуктором і футеровкою разом потрібно нахиляти на $90-100^{\circ}$. В індукційних печах невеликої ємності використовують ручні механізми нахилу (наприклад, лебідки). Печі великої ємності, як правило, обладнанні механізмом нахилу з гідравлічним приводом, тобто нахиляють піч гідравлічним циліндром, який з'єднаний за допомогою шарнірів з каркасом і рамою печі, яка встановлена на фундаменті.

Гідравлічний циліндр відповідно гнучкими шлангами з'єднаний також з насосною станцією. В гідросистемі печі використовують негорючі рідини як заміна масла, це відповідає безпеці експлуатації [1,2,3,6].

Електрообладнання. До електрообладнання печі входять такі елементи – це трансформатор, перетворювач частоти струму, конденсаторні батареї, щити керування і кабелі живлення. Піч для процесу плавлення металу повинна під'єднуватися до мережі високої напруги через вимикач. Підведення необхідної напруги до індуктора в залежності від режиму роботи ІТП виконується за допомогою трансформатора [1,2,3].

Компенсування індуктивної потужності самого індуктора виконується двома конденсаторними батареями. Одну батарею вмикають постійно, а іншу – за необхідністю. В процесі роботи індукційні тигельні печі, які можливо працюють на підвищеній або високій частоті, повинні мати також додатковий перетворювач частоти.

Система охолодження печі. Більшість конструктивних елементів печі, наприклад, індуктор, конденсатори, кабелі живлення струмом, повинні працювати тільки при дуже інтенсивному їх охолодженні.

Для процесу охолодження переважно використовують воду. Печі невеликої продуктивності охолоджують відповідно водою. Печі великої ємності охолоджують уже спеціально підготовленою для цього водою [1,2,3].

РОЗДІЛ 3. ТИГЕЛЬНА ІНДУКЦІЙНА ПІЧЬ ТА ЇЇ РОБОТА

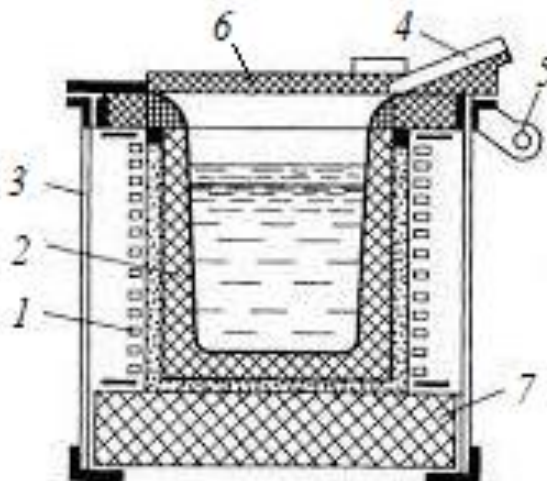


Рис. 2. Схема тигельної індукційної печі:

1 – індуктор; 2 – тигель; 3 – каркас; 4 – жолоб для зливу металу; 5 – вісь поворотна; 6 – футерована кришка; 7 – під печі

Нагрівання металу (сплаву) в ІТП відбувається при використанні індуктора. При протіканні змінного струму в індукторі буде виникати магнітне поле. А шихта в цьому магнітному полі нагрівається, так як змінний магнітний потік буде збуджувати в ньому змінну електрорушійну силу і віхровий струм, тому шихта плавиться і утворюється рідкий метал в тиглі, який розташований в індукторі печі (рис.2).

При нагріванні шихти та плавленні металу виділяється певна кількість теплоти, яка залежить від магнітної проникності металу, чим більша буде ця магнітна проникність металу, то інтенсивніше відбувається нагрівання і плавлення його і більше буде виділятися теплоти [1,2,3,7].

На початку роботи тигельної печі необхідно перевірити та переглянути всі її елементи обладнання: перше переглянути футеровку і в разі наявності недоліків ліквідувати їх;

друге – перевірити котушку, її ізоляцію, а також кріплення витків, тоді очистити витки від пилу і вологи, потім продути стисненим повітрям їх від внутрішнього пилу, також перевірити з'єднання водопровідних шлангів і подати воду в котушку, тоді після пуску води перевірити її проходження через

шланги, далі перевірити тиск і температуру води, яка надходить за манометром і термометром;

третє – перевірити механізм нахилу та стан кріплення бронзових гайок, які пересуваються по ходовим гвинтам та перевірити також ізоляційну прокладку в муфті;

четверте – необхідно перевірити ізоляцію відповідних з'єднань залізних частин корпусу тигельної печі;

п'яте – перевірити систему вентиляції в конденсаторній, також в машинному приміщенні і включити її;

шосте – перевірити увімкнення рубильника мотору, генераторний рубильник та вимикачі конденсаторів;

сьоме – включити трансформатор, який живить мотор-генератор, а також перевірити напругу за вольтметром на щиті або на приладах в трансформаторній [1,2,3,7].

Завантаження печі. При завантаженні шихти необхідно дотримуватись наступних вимог: шихта щільна та повинна складатися, по можливості, з великих кусків; для найщільнішого заповнення об'єму тигля необхідно класти по чергово ці шматки різних розмірів;

на висоту котушки також необхідно завантажувати садку, тому що метал, який виходить за саму котушку, при цьому маємо втрати на охолодження; куски металу, по можливості, треба викладати кільцями паралельно виткам котушки, а коли шихта має плоскі шматки, то їх потрібно викладати в горизонтальній площині;

необхідно завантажувати повністю тигель, тому що неповне завантаження тигля шихтою невеликими порціями веде до частого відкривання кришки, а це дає втрати на охолодження [1,2,3,7].

Ввімкнення печі. Після закінчення завантаження печі шихтою виконують правила з дотриманням їх певної послідовності:

вмикають рубильник мотору;

вмикають ємність, яка відповідає даній завантаженій шихті;

на щиті вмикають головний рубильник, який замикає ланцюг “генератор-піч” з паралельним або послідовним приєднанням до печі відповідної ємності;

уважно виводять реостат в ланцюгу збудження генератора маховичком від регулятора головного струму, при цьому слідкують за показниками приладів і не допускають переходу стрілок за червону лінію;

виконують наладку на резонанс, вмикаючи і вимикаючи при цьому конденсатори і слідкують також за приладами;

ознака добре налагодженої роботи печі – це стан, коли сила струму в індукторі максимальна, а стрілки всіх приладів генератора не повинні виходити за межі червоної лінії.

Наладка печі проводиться при вимкненому струмі, тому для запобігання охолодження садки необхідно здійснювати її дуже швидко [1,2,3,7].

РОЗДІЛ 4. ПРОЦЕС ПЛАВКИ ЧАВУНУ В ТИГЕЛЬНІЙ ПЕЧІ

Процес плавки чавуну в тигельних печах має свої деякі особливості.

Конструкція тигельних печей для плавки чавуну має ряд певних особливостей: наявності глибокої ванни, відповідної поверхні, угару елементів, а забруднення металу газами значно менше, ніж в інших плавильних агрегатах.

Рідкий метал в ІТП піддається відповідно перемішуванню під дією ЕРС, це прискорює процеси плавки в рідкій ванні, а також процеси, які відбуваються між металом і шлаком [1,4,5].

В даний час ІТП для плавки чавуну знайшли широке використання для лиття невеликих виливок. Це в свою чергу пояснюється здатністю тигельної печі плавити та видавати метал через певний час порівняно невеликими порціями. ІТП для плавки чавуну дозволяє вести також і масове лиття на невеликій робочій площадці та використовувати невелику кількість оснастки. Отримуване при цьому чавунне литво має належний склад і високу якість.

Для плавки чавуну в тигельних печах з кислою футеровкою шихта повинна складатися з чистих відповідних металів з мінімальним вмістом фосфору і сірки, а вже для плавки в печах з основною футеровкою необхідно використовувати більший відсоток скрапу.

Склад шлаку необхідно підбирати таким чином, щоб він не заміщувався в розплавленому металі в печі, як з кислою і основною футеровкою, тобто шлак повинен мати дуже високий поверхневий натяг.

Нагрівання металу в тигельних печах без сердешника здійснюється від шихти, тому шлак холодніший за сам метал. Це є недоліком ІТП, що знижує здатність самого шлаку до металургійних процесів. А активність шлаку можна досягти підвищуючи його рідинотекучість присадкою типу плавикового шпату. Наряду з цим, тигельні печі без сердешника мають і такі недоліки: перше це значне роз'їдання футеровки під дією самого шлаку; друге затруднення ремонту футеровки печі внаслідок малої її товщини стінок і також вер-

тикального їх розташування, це тиглі невеликої продуктивності; третє обмежена ємність самої ванни. Плавлення металу в печі без сердешника здійснюється швидко, а хімічні реакції при цьому такі як дегазація, видалення неметалевих з'єднань протікають дуже інтенсивно [1,4,5].

В індукційно тигельній печі для плавки чавуну тигель футерують сухою кварцевою масою. На початку виконують футеровку поду печі, потім на внутрішній поверхні індуктора наносять шар кварцевої обмазки товщиною 10 мм, який після затвердіння обклеюють листами азбесту. Футеровку тигля виконують методом набивки шарами. Висота шару в залежності від продуктивності печі складає 70-100 мм. Зерновий склад набивної маси має вплив на довговічність набивної футеровки.

Завантаження шихти в тигельних печах, які мають більшу продуктивність виконують механізовано за декілька хвилин.

При складанні шихти треба враховувати, що при виплавленні чавуну в тигельній печі без сердешника та з кислою футеровкою складно зменшувати в металі вміст сірки та фосфору. Сірки і фосфору в шихтових матеріалах повинно бути як найменше, наприклад, не більше 0,05%. Чавун повинен мати мінімальний вміст фосфору. З рідкого металу можна видалити надлишок вуглецю, марганцю і кремнію. При плавленні чавуну в печі з кислою футеровкою доцільно враховувати, що шлак також утворюється частково і за рахунок піску, який прилипає до скрапу, а також кремнезему самої футеровки печі [1,4,5].

Процес плавки чавуну в тигельній печі з основною футеровкою відрізняється використанням будь-якого скрапу, а процес вигорання вуглецю, марганцю і кремнію повинен здійснюватись також досить швидко.

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

Розрахунок тигельної печі полягає у визначенні основних розмірів тигля та індуктора, а також треба визначити основні електротехнічні характеристики печі за відомими методиками [1,4,5,6,7].

Об'єм рідкого металу

$$V_{\text{м}} = G/\rho = 5/7,2 = 0,694 \text{ м}^3; \quad (5.1)$$

де G – ємність тигля, т.; $\rho = 7,2 \text{ т/м}^3$ щільність чавуну.

Внутрішній діаметр тигля:

$$d_0 = \sqrt{4V_{\text{м}}/\pi B} = \sqrt{4 \cdot 0,694/3,14 \cdot 1,3} = 0,87 \text{ м} \quad (5.2)$$

де B – коефіцієнт вказує у скільки разів висота самого металу в тиглі $h_{\text{м}}$ буде більше його d_0 , і який залежить від ємності тигля. Приймаємо $B = 1,3$.

Висота металу у тиглі:

$$h_{\text{м}} = B \cdot d_0 = 1,30 \cdot 0,87 = 1,131 \text{ м} \quad (5.3)$$

Товщина стінки тигля:

$$S_1 = 0,15 \cdot d_0 = 0,15 \cdot 0,87 = 0,130 \text{ м} \quad (5.4)$$

Виконуємо розрахунок для 3-х характерних умов для визначення частоти струму

Для цього випадку 1-а умова – тигель заповнений твердою шихтою з температурою 20°C .

Питомий електричний опір чавуну:

$$\rho_{M_1} = 20 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad (5.5)$$

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 40 \quad (5.6)$$

Середній розмір шматка шихти для плавки металу:

$$d_{\text{м}} = \frac{d_{\text{min}} + d_{\text{max}}}{2} = \frac{0,1 + 0,3}{2} = 0,2 \text{ м} \quad (5.7)$$

Мінімальна частота струму для живлення процесу плавки чавуну:

$$f_{\min 1} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_1}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{20 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot 0,2} = 3,12 \text{ Гц} \quad (5.8)$$

Для цього випадку 2-а умова – тигель заповнюється твердою шихтою, але з температурою 800 °С.

Питомий електричний опір чавуну:

$$\rho_{M_2} = 110 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (5.9)$$

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 1 \quad (5.10)$$

Мінімальна частота струму:

$$f_{\min 2} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_2}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{110 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,2} = 687,5 \text{ Гц} \quad (5.11)$$

Для цього випадку 3-а умова – тигель заповнений рідким сплавом з температурою 1500 °С.

Питомий електроопір чавуну:

$$\rho_{M_3} = 125 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (5.12)$$

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 1 \quad (5.13)$$

Мінімальна частота струму:

$$f_{\min 3} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_3}}{\mu_1 \cdot d_0^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{125 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,87^2} = 41,28 \text{ Гц} \quad (5.14)$$

Приймаємо $f = 50 \text{ Гц}$.

Товщина шару теплоізоляційного азбесту

$$S_2 = 0,005 \text{ м.} \quad (5.15)$$

Внутрішній діаметр індуктора

$$D_{\epsilon} = d_0 + 2(S_1 + S_2) = 0,87 + 2(0,130 + 0,005) = 1,140 \text{ м.} \quad (5.16)$$

Корисна теплова потужність печі $P_{\text{кор}} = W_{\text{теор}} \cdot \Pi'$,

де $W_{теор}$ – теоретична питома витрата енергії, $W_{теор} = 560$ кВт·год/т; Π' – плавильна продуктивність печі, т/год.

Плавильна продуктивність печі

$$\Pi' = \Pi(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) / \tau_2 = 5(0,44 + 0,18 + 0,42 + 0,061) / 0,18 = 30,58 \text{ т/год} \quad (5.17)$$

де τ_1 – час завантаження шихти в піч, год.; τ_2 – час плавки, год.; τ_3 – час доведення металу, год.; τ_4 – час зливу металу з печі, год.; Π – продуктивність печі т/год;

$$P_{кор} = W_{теор} \cdot \Pi' = 560 \cdot 30,58 = 17124,8 \text{ кВт} \quad (5.18)$$

Активна потужність печі $P_a = P_{кор} / \eta_{терм}$,

де $\eta_{терм} = 0,8$ - термічний ККД печі

$$P_a = 17124,8 / 0,80 = 21406 \text{ кВт} \quad (5.19)$$

Висота індуктора

$$h_i = 1,29 h_m = 1,29 \cdot 1,131 = 1,458 \text{ м} \quad (5.20)$$

Розмір проникнення струму в металі

$$\Delta e = 503 \sqrt{\rho_m / \mu_m f} = 503 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} / 1 \cdot 50} = 0,079 \text{ м} \quad (5.21)$$

Напруга магнітного поля в індукторі

$$H = 10^3 / K_s \sqrt{\frac{P_a}{6,2 \cdot d_0 h_m A_m \sqrt{\rho_m \mu_m f}}} \quad (5.22)$$

де K_s – коефіцієнт, що враховує самоіндукцію і взаємоіндукцію, $K = 0,9$; A_m – коефіцієнт активної потужності вказує на кривизну чавунної садки в тиглі в залежності від відношення d_{0ca} до глибини проникнення струму в неї, $d_{0ca} / \Delta e = 0,87 / 0,079 = 11,01$, $A_m = 0,97$

$$H = \frac{10^3}{0,9} \sqrt{\frac{21406}{6,2 \cdot 0,87 \cdot 1,131 \cdot 0,97 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50}}} = 752,222 \cdot 10^3 \text{ А/м} \quad (5.23)$$

Визначаємо реактивну потужність садки, яка виділяється в металі

$$Q_m = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_0 \cdot h_m \sqrt{\rho_m \mu_m f} R_m K_s^2, \quad (5.24)$$

де R_m – поправочний коефіцієнт реактивної потужності, $R_m = 1$.

$$Q_m = 6,2 \cdot 10^{-6} (752,222 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,87 \cdot 1,131 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 0,9^2} = 220665,48 \text{ квар} \quad (5.25)$$

Реактивна потужність між металом та індуктором (в зазорі)

$$Q_z = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0 \cdot h_m \left[\left(\frac{D_e}{d_0} \right) - 1 \right] \quad (5.26)$$

$$Q_z = 6,2 \cdot 10^{-9} (752,222 \cdot 10^3)^2 \cdot 50 \cdot 0,87 \cdot 1,131 \left[\left(\frac{1,140}{0,87} \right)^2 - 1 \right] = 123751,58 \text{ квар} \quad (5.27)$$

Визначення товщини стінки трубки індуктора з наступних умов: це отримання мінімальних втрат P_u в індукторі

$$S_{mp} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot \Delta e, \quad (5.28)$$

де Δe – глибина проникнення струму в індуктор $\Delta e = 10 \text{ мм}$

$$S_{mp} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot 0,01 = 13 \text{ мм} \quad (5.29)$$

Втрати активної потужності в індукторі

$$P_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_e h_i A_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{z.i} \quad (5.30)$$

де ρ_i – питомий електроопір; μ_i – відносна магнітна проникність матеріалу індуктора, $\rho_i = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$: $\mu_m = 1$; A_i – поправочний коефіцієнт P_u враховує кривизну індуктора, $A_i = 0,95$; $K_{z.i}$ – коефіцієнт заповнення індуктора, $K_{z.i} = 0,8$.

$$P_u = 6,2 \cdot 10^{-6} (752,222 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,140 \cdot 1,458 \cdot 0,95 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 6911,14 \text{ кВт} \quad (5.31)$$

Реактивна потужність в індукторі

$$Q_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_e h_i R_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{z.i} \quad (5.32)$$

де $R_i = 0,8$ – поправочний коефіцієнт Q_u , він враховує кривизну індуктора,

$$Q_u = 6,2 \cdot 10^{-6} (752,222 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,140 \cdot 1,458 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 5823,60 \text{ квар} \quad (5.33)$$

Загальна активна потужність

$$P = P_m + P_u = 21406 + 6911,14 = 28317,14 \text{ кВт} \quad (5.34)$$

Загальна реактивна потужність

$$Q = Q_m + Q_z + Q_u = 220665,48 + 123751,58 + 5823,60 = 350240,66 \text{ квар} \quad (5.35)$$

Повна потужність (індуктор-метал)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{28317,14^2 + 350240,66^2} = 351371,4 \text{ кВт} \cdot \text{А} \quad (5.36)$$

Струм в індукторі

$$I = 10^3 S / U_i \quad (5.37)$$

де $U_i = 2430 \text{ В}$ – напруга на індукторі

$$I = 10^3 \cdot 351371,4 / 2430 = 144597 \text{ А} \quad (5.38)$$

Число витків індуктора

$$n = H \cdot h_i / I = 752,222 \cdot 10^3 \cdot 1,458 / 144597 = 8 \quad (5.39)$$

Крок витка індуктора

$$h_{\text{вит}} = h_i / n = 1,458 / 8 = 0,18 \text{ м} \quad (5.40)$$

Висота трубки індуктора

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{вит}} \cdot K_{\text{з.і.}} = 0,18 \cdot 0,8 = 0,14 \text{ м} \quad (5.41)$$

Товщина ізоляції між витками

$$h_{\text{ізол}} = h_{\text{вит}} - h_{\text{тр}} = 0,18 - 0,14 = 0,04 \text{ м} \quad (5.42)$$

Напруга струму у витках індуктора

$$U_{\text{вит}} = U_i / n = 2430 / 8 = 303,75 \quad (5.43)$$

Напруга ізоляції на один см

$$U_1 = 10^{-2} \cdot U_{\text{вит}} / h_{\text{ізол}} = 10^{-2} \cdot 303,75 / 0,04 = 7593 \text{ В} \quad (5.44)$$

Вибираємо трубку індуктора круглого перерізу 0,35 мм з $S_{\text{см}}$ 15 мм.

$F_{\text{тр}}$ трубки індуктора для електричного струму 942 мм². Щільність струму $590,625:942 = 0,63 \text{ А/мм}^2$, що допустимо.

Природній $\cos \varphi$ печі

$$\cos \varphi = P / S = 28317,14 / 351371,4 = 0,080 \quad (5.45)$$

Ємність конденсаторної батареї

$$C = 10^9 \cdot Q / 2\pi f U_k^2, \quad (5.46)$$

де U_k^2 – напруга на конденсаторі, дорівнює напрузі трансформатора,
 $U_k = 2430 \text{ В}$.

$$C = 350240,66 \cdot 10^9 / 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2430^2 = 1891775 \text{ мкФ} \quad (5.47)$$

Загальний переріз магнітопроводів

$$F_{m2} = U_i / 4,44 f n B \quad (5.48)$$

де B – індукція в магнітопроводі, $B = 0,6 \text{ Вб/м}^2$

$$F_{m2} = 2430 / 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 1 = 1,36 \text{ м}^2 \quad (5.49)$$

Площа поперечного перерізу одного магнітопроводу,
 (кількість магнітопроводів 24)

$$f_{m2} = 10^4 F_{m2} / N_{m2}, \quad (5.50)$$

де N_{m2} – число пакетів магнітопроводу навколо індуктора, $N_{m2} = 24$

$$f_{m2} = 10^4 \cdot 1,36 / 24 = 566 \text{ см}^2 \quad (5.51)$$

РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ

Матеріальний баланс плавки чавуну в індукційній тигельній печі враховує:

- 1) вихідні матеріали;
- 2) складання шихти;
- 3) загальний матеріальний баланс.

Шихта для плавки чавуну. Металева частина: чавунний лом 50-55%, власні відходи виробництва чавуну 37-40%, переробний чавун 2-3 % та феросплави [1,4,5,6,7].

Ливарні відходи включають в себе обрізки ливників, стружку, отриману після шабровки відповідних поверхонь болванок при видаленні таких шлакових вкраплень і т.п. Відходи також з інших цехів, які складаються з обрізків, кромок, вирізків та закатів.

Привозні відходи являють собою різний брухт, а старі вироби із окремих компонентів самої шихти або по складу аналогічні шихті, але відповідно з різним вмістом компонентів. Хімічний склад самих шихтових матеріалів для плавки чавуну приведено в табл.6.1.

Таблиця 6.1

Хімічний склад шихтових матеріалів

№ п/ п	Складові шихти	Вміст, %				
		C	Si	Mn	S	P
1	Чавунний лом	0,2	0,4	0,6	0,05	0,05
2	Власні відходи	0,46	0,36	0,65	0,05	0,05
3	Переробний чавун	4	0,7	0,75	0,01	0,1
4	Феросіліцій ФС75э	0,1	77	0,3	0,02	0,04
5	ФеромарганецьФМн 0,5	0,5	2	85	0,03	0,3

В процесі плавки шихти відбувається окислення і вигорають такі елементи: С – 20%; Fe – 25 %, Si – 50 %, Mn – 20 %, S – 40 %, P – 60 %.

Розрахунок матеріального балансу.

Вміст вуглецю при розплавленні металу

$$[C_p] = 0,46 \cdot 1,2 = 0,55 \quad (6.1)$$

Приймемо, відходи власного виробництва повинні становити 40 % від шихти.

Позначимо частку чавунного лому через x , а частку переробного чавуну через y та складемо систему рівнянь для визначення цих часток:

$$\begin{cases} x \cdot 0,2 + y \cdot 4 + 0,46 \cdot 0,4 = 0,55 \\ x + y + 0,4 = 1 \end{cases} \quad (6.2)$$

$$x = 0,6 - y$$

$$(0,6 - y) \cdot 0,2 + 4y = 0,366$$

$$3,8y = 0,246 \quad (6.3)$$

$$y = 0,065$$

$$x = 0,535$$

Наступний склад шихти:

$$5000 \cdot 0,4 = 2000 \text{ кг} - \text{власні відходи};$$

$$5000 \cdot 0,535 = 2675 \text{ кг} - \text{чавунний лом};$$

$$5000 \cdot 0,065 = 325 \text{ кг} - \text{переробний чавун П1}.$$

В процесі плавки чавуну окисляються С, Si, Mn, P, S, Fe в таких кількостях:

$$G_C = (0,535 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,46 + 0,065 \cdot 4) \cdot 5000 \cdot 0,2/100 = 5,51 \text{ кг}$$

$$G_{Si} = (0,535 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,36 + 0,065 \cdot 7) \cdot 5000 \cdot 0,5/100 = 10,087 \text{ кг}$$

$$G_{Mn} = (0,535 \cdot 0,6 + 0,4 \cdot 0,65 + 0,065 \cdot 0,75) \cdot 5000 \cdot 0,2/100 = 6,297 \text{ кг}$$

$$G_P = (0,535 \cdot 0,05 + 0,4 \cdot 0,05 + 0,065 \cdot 0,1) \cdot 5000 \cdot 0,6/100 = 1,575 \text{ кг} \quad (6.4)$$

$$G_S = (0,535 \cdot 0,05 + 0,4 \cdot 0,05 + 0,065 \cdot 0,01) \cdot 5000 \cdot 0,4/100 = 5,613 \text{ кг}$$

$$G_{Fe} = 5000 \cdot 0,25/100 = 12,5 \text{ кг}$$

$$\sum G_i \quad 41,582 \text{ кг}$$

При цьому процесі плавки утворюються та переходять в шлак відповідні оксиди:

$$\begin{aligned}
 G_{SiO_2} &= 10,087 \cdot 60/28 = 21,615 \text{ кг} \\
 G_{MnO} &= 6,297 \cdot 71/55 = 8,128 \text{ кг} \\
 G_{PO_2} &= 1,575 \cdot 63/31 = 3,200 \text{ кг} \\
 G_{SO_2} &= 5,613 \cdot 64/32 = 11,226 \text{ кг} \\
 G_{FeO} &= 12,5 \cdot 72/56 = 16,071 \text{ кг} \\
 \Sigma & \qquad \qquad \qquad 60,240 \text{ кг}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

Для ошлакування оксидів MnO і FeO передбачено завантаження в зава-
лку кварцевого піску відповідно в кількості 1:1

$$G_n = 8,128 + 16,071 = 24,199 \text{ кг} \tag{6.6}$$

Передбачаємо введення у ванну під час плавки оборотного шлаку у кі-
лькості приблизно 2% від маси металозавалки для створення достатньої тов-
щини шару шлаку

$$G_{об.шл.} = 5000 \cdot 2/100 = 100 \text{ кг} \tag{6.7}$$

Приймаємо наступне: в шлак переходить частина футеровки вагою
близько 0,5% від металозавалки:

$$G_{фут.} = 5000 \cdot 0,5/100 = 25 \text{ кг} \tag{6.8}$$

На окислення окремих елементів під час плавки чавуну витрачається
кисень із атмосфери печі:

$$\begin{aligned}
 G_{O_2,C} &= [5,510]16/12 = 7,346 \text{ кг} \\
 G_{O_2,Si} &= [10,087]32/28 = 11,528 \text{ кг} \\
 G_{O_2,Mn} &= [6,297]16/55 = 1,831 \text{ кг} \\
 G_{O_2,P} &= [1,575]32/31 = 1,625 \text{ кг} \\
 G_{O_2,Fe} &= [12,5]16/56 = 3,571 \text{ кг} \\
 G_{O_2,i} & \qquad \qquad \qquad 35,798 \text{ кг}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Утворюється СО:

$$G_{CO} = 0,176 \cdot 28/12 = 0,411 \text{ кг} \tag{6.10}$$

Кількість шлаку після розплавлення

$$G_{\text{ил}} = 60,240 + 24,199 + 100 + 25 = 209,439 \text{ кг} \quad (6.11)$$

або $209,439 \cdot 100 / 5000 = 4,2\%$ від маси металозавалки

Кількість металу після розплавлення

$$G_{\text{мет}} = 5000 - 41,582 = 4958,418 \quad (6.12)$$

Результати розрахунків приведемо у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Матеріальний баланс плавки чавуну
в основній індукційній тигельній печі ємністю 5,0 т

№ п/п	Статті (прибутку або видатку)	кг	% від м/з
	Прибутки:		
1	Чавунний лом	2675	53,5
2	Відходи власного виробництва	2000	40
3	Переробний чавун П1	325	6,5
4	Пісок	24,199	0,48
5	Оборотний шлак	100	2
6.	Футеровка	25	0,5
7.	Кисень атмосферний	35,798	0,70
	Σ	5184,997	103,68
	Видатки:		
1.	Метал	4958,418	99,16
2.	Шлак	209,439	4,18
3	Газ CO	17,140	0,34
	Σ	5184,997	103,68

Змінною маси металу та шлаку будемо під час доводки відповідно нехтувати.

Розрахунок кількості феросплавів для введення в метал виконуємо за формулою

$$G_{\phi} = \frac{G_{p.m.} ([E]_c - [E]_n)}{E_{\phi} \cdot K_E}, \quad (6.13)$$

де $G_{p.m.}$ – маса рідкого металу, кг; $[E]_c, [E]_n$ – середній вміст елемента у чавуні і початковий в металі перед розкисленням, у відсотках за масою; E_{ϕ} – вміст елемента-розкислювача у феросплаві, у відсотках за масою; K_E – коефіцієнт засвоєння елемента.

Вміст Mn і Si перед розкисленням:

$$\begin{aligned} [Mn]_n &= (0,535 \cdot 0,6 + 0,4 \cdot 0,65 + 0,065 \cdot 0,75) \cdot 0,8 = 0,5\% \\ Si_n &= (0,535 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,36 + 0,065 \cdot 0,7) \cdot 0,5 = 0,2\% \end{aligned} \quad (6.14)$$

Кількість феромарганцю

$$G_{FeMn} = \frac{4958,418(0,65 - 0,5)}{85 \cdot 0,7} = 12,5 \text{ кг} \quad (6.15)$$

Кількість феросиліцію

$$G_{FeSi} = \frac{4958,418(0,36 - 0,2)}{77 \cdot 0,7} = 14,72 \text{ кг.} \quad (6.16)$$

РОЗДІЛ 7. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Тепловий баланс печі є відношенням між прибутковою теплотою, а також видатковим теплом. Мета теплового балансу полягає у визначенні затрати електроенергії і вивчення відповідно теплового стану роботи печі.

Теплову енергію в індукційно тигельній печі отримуємо відповідно за допомогою процесу перетворення електричної енергії в теплову, а також завдяки термохімічним реакціям, наприклад, як окислення металу з виділенням теплоти. Вся тепла енергія використовується на нагрівання, розплавлення і перегрів металу, та на покриття електричних і теплових затрат в тигельній печі. Процеси втрати теплоти в довкілля трьома методами теплопровідності, конвекції та випромінювання [1,4,5,6,7].

Запишемо рівняння теплового балансу печі:

$$Q_{ел.ен.} + Q_{екз} = Q_m + Q_{шл} + Q_{кл} + Q_{охол} + Q_{випр} + Q_{виб}, \text{кВт} \quad (7.1)$$

де $Q_{ел.ен.}$ – витрата електроенергії, $Q_{екз}$ – теплота екзотермічних реакцій; $Q_m, Q_{шл}$ – тепловміст металу і шлаку; $Q_{охол}$ – втрати теплоти з охолоджуючою водою; $Q_{випр}$ – теплота випромінювання; $Q_{виб}$ – теплота вибивання газів.

Приймаємо відповідно тривалість завалки і плавки 1,35 год.

Теплота екзотермічних реакцій:

$$Q_{екз} = (11658 \cdot 5,510 + 27696 \cdot 10,087 + 6435 \cdot 6,297 + 4289 \cdot 12,5) / 1,35 \cdot 3600 = 90 \text{ кВт} \quad (7.2)$$

Витрата електроенергії

$$Q_{ел.ен.} = IU \cdot t / 3600 = 31602 \cdot 800 \cdot 1,35 / 3600 = 6788,6 \text{ кВт} \quad (7.3)$$

Теплота металу і шлаку при визначенні їх тепловмісту $t_m = 1450^\circ \text{C}$,

$$t_{шл} = 1400^\circ \text{C}$$

$$Q_m + Q_{шл} = [(0,9 \cdot 1450 + 50) \cdot 2958,418 + (1,89 \cdot 1400 - 1100) \cdot 209,439] / 1,35 \cdot 3600 = 5460,83 \quad (7.4)$$

$Q_{кл}$ визначаємо за формулою

$$Q_{кл} = \alpha(t_{кл} - t_{нов})F \quad (7.5)$$

де $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ефективний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією поверхні кладки до навколишнього повітря печі; $t_{\text{кл}} = 100^\circ \text{C}$ – температура зовнішньої поверхні кладки і $t_{\text{нов}} = 20^\circ \text{C}$ – температура повітря; F – величина зовнішньої поверхні печі.

$$F = 2\pi d^2/4 + \pi DL = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,14^2/4 + 3,14 \cdot 1,14 \cdot 1,312 = 1,097 \text{ м}^2 \quad (7.6)$$

$$Q_{\text{кл}} = 20(100 - 20) \cdot 1,09 = 1744 \text{ Вт} \quad (7.8)$$

Визначаємо $Q_{\text{охол}}$ при витраті води $2 \text{ м}^3/\text{год}$, $t_{\text{е}}^{\text{поч}} = 20^\circ \text{C}$, $t_{\text{е}}^{\text{кін}} = 45^\circ \text{C}$;

$$Q_{\text{охол}} = (2000/3600) \cdot 4,2(45 - 20) = 58,33 \text{ кВт} \quad (7.9)$$

Приймемо співвідношення для кінцевих двох статей видаткової частини теплового балансу

$$Q_{\text{випр}} + Q_{\text{виб}} = 0,2Q_{\text{ел.ен.}} = 0,2 \cdot 6788,6 = 1357,70 \text{ кВт} \quad (7.10)$$

Дані розрахунку теплового балансу наведемо у табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Тепловий баланс плавки чавуну в печі ємністю 5 т.

№ п/п	Статті прибутку	кВт	%	№п/п	Статті видатку	кВт	%
1	$Q_{\text{ел.ен.}}$	6788,6	99,87	1	$Q_{\text{м}} + Q_{\text{шл.}}$	5460,83	54,06
2	$Q_{\text{екз.}}$	90	0,13	2	$Q_{\text{кл.}}$	1,744	25,35
	Σ	6878,60	100	3	$Q_{\text{охол}}$	58,33	0,85
				4	$Q_{\text{випр}} + Q_{\text{виб}}$	1357,70	19,74
				5	Σ	6878,60	100

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній бакалаврській роботі розрахована індукційна тигельна піч ємністю 5,0 т/год з основною футеровкою для плавки чавуну. Описані основні електротехнічні характеристики печі та параметри роботи проектованої печі. Виконанні розрахунки матеріального та теплового балансу печі, а також визначені основні її розміри тигля і індуктора, а також розрахований індуктор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ. 2007. 280 с.
2. Хричиков В.Е., Меньяйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 89с.
3. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Теплотехніка ливарного виробництва» для студентів денної та заочної форм навчання на пряму 6.050402 «Ливарне виробництво». Укл.: Чубіна О.А., Кобзева А.І. Дніпродзержинськ. ДДТУ. 2016. 63с.
4. Костик К.О., Терентьев Д.П. Особливості розрахунку електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі. Процеси лиття. 2021. № 2 (144). С.42-52.
5. Костик К.О., Акімов О.В., Островерхова К.В. Дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі з кусковим завантаженням шихти для виплавки сталі 35Л. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні, 2020. №(2). С. 85–92.
6. Шокарьов Д.А. Конспект лекції з навчальної дисципліни «Енергетичні установки» обов'язкових компонент освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Електромеханіка. Тема № 4 Індукційні нагрівальні електроустановки. 2022. 18с.
7. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Рафінування переробного чавуну» з дисципліни «Позаагрегатна обробка розплавів» освітньо професійної програми другого (магістрського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання. Укл.: Чубін К.І., Похвалітий А.А. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 22 с.

ДОДАТКИ