

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 тигельної індукційної печі
продуктивністю 1 т/год."

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

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

Рецензент
канд. техн. наук, старший викладач
_____ Любош ОЛІЙНІЧЕНКО
« ____ » _____ 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 МЛВ

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

«_____» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Яцечка Олександра Юрійовича

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок тигельної індукційної печі продуктивністю 1 т/год.

2. Керівник роботи: Старший викладач Босий Микола Вікторович

3. Строк подання роботи до захисту

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: описати основні параметри роботи печі, конструкцію та основи роботи тигельної печі. Розрахувати основні її розміри, електротехнічні характеристики печі, матеріальний і тепловий баланси проєктованого обладнання.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

	характеристик, матеріальний та тепловий баланси проектованого обладнання, обробка фактичного матеріалу		
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 БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

«___»_____20__р.

Підпис здобувача

_____ Олександр ЯЦЕЧКО

АНОТАЦІЯ

Яцечко О.Ю. "Проектування і розрахунок тигельної індукційної печі продуктивністю 1 т/год." спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024. – 40 с. Матеріали ілюстрації 3 іл.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення конструкції роботи індукційної тигельної печі та основних параметрів роботи печі. Розрахувати основні її розміри, електротехнічні характеристики печі, матеріальний і тепловий баланси проектного обладнання.

В даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розрахована індукційна тигельна піч продуктивністю 1т/год, основні розміри та характеристики проектного обладнання, матеріальний та тепловий баланс. Розглянуто особливості плавки металу в тигельній печі та перспективи її використання.

В повний розрахунок індукційної тигельної печі входять: матеріальний баланс, тепловий баланс, розрахунок основних розмірів індукційної тигельної печі, розрахунок тигля, індуктора.

До графічної частини входить загальний вид індукційної тигельної печі та її індуктор.

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

ABSTRACT

Yatsechko O.Yu. " Design and calculation of a crucible furnace with a capacity of 1 t/h." specialty 131 "Applied mechanics", OPP - "Computer engineering of technologies, robotics and 3D printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024. - 40p. Illustration materials 3 images.

The purpose of the qualification work is to study the design of the induction crucible furnace and the main parameters of the furnace. Calculate its main dimensions, electrical characteristics of the furnace, material and heat balances of the designed equipment.

In this bachelor's qualification work, an induction crucible furnace with a capacity of 1t/h, the main dimensions and characteristics of the designed equipment, material and heat balance are calculated. Features of metal melting in a crucible furnace and prospects for its use are considered.

The complete calculation of the induction crucible furnace includes: material balance, heat balance, calculation of the main dimensions of the induction crucible furnace, calculation of the crucible, inductor.

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

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

З М І С Т

	Стор.
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Індукційна тигельна піч.....	8
РОЗДІЛ 2. Тигельна індукційна піч та її конструкція	12
РОЗДІЛ 3. Робота тигельної печі.....	16
РОЗДІЛ 4. Особливі процеси плавки чавуну в ІТП.....	19
РОЗДІЛ 5. Розрахунок індукційної тигельної печі.....	21
РОЗДІЛ 6. Матеріальний баланс ІТП.....	28
РОЗДІЛ 7. Тепловий баланс ІТП.....	32
Висновки.....	34
Список використаних джерел	35
ДОДАТКИ.....	36
Додаток 1. Основні розміри індукційної тигельної печі	37
Додаток 2. Компановка індукційної тигельної печі.....	38
Додаток 3. Загальний вигляд індукційної тигельної печі.....	39
Додаток 4. Індуктор ІТП.....	40

Вступ

На сучасному етапі розвитку науки та техніки все більше уваги і вимог пред'являється до металів і сплавів, задовольнити які можуть лише тільки сплави, які одержуються в процесі електроплавки. Чавун і сталь натеper виплавляють в конвертерних печах, наприклад, високоякісні метали і сплави, які потребують більш повного розкислення і найбільшого очищення від шкідливих домішок, необхідно використовувати електричні плавильні агрегати, в них можна створити будь-яку необхідну нам атмосферу [1,2].

В електричних печах більш вигідніше, ніж в паливних агрегатах, регулювати тепловий режим.

Тому електрична тигельна плавильна піч забезпечує дуже добру якість лиття і також мінімальний угар вартісних легуючих елементів, завдяки їй можна підвищувати в декілька разів продуктивність праці, а також покращити умови самої роботи печі [1,2].

Для плавлення, наприклад, високоякісного чавуну, сталей та інших спеціальних сплавів, що повинні мати особливу чистоту, однорідність та відповідний хімічний склад, застосовують тигельні індукційні печі тому, що в полумєневих і дугових печах це досягти ми не можемо [1,2].

Продуктивність тигельних індукційних печей в порівнянні з паливними печами, вища, крім того, плавлення в тигельних печах дає можливість одержати метал більш високої якості та з меншими втратами.

РОЗДІЛ 1. Індукційна тигельна піч

Індукційно тигельні печі дають можливість виплавляти не тільки чавун і сталь, але й інші різні метали і сплави, наприклад, мідь, бронза, алюміній.

Процес роботи тигельної печі полягає в тому, що розплавлені шихтові матеріали в просторі печі пронизуються змінним магнітним полем, при цьому під дією виникаючої ЕРС, в металі протікає струм, метал при цьому буде нагріватися і плавитися [1,2].

В індукторі в його середині розміщений тигель, який футерований вогнетривким матеріалом. Розплавлений метал заповнює весь внутрішній простір тигля. Індуктор від дії рідкого металу захищає тигель.

Товщина стінки тигля впливає на електричні параметри печі. Наприклад, чим буде товща стінка, тим більша кількість магнітних силових ліній, які відповідно пронизують котушку, не будуть брати участі в нагріванні металу і тим меншим буде $\cos \varphi$ печі. В тигельних печах $\cos \varphi = 0,05 \div 0,2$ [1,2,3].

Паралельно індуктору підключають конденсатори для зменшення індуктивної потужності печі, кількість яких під час плавлення металу змінюється, тому що в процесі нагрівання буде змінюватися електричний опір шихти, а в деяких випадках, наприклад, і її магнітні властивості.

По контуру, через індуктор і конденсаторну батарею, буде проходити струм великої сили. Індуктор з конденсаторною батареєю з'єднують, використовуючи шини і кабель великого перерізу [1,2,3].

Створений індуктором магнітний потік буде проходити звисно по замкнутих лініях, в середині його, а також і зовні. В залежності від того, як відбувається проходження магнітного потоку з зовнішнього боку індуктора можна розрізняти, наприклад, відкриту, екрановану і закриту конструкції печей.

Розглядаючи відкриту конструкцію, магнітний потік з зовнішнього боку індуктора буде проходити по повітрю. Силові лінії відповідного магнітного поля будуть пронизувати простір навколо індуктора.

Конструктивні елементи печі, такі як, деталі каркасу, повинні бути неметалевими, тому їх слід розташовувати на певній відстані від індуктора, щоб магнітне поле не впливало на них. Поблизу від індуктора треба використовувати елементи дерев'яної конструкції або з азбоцементу. Елементи з вуглецевої сталі навпаки повинні бути на віддаленій відстані від індуктора. Печі відкритої конструкції зазвичай будують невеликих габаритних розмірів [1,2].

Розглядаючи екрановану конструкцію, магнітний потік з зовнішнього боку індуктора буде відділятися від інших конструкцій екраном, наприклад, із міді. Тому, що мідь має невеликий електричний опір, а виділення потужності в тілі, яке розташоване в електромагнітному полі, буде залежати від його опору, то в мідному екрані відповідно енергія поля буде поглинатися в меншій кількості. Стальні конструкції при наявності екрану розташовуються відповідно ближче до індуктора при зменшенні габаритних розмірів печі.

В закритій конструкції магнітний потік також з зовнішнього боку індуктора буде проходити за радіально розташованим пакетом трансформаторної сталі – це по магнітопроводам. Відповідно магнітна проникність трансформаторної сталі в порівнянні з магнітною проникністю повітря в декілька разів більше, тому практично весь магнітний потік буде проходити по магнітопроводам. Розташування магнітопроводів доцільніше виконувати ближче до індуктора. В першу чергу це зменшує розміри печі, а по-друге збільшує жорсткість індуктора [1,2,3].

Необхідну кількість магнітопроводів, а також їх розміри, повинні визначатися в залежності від потужності тигельної печі, частоти живлячого струму та характеристик трансформаторної сталі і т.п.

Закриту конструкцію відповідно рекомендують широко застосовувати для печей великої ємності.

Для роботи тигельної печі велике значення має частота струму, яка повинна жити піч. Значенню кожної ємності печі і електричному опору

шихти відповідає певна частота струму. Вибираючи частоту струму необхідно враховувати, що внутрішній діаметр самого тигля повинен бути більше, або наближено дорівнювати 3,5 глибини проникнення струму в шихту.

Наведемо переваги індукційної тигельної печі.

1. Отримання чистого сплаву.
2. На 40 % менше, ніж в дугових електропечах поглинання водню металом.
3. Метал містить дуже мало неметалевих включень.
4. Окислення ванни в тигельній печі менше, ніж в інших плавильних агрегатах, внаслідок відповідно низької температури.
5. Маємо однорідний сплав і його рівномірний хімічний склад.
6. Внаслідок перемішування викликаного електродинамічними зусиллями полегшується протікання реакцій між металом і шлаком.
7. В тигельній печі маємо високі температури по всій масі металу.
8. Досить високий к.к.д. тигельної печі.
9. Маємо найменший удар металу внаслідок нагрівання металу з середини на зовні.
10. Зменшення виробничих площ внаслідок невеликих габаритів печі;
11. Широке регулювання потужності і температури.
12. Високі техніко-економічні показники.
13. Наявність відповідної високої кваліфікації працюючих.

Наведемо недоліки індукційної тигельної печі.

1. Холодні шлаки, вони відповідно затрудняють протікання реакцій між шлаком і металом.
2. Утруднюють процеси рафінування.
3. Дорого вартісне та складне устаткування, яке супроводжує встановлення тигельних печей.
4. Великі витрати на обслуговування.

РОЗДІЛ 2. Тигельна індукційна піч та її конструкція

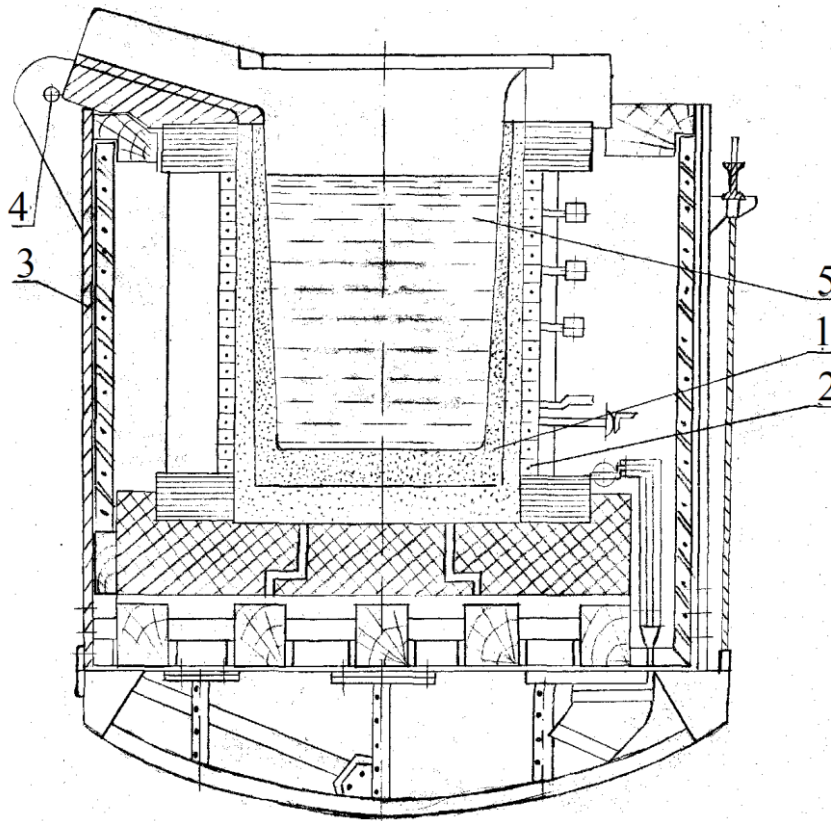


Рис. 1. Схема тигельної індукційної печі: 1 – тигель;
2 – індуктор; 3 – каркас; 4 – вісь поворотна; 5 – метал, який нагрівається

Тигельні індукційні печі складаються з таких основних елементів: індуктора, магнітопроводів, футеровки, каркасу, електрообладнання, механізму нахилу та системи охолодження печі.

Індуктор. Індуктор – це циліндрична котушка з мідної трубки. Виготовляють індуктор з міді, яка має меншу поглинаючу здатність енергії електромагнітного поля, а ніж у сталі та других матеріалів. Мідна трубка може мати такі: профілі прямокутний, круглий, квадратний [1-3,6].

Товщина стінки мідної трубки вибирається за умов залежності від частоти живильного струму.

Для забезпечення мінімальних втрат енергії в трубці, необхідно, щоб товщина стінки трубки повинна бути на 30 % більше, ніж глибина проникнення струму. Розмір отвору в трубці обумовлений витратами

охолоджуючої води. Поперечний переріз трубки звісно залежить від струму, який протікає по індуктору.

Припаяні штуцера в індукторі виконують роль підведення і відведення води і електроенергії. Між витками індуктора необхідно встановлювати електроізоляційні прокладки. Для забезпечення надійної електричної ізоляції одного витка від іншого індуктор покривають шаром епоксидної смоли. Верхній рівень індуктора в тигельних печах повинен встановлюватись відповідно нижче рівня металу, внаслідок цього повинен зменшуватись меніск на поверхні самої ванни і не давати можливості викиду металу з тигля через електродинамічну циркуляцію. Кожний виток індуктора кріпиться до вертикальних стійок латунними шпильками. Стійки відповідно виготовляють з азбоцементу, можна також і з твердих порід деревини [1-3,6].

Магнітопровід. Для запобігання нагрівання металевих частин тигельної печі магнітними полями розсіву навколо самого індуктора необхідно встановлювати зовнішній магнітопровід, виконаний з листової трансформаторної сталі. Він складається з окремих пакетів, які розташовані рівномірно по периметру самого індуктора. В тигельних печах магнітопроводи виготовляють із сталі, товщиною 0,5 мм, а в печах підвищеної частоти необхідно розмір товщиною 0,35 мм.

Довжина пакетів магнітопроводу повинна бути більше висоти індуктора. Пакети кріплять до каркасу тигельної печі металевими болтами і встановлюють їх впритул до самого індуктора, що забезпечує жорсткість конструкції і також мінімальне розсіяння магнітного потоку.

Каркас. В тигельних печах каркас невеликої ємності виконують з деревини і азбоцементу та немагнітних металів. Каркаси печей великої ємності повинні мати велику жорсткість та міцність, тому їх необхідно виготовляти з профільної сталі. Каркас повинен сприймати всі навантаження, які виникають при розширенні тигельної печі, її нахилу та зливанні металу і шлаку.

Футеровка. До футеровки тигельної печі в процесі її роботи ставляться певні вимоги. По-перше – футеровка повинна витримувати механічну дію самого рідкого металу, це важливо для тигельної печі великої ємності. По-друге – футеровка з боку саме рідкого металу повинна мати дуже щільну поверхню, яка спікається, через яку вже метал не зможе просочитися. По-третє – з боку індуктора відповідно футеровка повинна бути такою, що не спікається – це умова про попередження утворення в ній наскрізних тріщин [1-3,6].

В процесі експлуатації можуть в щільному шарі футеровки, що все ж таки спікся, утворитися тріщини. Рідкий метал, потрапляючи по тріщинах в шар металу, що не спікається розігріває його, і відповідно футеровка, спікаючись, буде закривати тріщину. Тому наявність шару, який не спікається, може виключати проникнення рідкого металу до індуктора.

Стійкість футеровки в процесі роботи печі визначає строк служби її до наступного ремонту. В залежності від проходження металургійного процесу можна застосовувати кислі та основні вогнетривкі матеріали. Футеровка тигельної печі складається з подини, кришки, тигля, верхнього кільця. При виготовленні футеровки тигельної печі використовують вогнетривкі маси і для подини – фасонні вогнетривкі вироби.

Механізм нахилу. В процесі розливання металу каркас печі з індуктором та футеровкою в зборі відповідно треба нахилити на 90-100°. Індукційні печі невеликої ємності забезпечені ручними механізмами нахилу (лебідки). Великі тигельні печі виконані з механізмом нахилу, який використовує гідравлічний привод. Тигельна піч нахиляється гідравлічним циліндром, з'єднаним за допомогою шарнірів, тобто з її каркасом і рамою, встановленою на фундаменті. Гідравлічний циліндр за допомогою гнучких шлангів з'єднаний з насосною станцією. В гідросистемах замість масла слід використовувати негорючу рідину для безпечної роботи.

Електрообладнання. В комплект тигельної печі входить трансформатор, конденсаторні батареї, перетворювач частоти струму, щити

керування і кабелі для живлення. Під необхідно під'єднувати до мережі високої напруги через відповідні високовольтні вимикачі. Трансформатор оснащений декількома регулюючими ступенями на вторинному боці, що дозволяє підводити необхідну напругу до індуктора в залежності від режиму роботи печі. Для компенсування, наприклад, індуктивної потужності індуктора використовуємо дві конденсаторні батареї. Одна батарея повинна бути ввімкнена постійно, а іншу треба вмикати частинами, за необхідністю. Це в свою чергу дає можливість для будь-якого режиму роботи тигельної печі отримувати $\cos \phi$, близький до одиниці [1-3].

Тигельні індукційні печі, які працюють на підвищеній або високій частоті, повинні мати ще додатковий перетворювач частоти.

Система охолодження печі. Такі елементи тигельної печі, як індуктор, конденсатори, кабелі, повинні працювати лише при їх інтенсивному охолодженні. Для охолодження треба використовувати переважно воду. Невеликі тигельні печі можна охолоджувати звичайною водою. Великі печі охолоджуються вже спеціальною підготовленою водою.

РОЗДІЛ 3. Робота тигельної печі

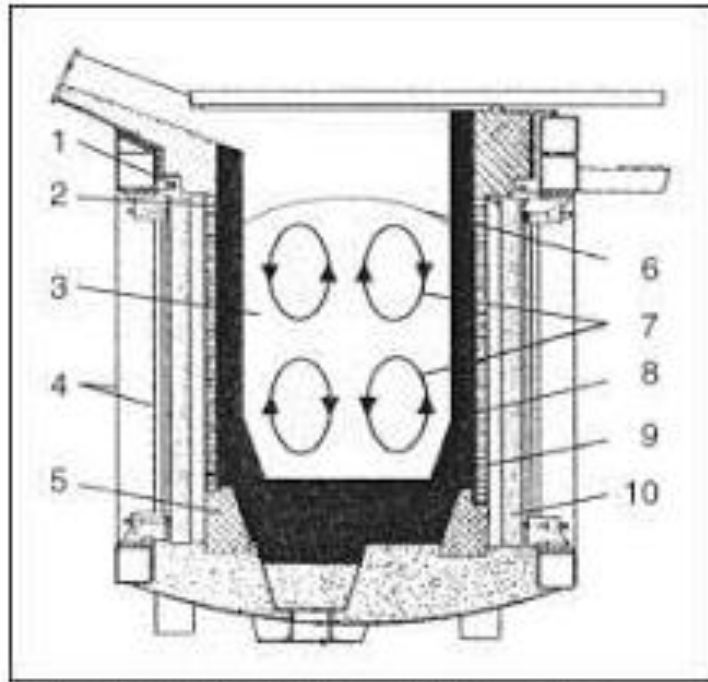


Рис. 2. Індукційна тигельна піч

1 – короткозамкнений виток; 2 – холості витки; 3 – метал; 4 – сталеві несуча конструкція; 5 – бетонне кільце; 6 – меніск; 7 – рух металу; 8 – тигель; 9 – індуктор; 10 – магнітопровід

За допомогою індуктора, який живиться змінним струмом, здійснюється індукційне нагрівання металу (рис. 2). В процесі протікання струму по індуктору повинно виникати магнітне поле. Якщо внести метал в магнітне поле, він буде при цьому нагріватися, тому що змінний магнітний потік буде збуджувати у ньому змінну ЕРС і також віхрові струми. Метал, який розплавляється, буде знаходитись в тиглі печі, що розташований в індукторі.

Теплота, яка виділяється в металі, нагріває метал, залежить від його магнітної проникності: чим більша магнітна проникність сплаву, тим інтенсивніше його нагрівання, а відповідно і більша кількість теплоти, буде виділятися [1,2,3,7].

На початку роботи тигельної печі ретельно перевіряється плавильна установка. Переглядається футеровка і в разі виявлення тріщин, треба їх ліквідувати; потім перевірити котушку, далі ізоляцію, а також кріплення

витків, здійснити очищення витків від пилу і вологи, також продути стисненим повітрям від внутрішнього пилу, особливо перевірити з'єднання водопровідних шлангів і виконати пуск води в котушку, після пуску води знову необхідно перевірити проходження води через кожний шланг тільки окремо за манометром і термометром, прослідкувати тиск і температуру води, яка надходить; перевіряється відповідно справність механізму нахилу, при цьому контролюють стан бронзових гайок, які пересуваються за ходовим гвинтом та треба перевірити ізоляційну прокладку в муфті; потім перевірити ізоляцію в з'єднаннях, а також залізних частинах корпусу тигельної печі; далі перевірити вентиляцію в конденсаторній та в машинному приміщенні і можна привести її в дію; перевірити, щоб був вимкнений рубильник мотору, генераторний рубильник і також вимикачі конденсаторів; далі ввімкнути трансформатор, який живить мотор-генератор і перевірити наявність напруги за вольтметром на щиті або на приладах в трансформаторній; записати також всі показники лічильника [1,2,3,7].

Завантаження печі. Завантаження шихти потребує дотримання наступних правил: по-перше шихта повинна бути дуже щільною, великими шматками, або являє собою суміш з великих і малих шматків; по-друге для більш щільнішого заповнення об'єму треба завантажувати по-чергово шматки відповідно обох розмірів; по-третє завантажувати садку необхідно на висоту самої котушки, бо метал, який буде виходити за межі самої котушки, матиме втрати на охолодження; по-четверте, шматки металу, необхідно по-можливості, викладати також концентричними кільцями паралельно відповідним виткам котушки, і якщо, наприклад, шихта являє собою плоскі шматки, то треба викладати їх в горизонтальній площині; по-п'яте не допускати неповного завантаження самого тигля печі, бо завантаження шихти, навіть, невеликими порціями може привести до частого відкривання кришки, а відповідно при цьому, і до більших втрат на охолодження [1,2,3,7].

Ввімкнення печі. Після закінчення процесу завантаження тигельної печі запуск її здійснюють з дотриманням відповідно певної послідовності: перше вмикають рубильник мотору; друге вмикають ємність, яка повинна відповідати данній шихті; третє, вмикають головний рубильник на щиті, який замикає ланцюг – це “генератор-піч” з паралельно та послідовно приєднаної до тигельної печі ємності; четверте обережно вивести реостат в ланцюгу збудження генератора відповідно маховичком від регулятора головного струму, при дотриманні за показниками приладів не допускати переходу стрілок за відповідну червону лінію; п’яте виконувати наладку на необхідний резонанс, вмикаючи і вимикаючи при цьому конденсатори і слідкуючи за відповідними приладами. Ознакою добре налагодженої тигельної печі буде слугувати стан, коли відповідна сила струму в індукторі буде максимальна і стрілки всіх приладів генератора не повині виходити за межі червоної лінії.

Наладку тигельної печі необхідно проводити при вимкненому струмі, а для запобігання охолодження садки печі необхідно здійснювати її дуже швидко [1,2,3,7].

РОЗДІЛ 4. Особливі процеси плавки чавуну в ІТП

Плавлення чавуну в індукційній тигельній печі має свої особливості.

Маючи відповідні конструктивні особливості, такі як, наявність глибокої ванни і порівняно мала її поверхня в тигельних печах угар елементів і забруднення металу азотом значно менше, ніж в інших плавильних печах.

В процесі плавлення металу під дією електромагнітних сил рідкий метал в тигельній печі звісно перемішується, це дає можливість прискорити процеси, які протікають в рідкій ванні, а також фізико-хімічні процеси між металом і шлаком[1,4,5].

Тигельні індукційні печі для плавлення чавуну знаходять широке застосування відповідно для дрібного лиття. Пояснити це можна завдяки здатності печі виплавляти метал через відносно невеликий проміжок часу та невеликим об'ємом. Литво, яке одержується при цьому, має відповідний склад і високу якість.

Для плавлення чавуну в печах з кислою футеровкою шихту відповідно треба складати з чистих вихідних металів та з мінімальним вмістом сірки і фосфору, а відповідно в тигельних печах з основною футеровкою можливе застосування уже більшого відсотку скрапу.

В тигельних печах, як з кислою, так і, відповідно, з основною футеровкою склад шлаку треба підбирати таким, щоб він не міг заміщуватися в розплавленому металі, тобто при цьому шлак повинен мати дуже високий поверхневий натяг.

Нагрівання металу в тигельних індукційних печах без сердешника відбувається прямо від металу (шихти), тому шлак при цьому холодніше за метал. Це є одним з основних недоліків тигельних печей, так як знижує здатність шлаку також і до дії на металургійні процеси. Активність шлаку збільшується досягненням підвищити його рідинотекучість відповідно присадкою плавикового шпату. Індукційні печі без сердешника також мають

і інші недоліки: це значне роз'їдання футеровки, наприклад, під дією шлаку; потім затруднення ремонту самої футеровки, це пов'язано з малою товщиною стінок і вертикального їх розташування (особливо це стосується тиглів малої ємності); далі обмежена ємність ванни. Але завдяки тому, що рух металу при плавленні в тигельних печах без сердешника відбувається швидко, а хімічні реакції (це дегазація і видалення неметалевих з'єднань) будуть протікати досить інтенсивно. Завантаження шихти в тигельних печах при великій ємності можна легко механізувати і це можливо виконати, зазвичай, за декілька хвилин [1,4,5].

При складанні шихти також необхідно враховувати, що при плавленні чавуну в тигельних індукційних печах без сердешника з кислою футеровкою дуже складно звільняти метал від таких елементів як сірка і фосфор. Тому вміст сірки і фосфору у вихідних шихтових матеріалах повинен відповідно бути якомога меншим (не більше 0,05%). Особливо, це буде відноситися до чавуну, який іноді використовують для підвищення вмісту самого вуглецю в шихті. Такий чавун повинен дійсно мати мінімальний вміст фосфору. Хоча з рідкої ванни, наприклад, можна порівняно легко видалити надлишок вуглецю, кремнію і марганцю, тим не менш не допускається, щоб, наприклад, вміст вуглецю в шихті перевищував 0,1% проти тієї кількості, яка повинна допускатися в металі. При більшій кількості вуглецю в шихту треба додавати залізну руду (до 0,5% до маси шихти) або відповідну також кількість окисленого скрапу. При плавленні чавуну в тигельних печах з кислою футеровкою необхідно враховувати також, що шлак утворюється частково, наприклад, за рахунок піску, який прилипає до скрапу та кремнезему самої футеровки тигельної печі [1,4,5].

Плавлення в тигельних печах з основною футеровкою відрізняється такою перевагою, що вона дозволяє застосовувати, наприклад, будь-який скрап, так як при цьому процес, що стосується вигорання вуглецю, марганцю і кремнію буде відбуватися досить швидко.

РОЗДІЛ 5. Розрахунок тигельної печі

При розрахунку індукційної тигельної печі визначаються основні розміри тигля та індуктора, а також треба розрахувати і основні електротехнічні характеристики тигельної печі [1,4,5,6,7,8].

Об'єм рідкого металу

$$V_m = G/\rho = 1/7,2 = 0,139 \text{ м}^3;$$

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

Внутрішній діаметр тигля:

$$d_0 = \sqrt[3]{4V_m/\pi B} = \sqrt[3]{4 \cdot 0,139/3,14 \cdot 1,4} = 0,5 \text{ м}$$

де B – коефіцієнт, який враховує в скільки разів повинна висота металу в тиглі h_m бути більше внутрішнього діаметру, а залежить коефіцієнт від ємності тигля. Приймаємо $B = 1,4$.

Висота металу у тиглі:

$$h_m = B \cdot d_0 = 1,4 \cdot 0,5 = 0,7 \text{ м}$$

Товщина стінки тигля:

$$S_1 = 0,2 \cdot d_0 = 0,2 \cdot 0,5 = 0,1 \text{ м}$$

Розрахунок частоти струму виконуємо для таких характерних умов:

1. Тигель повинен бути заповнений твердою шихтою з температурою 20°C .

Питомий електроопір сталі:

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

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 40$$

Середній розмір куска металу:

$$d_m = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} = \frac{0,1 + 0,2}{2} = 0,15 \text{ м}$$

Мінімальна частота струму:

$$f_{\min 1} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_1}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{20 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot 0,15} = 5,5 \text{ Гц}$$

2. Тигель заповнюється твердою шихтою з температурою 800 °С.

Питомий електроопір сталі:

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

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 1$$

Мінімальна частота живильного струму:

$$f_{\min 2} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_2}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{110 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,15} = 1200 \text{ Гц}$$

3. Тигель заповнюється рідким металом з температурою 1500 °С.

Питомий електроопір сталі:

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

Відносна магнітна проникність:

$$\mu_1 = 1$$

Мінімальна частота живильного струму:

$$f_{\min 3} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_3}}{\mu_1 \cdot d_0^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{125 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,15^2} = 125 \text{ Гц}$$

Приймаємо $f = 50 \text{ Гц}$.

Товщина теплоізоляційного азбестового шару та її визначення між тиглем і індуктором

$$S_2 = 0,005 \text{ м.}$$

Внутрішній діаметр індуктора

$$D_{\epsilon} = d_0 + 2(S_1 + S_2) = 0,5 + 2(0,1 + 0,005) = 0,71 \text{ м.}$$

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

де $W_{\text{теор}}$ – теоретична питома витрата енергії, $W_{\text{теор}} = 355 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$; Π'

– плавильна продуктивність печі, т/год.

Плавильна продуктивність печі

$$P' = P(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) / \tau_2 = (1 - 0,2) / (0,1 + 0,75 + 0,1 + 0,05) = 0,8 \text{ т/год}$$

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.; P – продуктивність печі т/год;

$$P_{кор} = W_{теор} \cdot P' = 355 \cdot 0,8(0,1 + 0,75 + 0,1 + 0,05) / 0,75 = 379 \text{ кВт}$$

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

де $\eta_{терм}$ – термічний к.к.д. тигельної печі, приймаємо $\eta_{терм} = 0,8$

$$P_a = 379 / 0,80 = 474 \text{ кВт}$$

Висота індуктора

$$h_i = 1,1h_m = 1,1 \cdot 0,7 = 0,77 \text{ м}$$

Глибина проникнення струму в метал

$$\Delta = 503 \sqrt{\rho_m / \mu_m f} = 503 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} / 1 \cdot 125} = 0,05 \text{ м}$$

Напруга магнітного поля в індукторі

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

де K_s – коефіцієнт враховує самоіндукцію, а також, відповідно, взаємоіндукцію між індуктором та садкою, $K = 0,9$; A_m – це поправочний коефіцієнт активної потужності, який повинен враховувати кривизну металевої садки в тиглі і повинен залежати від відношення діаметра садки до відповідної глибини проникнення струму в неї, $d_0 / \Delta = 0,5 / 0,05 = 10$ $A_m = 0,9$

$$H = \frac{10^3}{0,9} \sqrt{\frac{474}{6,2 \cdot 0,5 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 125}}} = 154825 \text{ А/м}$$

Реактивна потужність садки, при виділенні в металі

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

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

$$Q_m = 6,2 \cdot 10^{-6} (154825)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,7 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 0,9^2} = 527 \text{ квар}$$

Реактивна потужність в зазорі між металом і індуктором

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

$$Q_z = 6,2 \cdot 10^{-9} (154825)^2 \cdot 125 \cdot 0,5^2 \cdot 0,7 \left[\left(\frac{0,71}{0,5} \right)^2 - 1 \right] = 3304 \text{ квар}$$

Товщина стінки трубки індуктора повинна визначатися з наступної умови, що відноситься до одержання мінімальних втрат цієї активної потужності в індукторі

$$S_{mp} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot \Delta e,$$

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

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

Втрати активної потужності в індукторі

$$P_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_\epsilon h_i A_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{z.i}$$

де ρ_i і μ_i – питомий електричний опір та відносна магнітна проникність матеріалу індуктора, $\rho_i = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\mu_m = 1$; A_i – поправочний коефіцієнт активної потужності, що враховує кривизну індуктора, $A_i = 1$; $K_{z.i}$ – коефіцієнт заповнення індуктора, $K_{z.i} = 0,8$.

$$P_u = 6,2 \cdot 10^{-6} (154825)^2 \cdot 0,71 \cdot 0,77 \cdot 1 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 125} / 0,8 = 161 \text{ кВт}$$

Реактивна потужність в індукторі при $R_i = 0,8$

$$Q_u = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_\epsilon h_i R_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{z.i}$$

де R_i – коефіцієнт реактивної потужності, відповідно він враховує кривизну індуктора, $R_i = 0,8$

$$Q_u = 6,2 \cdot 10^{-6} (154825)^2 \cdot 0,71 \cdot 0,77 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 125} / 0,8 = 129 \text{ квар}$$

$$\text{Загальна активна потужність } P = P_m + P_u = 474 + 161 = 635 \text{ кВт}$$

Загальна реактивна потужність

$$Q = Q_m + Q_s + Q_u = 527 + 3304 + 129 = 990 \text{ квар}$$

Загальна потужність в системі індуктор-метал

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{635^2 + 990^2} = 1176 \text{ кВт}\cdot\text{А}$$

Струм в індукторі

$$I = 10^3 S / U_i$$

де U_i – напруга на індукторі, це максимальна напруга трансформатора, яка живить тигельну піч електроенергією, $U_i = 100 \text{ В}$

$$I = 10^3 \cdot 1176 / 100 = 11760 \text{ А}$$

Число витків індуктора

$$n = H \cdot h_i / I = 154825 \cdot 0,77 / 11760 = 10,2$$

Крок витка індуктора

$$h_{\text{вит}} = h_i / n = 0,77 / 11 = 0,07 \text{ м}$$

Висота трубки індуктора

$$h_{\text{тр}} = h_{\text{вит}} \cdot K_{\text{з.і.}} = 0,07 \cdot 0,8 = 0,056 \text{ м}$$

Товщина ізоляції відповідно між витками

$$h_{\text{ізол}} = h_{\text{вит}} - h_{\text{тр}} = 0,07 - 0,056 = 0,014 \text{ м}$$

Напруга струму відповідно між витками індуктора

$$U_{\text{вит}} = U_i / n = 100 / 11 = 9,1$$

Напруга на 1 см ізоляції відповідно між витками

$$U_1 = 10^{-2} \cdot U_{\text{вит}} / h_{\text{ізол}} = 10^{-2} \cdot 9,1 / 0,014 = 6,5 \text{ В}$$

Ширина трубки індуктора.

Приймаємо відповідно трубку наступного квадратного перерізу 56x56 мм з товщиною стінки 14 мм. Площа поперечного перерізу відповідно трубки для електричного струму становить 2352 мм². Щільність струму становить 11760/2352 = 5 А/мм², що допустимо.

Природній cos φ печі

$$\cos \varphi = P / S = 635 / 1176 = 0,54$$

Ємність конденсаторної батареї визначається наступним чином

$$C = 10^9 \cdot Q / 2\pi f U_k^2,$$

де U_k^2 – напруга на конденсаторі, відповідно приймається рівною напрузі вищої ступені трансформатора, який застосовується, $U_k = 100 \text{ В}$.

$$C = 990 \cdot 10^9 / 2 \cdot 3,14 \cdot 125 \cdot 100^2 = 126050 \text{ мкФ}$$

Загальний переріз магнітопроводів

$$F_{\text{мг}} = U_i / 4,44 f n B$$

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

$$F_{\text{мг}} = 100 / 4,44 \cdot 125 \cdot 11 \cdot 1 = 0,0165 \text{ м}^2$$

Визначення площі поперечного перерізу для одного магнітопроводу.

Загальна кількість магнітопроводів, маємо 24.

$$f_{\text{мг}} = 10^4 F_{\text{мг}} / N_{\text{мг}},$$

де $N_{\text{мг}}$ – число пакетів магнітопроводу, $N_{\text{мг}} = 16$

$$f_{\text{мг}} = 10^4 \cdot 0,0165 / 16 = 10,3 \text{ см}^2$$

РОЗДІЛ 6. Матеріальний баланс ІТП

Матеріальний баланс плавки в тигельній індукційній печі включає: перше: виявлення відповідних вихідних матеріалів; друге: представлення пропонуваного способу складання шихти; третє: додавання відповідно загального матеріального балансу [1,4,5,6,7,8].

Шихта для плавлення чавуну повинна складатися з металевої і неметалевої частин. Металева частина повинна містити: чавунного лому 50-55%, власних відходів від виробництва чавуну 37-40%, переробний чавун 2-3 % та феросплави.

До ливарних відходів входять обрізки ливників, також стружка, отримана після шабровки поверхонь болванок при видаленні відповідних шлакових вкраплень і т.п. Також відходи інших цехів на виробництві, що складаються з обрізків, вирізок, кромek, а також закатів та ін.

Що стосується привозних відходів, таких як різноманітний брухт і старі вироби, відповідно складаються із окремих компонентів даної шихти та за складом аналогічні цій шихті, але вони мають різний вміст компонентів. В табл. 6.1. представлено хімічний склад шихтових матеріалів.

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	ФеромарганецьФМн0,5	0,5	2	85	0,03	0,3

Під час плавлення даної шихти з окисненням вигорають такі елементи:
вуглець – 20%; кремній 50 %, марганець 20 %, залізо 25 %, сірка 40 %, фосфор 60 %.

Розрахунок матеріального балансу наступний.

Вміст вуглецю в металі по розплавленні

$$[C_p] = 0,46 \cdot 1,2 = 0,55$$

Відходи від власного виробництва повинні становити 40 % шихти.

Через x позначаємо частку чавунного лому, а частку відповідно переробного чавуну через y і складемо систему рівнянь для визначення цих часток:

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

$$x = 0,6 - y$$

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

$$3,8y = 0,246$$

$$y = 0,065$$

$$x = 0,535$$

Отже, склад шихти наступний

$$1000 \cdot 0,4 = 400 \text{ кг} \quad \text{власні відходи}$$

$$1000 \cdot 0,535 = 535 \text{ кг} \quad \text{чавунний лом}$$

$$1000 \cdot 0,065 = 65 \text{ кг} \quad \text{переробний чавун П1}$$

Під час процесу плавлення відбувається окислення вуглецю, марганцю, кремнію, сірки, фосфору і заліза в таких кількостях

$$G_C = (0,535 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,46 + 0,065 \cdot 4) \cdot 1000 \cdot 0,2/100 = 2,55 \text{ кг}$$

$$G_{Si} = (0,535 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,36 + 0,065 \cdot 7) \cdot 1000 \cdot 0,5/100 = 4,065 \text{ кг}$$

$$G_{Mn} = (0,535 \cdot 0,6 + 0,4 \cdot 0,65 + 0,065 \cdot 0,75) \cdot 1000 \cdot 0,2/100 = 1,259 \text{ кг}$$

$$G_P = (0,535 \cdot 0,05 + 0,4 \cdot 0,05 + 0,065 \cdot 0,1) \cdot 1000 \cdot 0,6/100 = 0,315 \text{ кг}$$

$$G_S = (0,535 \cdot 0,05 + 0,4 \cdot 0,05 + 0,065 \cdot 0,01) \cdot 1000 \cdot 0,4/100 = 0,186 \text{ кг}$$

$$G_{Fe} = 1000 \cdot 0,25/100 = 2,5 \text{ кг}$$

$$\sum G_i \quad \quad \quad 10,875 \text{ кг}$$

Утворені оксиди повинні переходити в шлак

$$G_{SiO_2} = 4,065 \cdot 60/28 = 8,71 \text{ кг}$$

$$G_{MnO} = 1,259 \cdot 71/55 = 1,625 \text{ кг}$$

$$G_{PO_2} = 0,315 \cdot 63/31 = 0,945 \text{ кг}$$

$$G_{SO_2} = 0,186 \cdot 64/32 = 0,640 \text{ кг}$$

$$G_{FeO} = 2,5 \cdot 72/56 = 3,214 \text{ кг}$$

$$\Sigma \quad \quad \quad 15,134 \text{ кг}$$

Для ошлакування таких оксидів як марганцю і заліза необхідно буде передбачити завантаження в завалку відповідного чистого кварцевого піску в кількості 1:1

$$G_n = 1,625 + 3,214 = 4,839 \text{ кг}$$

Для створення відповідно достатньої товщини шару шлаку, наприклад, передбачаємо введення у ванну під час процесу плавлення також оборотного шлаку у кількості наближено 2% від маси самої металозавалки:

$$G_{об.шл.} = 1000 \cdot 2/100 = 20 \text{ кг}$$

Приймаємо, що в шлак повинна переходити частина футеровки вагою 0,5% від металозавалки:

$$G_{фут.} = 1000 \cdot 0,5/100 = 5 \text{ кг}$$

На окислення окремих елементів в процесі плавлення металу визначаємо відповідно витрату кисню із атмосфери печі:

$$G_{O_2,C} = [2,55]16/12 = 3,40 \text{ кг}$$

$$G_{O_2,Si} = [4,065]32/28 = 4,64 \text{ кг}$$

$$G_{O_2,Mn} = [1,259]16/55 = 0,366 \text{ кг}$$

$$G_{O_2,P} = [0,315]32/31 = 0,325 \text{ кг}$$

$$G_{O_2,Fe} = [2,5]16/56 = 0,714 \text{ кг}$$

$$G_{O_2,i} = \quad \quad \quad 9,445 \text{ кг}$$

Утворюється СО:

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

Кількість шлаку після розплавлення

$$G_{шл} = 15,34 + 4,839 + 100 + 25 = 144,97 \text{ кг}$$

або $144,97 \cdot 100/1000 = 14,49\%$ від маси металозавалки

Кількість металу після розплавлення

$$G_{мет} = 1000 - 10,875 = 989,125 \text{ кг}$$

Результати розрахунків матеріального балансу наводимо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Матеріальний баланс плавки чавуну в тигельній печі ємністю 1 т

№ п/п	Статті (прибутку або видатку)	кг	% від м/з
	Прибутки:		
1	Чавунний лом	535	53,5
2	Відходи власного виробництва	400	40
3	Переробний чавун П1	65	6,5
4	Пісок	4,839	0,48
5	Оборотний шлак	20	2
6.	Футеровка	5	0,5
7.	Кисень атмосферний	9,445	0,94
	Σ	1139,30	113,68
	Видатки:		
1.	Метал	989,125	98,91
2.	Шлак	144,97	14,49
3	Газ СО	0,411	0,0411
	Σ	1139,30	113,68

Відповідно зміною маси металу, а також шлаку під час доводки будемо нехтувати.

Визначаємо кількості феросплавів, які нам треба ввести в рідкий метал для одержання відповідно заданого вмісту в ньому домішок

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

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

Розраховуємо вміст марганцю і кремнію перед розкисленням:

$$[Mn]_n = (0,535 \cdot 0,6 + 0,4 \cdot 0,65 + 0,065 \cdot 0,75) \cdot 0,8 = 0,5\%$$

$$Si_n = (0,535 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,36 + 0,065 \cdot 0,7) \cdot 0,5 = 0,2\%$$

Кількість феромарганцю

$$G_{FeMn} = \frac{989,125(0,65 - 0,5)}{85 \cdot 0,7} = 1,66 \text{ кг}$$

Кількість феросіліцію

$$G_{FeSi} = \frac{989,125(0,36 - 0,2)}{77 \cdot 0,7} = 2,93 \text{ кг.}$$

РОЗДІЛ 7. Тепловий баланс ІТП

Тепловий баланс тигельної печі є не що інше, як відношення між прибутком і видатком теплоти. При розрахунку теплового балансу печі ми визначаємо витрати електроенергії і вивчаємо стан теплової роботи печі.

При роботі тигельної індукційної печі тепла енергія отримується за рахунок перетворення електричної енергії в теплову, а також і за рахунок термохімічних реакцій – це окислення металу з виділенням теплоти. Тому вся ця енергія використовується на нагрівання, розплавлення і перегрів металу, а також її використовують на покриття електричних втрат і теплових втрат в установці. Теплові втрати в докілья відбуваються внаслідок таких процесів теплообміну як теплопровідності, конвекції та випромінювання [1,4,5,6,7,8].

Рівняння теплового балансу тигельної печі:

$$Q_{ел.ен.} + Q_{екз} = Q_{м} + Q_{шл} + Q_{кл} + Q_{охол} + Q_{випр} + Q_{виб}$$

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

Тривалість завалки і плавлення наближено приймаємо – 1,35 год.

Теплота екзотермічних реакцій:

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

Витрата електроенергії

$$Q_{ел.ен.} = IU \cdot t / 3600 = 31602 \cdot 800 \cdot 1,35 / 3600 = 1788,6 \text{ кВт}$$

Температура металу та шлаку при розрахунку відповідно їх тепловмісту: $t_{м} = 1450^{\circ}C$, $t_{шл} = 1400^{\circ}C$

$$Q_{м} + Q_{шл} = [(0,9 \cdot 1450 + 50) \cdot 2958,418 + (1,89 \cdot 1400 - 1100) \cdot 209,439] / 1,35 \cdot 3600 = 1460,826$$

$Q_{кл}$ розраховуємо за формулою

$$Q_{кл} = a(t_{кл} - t_{нов})F$$

де $a = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ефективний коефіцієнт тепловіддачі відповідно конвекцією від поверхні кладки до повітря, яке оточує піч; $t_{кл} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{нов} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температури зовнішньої поверхні кладки та навколишнього повітря; F – величина зовнішньої поверхні тигельної печі.

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

$$Q_{кл} = 20(100 - 20) \cdot 1,09 = 1,744 \text{ кВт}$$

Розраховуємо величину $Q_{охол}$, приймаємо витрату води наближено $2 \text{ м}^3/\text{год}$, $t_{\text{г}}^{нов} = 20^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{г}}^{кін} = 45^{\circ}\text{C}$;

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

Приймаємо для останніх двох статей видаткової частини теплового балансу тигельної печі наступні співвідношення:

$$Q_{випр} + Q_{виб} = 0,2Q_{ел.ен.} = 0,2 \cdot 1788,6 = 357,70 \text{ кВт}$$

Розрахункові дані теплового балансу тигельної печі приводимо в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Тепловий баланс плавки чавуну в тигельній печі ємністю 1 т

№ п/п	Статті прибутку	кВт	%	№п/п	Статті видатку	кВт	%
1	$Q_{ел.ен.}$	1788,6	99,87	1	$Q_{м} + Q_{шл.}$	1460,826	54,06
2	$Q_{екз.}$	90	0,13	2	$Q_{кл.}$	1,744	0,85
	Σ	1878,60	100	3	$Q_{охол}$	58,33	25,35
				4	$Q_{випр} + Q_{виб}$	357,70	19,74
				5	Σ	1878,60	100

Висновки

В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі розрахована тигельна індукційна піч ємністю 1 т/год з основною футеровкою для плавки чавуну та виконано її проектування. Описані основні параметри роботи печі. Розраховані основні її розміри, електротехнічні характеристики та матеріальний і тепловий баланси проекрованої печі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кропівний В.М., Кропівна А.В., Молокост Л.А., Босий М.В., Кузик О.В. Технологія основних виробництв. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання. Кропивницький: Видавництво ТОВ «КОД», 2021. 196 с.
2. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ. 2007. 280 с.
3. Хричиков В.Е., Меньяйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 89с.
4. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Теплотехніка ливарного виробництва» для студентів денної та заочної форм навчання напряму 6.050402 «Ливарне виробництво». Укл.: Чубіна О.А., Кобзева А.І. Дніпродзержинськ. ДДТУ. 2016. 63с.
5. Костик К.О., Терентьєв Д.П. Особливості розрахунку електрромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі. Процеси лиття. 2021. № 2 (144). С.42-52.
6. 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.
7. Шокар'єв 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.
8. 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