

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:
“Конструювання і розрахунок тигельної печі
ємністю 0,5 т/год.”

Виконала здобувачка вищої освіти
IV курсу, групи ПМ-223-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Олена БОСА
« ____ » _____ 20__ р.

Керівник бакалаврської роботи
К.т.н., доц.
_____ Олександр КУЗИК
« ____ » _____ 20__ р.

Рецензент
К.т.н., доц.
_____ Любо́в ОЛІ́ЙНИ́ЧЕНКО
« ____ » _____ 20__ р.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

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
ЗДОБУВАЧКИ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Босої Олени Анатоліївни**

1. Тема роботи: Конструювання і розрахунок тигельної печі ємністю 0,5 т/год.

2. Керівник роботи: К.т.н., доц. Кузик Олександр Володимирович

3. Строк подання роботи до захисту

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи полягають в описі основних параметрів роботи плавильного агрегату, конструкції та роботи тигельної печі. Визначення основних розмірів печі, електротехнічних характеристик та матеріального і теплового балансу проектного 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 проєктованого 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

_____ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

« ___ » _____ 20__ р.

Підпис здобувача

_____ Олена БОСА

АНОТАЦІЯ

Боса О. А. "Конструювання і розрахунок тигельної печі ємністю 0,5 т/год." спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026. 40 с. Матеріали ілюстрації 3 іл.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є вивчення конструктивних особливостей та ключових робочих параметрів тигельного плавильного агрегату. Завдання роботи полягають у розрахунку основних розмірів печі, визначенні електротехнічних показників, а також у складанні матеріального і теплового балансів.

У роботі розглянуто специфіку виплавки металів у тигельних печах та проаналізовано сучасні тенденції їх застосування.

В повний розрахунок тигельного плавильного агрегату входить: обчислення основних розмірів печі, розрахунок тигля, індуктора, матеріального і теплового балансів.

Графічна частина роботи включає: загальний вид тигельної індукційної печі та її індуктора.

тигельна індукційна піч, індуктор, матеріальний баланс, тепловий баланс

ABSTRACT

Bosa O. A. "Design and calculation of a crucible furnace with a capacity of 0.5 t/h" specialty 131 "Applied Mechanics", OPP – "Computer Engineering Technologies, Robotics and 3D Printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026. 40 p. Illustration materials 3 ill.

The purpose of the bachelor's qualification work is to study the design features and key operating parameters of a crucible melting unit. The tasks of the work are to calculate the main dimensions of the furnace, determine electrical parameters, and compile material and heat balances.

The paper examines the specifics of metal smelting in crucible furnaces and analyzes current trends in their application.

The full calculation of a crucible melting unit includes: calculation of the main dimensions of the furnace, calculation of the crucible, inductor, material and heat balances.

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

crucible induction furnace, inductor, material balance, heat balance

З М І С Т

	Стор.
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТИГЕЛЬНА ІНДУКЦІЙНА ПЧ.....	8
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ	11
РОЗДІЛ 3. РОБОТА ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ	15
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВКИ МЕТАЛУ В ТИГЕЛЬНІЙ ПЕЧІ	18
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ	20
РОЗДІЛ 6. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС	27
РОЗДІЛ 7. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС.....	31
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34
ДОДАТКИ.....	35
Додаток 1. Основні розміри тигельної печі.....	36
Додаток 2. Загальний вигляд тигельної індукційної печі	37
Додаток 3. Індуктор тигельної печі.....	38

ВСТУП

Для забезпечення високих вимог машинобудівної галузі використовуються деталі, виготовлені методом електроплавки, оскільки тільки цей процес надає металам та сплавам необхідні властивості. Незважаючи на те, що конвертерний спосіб залишається основним для виробництва сталі та чавуну, для отримання високоякісних сплавів, які потребують глибокого рафінування та розкислення, краще використовувати електропечі. Вони дозволяють точно регулювати атмосферу та тепловий режим – чого важко досягти у паливних печах. Отже застосування електричних тигельних печей забезпечує найвищу якість литва, мінімізує втрати (угар) дорогих легуючих елементів, та значно підвищує продуктивність і покращує умови праці [1,4,5].

Індукційні тигельні печі застосовують при виробництві металів, що потребують підвищеної чистоти. Цей спосіб плавки забезпечує кращу однорідність матеріалу у порівнянні з дуговими чи полуменевими методами [1,5].

Використання тигельних індукційних печей забезпечує у рази вищу продуктивність порівняно з паливними печами. Крім того, індукційний метод гарантує кращу якість металу та мінімізує втрати легуючих елементів під час плавлення. [1,5].

РОЗДІЛ 1. ТИГЕЛЬНА ІНДУКЦІЙНА ПІЧ

Індукційні тигельні печі – обладнання для виплавки сталевих, чавунних та кольорових сплавів. Процес нагрівання відбувається за рахунок електромагнітної індукції: змінний магнітний потік створює в металі струми, які його плавлять.

Індуктор тигельної печі – це котушка, всередині якої розташований вогнетривкий захисний тигель із розплавленим металом. Тигель захищає індуктор від прямого впливу рідкого металу. Його товщина безпосередньо впливає на електричний режим роботи. Чим товща стінка тигля, тим більша частина магнітних силових ліній проходить повз метал, що веде до зниження cos печі до значень 0,05-0,2 [1,2].

Щоб зменшити навантаження на електромережу, спричиненого значною індуктивною потужністю, до індуктора паралельно під'єднують конденсаторні батареї.

Під час плавлення виникає потреба в регулюванні кількості конденсаторів, що зумовлено зміною електричного опору шихти при нагріванні, а іноді і трансформацією її магнітних характеристик.

Через контур, що утворений індуктором та конденсаторною батареєю, протікає струм високої сили. Тому для з'єднання цих елементів застосовуються кабелі та шини з великим поперечним перерізом.

Магнітне поле індуктора поширюється за замкненим контуром, охоплюючи при цьому і внутрішню і зовнішню області. Класифікуються печі на закриті, екрановані та відкриті в залежності від особливості проходження потоку ззовні індуктора.

Через відкритий тип тигельної печі зовнішній магнітний потік замикається через повітряне середовище, оточуючи індуктор силовими лініями. Для уникнення шкідливого впливу магнітного поля на каркас, конструктивні деталі виготовляють із діелектриків (неметалевих матеріалів) або виносять на безпечну відстань від індуктора. Безпосередньо біля індуктора слід застосо-

увати азбоцемент або дерево. Елементи з вуглецевої сталі повинні бути розміщені віддалено від зони максимальної напруженості поля.

Конструкція тигельних печей відкритого типу має невеликі габарити [1,2,3].

Для екранованих тигельних печей важливо ізолювати магнітний потік зовнішньої сторони індуктора від сталевих елементів, використовуючи, наприклад, мідний екран. Завдяки низькому електричному опору міді, втрати енергії в такому екрані є мінімальними, незважаючи на виділення потужності в полі. Застосування екранування дозволяє розміщувати сталеві елементи ближче до індуктора, що сприяє зменшенню загальних габаритів тигельної печі. У закритих плавильних печах магнітний потік ззовні індуктора спрямовується через магнітопроводи. Завдяки значно вищій магнітній проникності сталі порівняно з повітрям, весь потік концентрується в магнітопроводах. Розміщення останніх у безпосередній близькості до індуктора не тільки зменшує розмір печі, а й підвищує жорсткість конструкції [1,2,3].

Вибір кількості та геометричних параметрів магнітопроводів визначаються потужністю нагрівального обладнання, частотними характеристиками струму, а також властивостями трансформаторної сталі.

Для плавильних печей великої потужності використовується закритий тип конструкції.

Від частоти струму живлення безпосередньо залежить стабільна робота індукційної печі. Оптимальний вибір частоти залежить від електричного опору матеріалів (шихти) та об'єму самої печі. При проектуванні важливо дотримуватися умови: внутрішній діаметр тигля має щонайменше в 3,5 рази перевищувати глибину проникнення струму в завантажений матеріал.

Переваги використання тигельної печі:

1. Висока чистота сплаву: метал виходить чистішим в зв'язку з відсутністю прямих джерел забруднення та знижене на 40% поглинання водню (порівняно з дуговими агрегатами). При помірних температурах і вдоскона-

леному нагріві, рівень окиснення ванни, а також кількість неметалевих включень будуть мінімальними.

2. Однорідність складу: електродинамічне перемішування забезпечує отримання гомогенного сплаву з точним хімічним складом, а також інтенсифікує взаємодію між металом і шлаком. [1,2].

3. На відміну від локального нагріву в печах інших типів, в тигельних печах відбувається рівномірний максимальний нагрів усього об'єму металу.

4. Високий ККД.

5. Компактні розміри печі дозволяють раціонально використовувати виробничу площу, значно економлячи місце.

6. Точне керування потужністю.

7. Здатність працювати у вакуумі чи захисному газі.

8. Зручність та механізація обслуговування.

9. Відсутність різких коливань у роботі, на відміну від дугових печей.

10. Висока ефективність тигельної печі робить її економічно вигіднішою порівняно з іншим плавильним обладнанням.

Недоліками тигельних індукційних печей можна вважати наступне:

11. Через низьку температуру шлаку в даних печах уповільнюються шлакометалічні реакції і це знижує ефективність рафінування.

12. Необхідність комплектації печей дорогавартісними генераторами високої частоти та конденсаторними установками.

13. Висока капіталомісткість та складність монтажу індукційного обладнання [1,2].

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

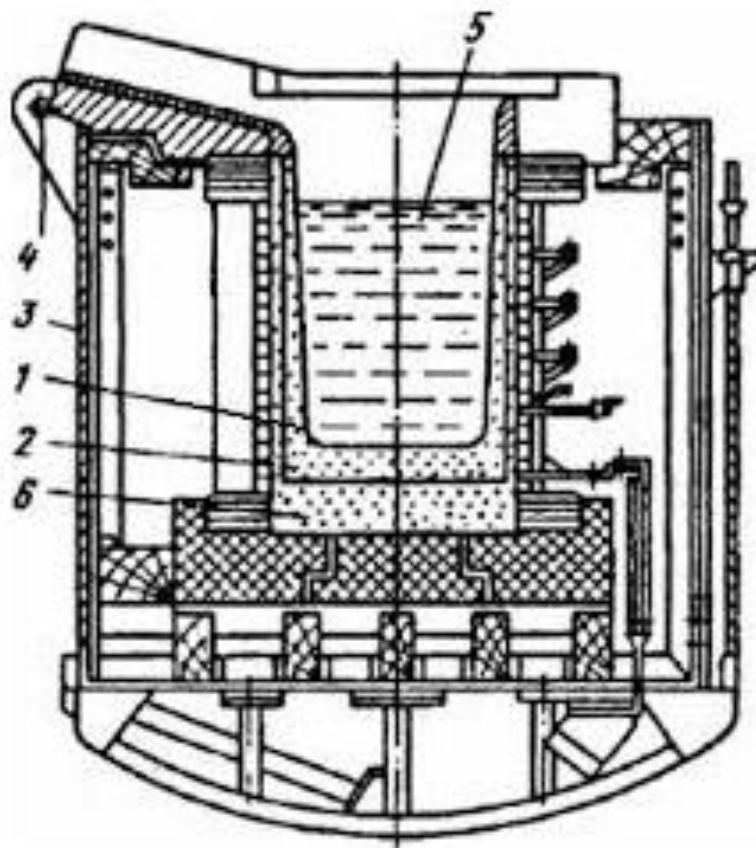


Рис. 1. Схема конструкції тигельної індукційної печі: 1 – тигель; 2 – індуктор; 3 – каркас печі; 4 – вісь поворотна; 5 – метал; 6 – під печі

Основні конструктивні елементи тигельної печі складаються з індуктора, футеровки, каркаса, магнітопровода, системи охолодження, механізму нахилу, а також електрообладнання. (рис.1).

Індуктор. Конструктивно індуктор виконаний як циліндрична котушка, сформована з мідної трубки. Вибір міді як матеріалу зумовлений її низькими втратами на поглинання електромагнітної енергії порівняно зі сталлю чи іншими металами. Для виготовлення використовують профілі круглого, прямокутного або квадратного перерізу. Товщина стінок трубки підбирається відповідно до частоти струму живлення: для мінімізації енерговтрат вона має перевищувати глибину проникнення струму на 30%. Внутрішній діаметр

трубки розраховується на основі необхідної витрати води для охолодження, а її поперечний переріз – виходячи з величини робочого струму [1,2,3,6].

Для забезпечення роботи індуктора до нього припадають штуцери, призначені для підведення електроенергії та води, що охолоджує систему. Електроізоляція між витками виконується за допомогою спеціальних прокладок, а також епоксидного покриття, що гарантує надійність системи. Щоб уникнути електродинамічних викидів металу та зменшити меніск у печах промислової частоти, верхню межу індуктора розташовують нижче верхнього рівня завантаженого металу.

Для фіксації індуктора застосовують метод, за якого кожен його виток кріпиться до вертикальних опор латунними шпильками. Стійки рекомендовано виготовляти з азбоцементу або міцної деревини

Магнітопровід. Для захисту металевих елементів конструкції тигельної печі від нагріву полями розсіювання, навколо індуктора монтують зовнішній магнітопровід, який виготовляють із листів трансформаторної сталі та збирають із рівномірно розташованих по периметру індуктора пакетів.

Для виготовлення магнітопроводу промислових тигельних печей використовують сталеві листи товщиною біля 0,5 мм, тоді як для установок підвищеної частоти цей показник зменшують до 0,35 мм. [1,2,3,6].

Довжина магнітопровідних пакетів має перевищувати висоту індуктора. Для забезпечення конструкційної жорсткості та мінімізації розсіювання магнітного поля, пакети монтуються болтовим з'єднанням до каркаса печі щільно до індуктора.

Каркас. Для спорудження каркасів тигельних печей малої місткості використовують деревину, азбоцемент або немагнітні металеві сплави. Однак конструкції великої ємності потребують високої жорсткості та міцності, тому для них застосовують профільну сталь (швелери, балки). Основа печі розрахована на сприйняття робочих навантажень, що виникають під час теплового розширення, а також при нахилу для випуску шлаку та металу.

Футеровка. Експлуатація індукційної тигельної печі вимагає суворого дотримання вимог до футеровки, особливо для великотоннажних печей, де важлива стійкість до механічних навантажень від металу. Робочий шар футеровки, який контактує з розплавом, має бути максимально щільним та спеченим, щоб запобігти просочуванню металу. Водночас, шар ближче до індуктора роблять неспеченим – це захищає від появи тріщин. Якщо в робочому шарі утворюються тріщини, метал потрапляє у неспечений шар, розігріває його, і футеровка самовідновлюється, закриваючи тріщину. Такий «безпечний» неспечений шар гарантує, що рідкий метал не дістанеться індуктора. [1,2,3,6].

Тривалість експлуатації тигельної печі між ремонтами безпосередньо залежить від міцності її футеровки. Залежно від особливостей металургійного процесу застосовують основні або кислі вогнетривкі матеріали. Футеровка складається з поду, тигля, кришки та верхнього кільця. При плавці чавуну зазвичай використовують суху кварцову масу. Набивка тигля проводиться пошарово. Як правило футеровку виконують із вогнетривких мас, тоді як для поду застосовують фасонні вироби.

Механізм нахилу. Під час випуску розплаву конструкція індукційної тигельної печі (включаючи футеровку та індуктор) повертається на кут від 90° до 100° . Малоємнісні установки здебільшого оснащуються ручними лебідками для нахилу, зате печі великого об'єму приводяться в дію гідравлікою. Процес нахилу забезпечується гідроциліндром, закріпленим шарнірно між фундаментною рамою та корпусом печі. Насосна станція, що створює тиск 20 МПа, під'єднується гнучкими рукавами. З метою пожежної безпеки в гідравлічній системі використовується негорюча робоча рідина, а не масло.

Електрообладнання тигельної печі складається з силового трансформатора, батареї конденсаторів, частотного перетворювача, панелі управління та живильних кабелів. Підключається установка до мережі високої напруги (до 354 кВ) тільки через високовольтний вимикач. Для забезпечення індуктора необхідною напругою відповідно до технологічного режиму, трифазний

трансформатор оснащується вторинними регульовальними ступенями. Для компенсації індуктивної потужності передбачено дві конденсаторні батареї: одна працює постійно, а інша підключається частинами за потреби, що дозволяє утримувати \cos близьким до одиниці. При функціонуванні печі на підвищеній або високій частоті, застосовується додатковий перетворювач частоти.

Система охолодження печі. Функціонування ключових компонентів тигельної печі (індуктора, кабелів, конденсаторних батарей) можливе лише за умови інтенсивного відведення тепла, яке забезпечується, переважно, водяним охолодженням. Якщо для малогабаритних установок достатньо звичайної води, то для великих печей необхідна спеціально підготовлена рідина [1,3].

РОЗДІЛ 3. РОБОТА ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

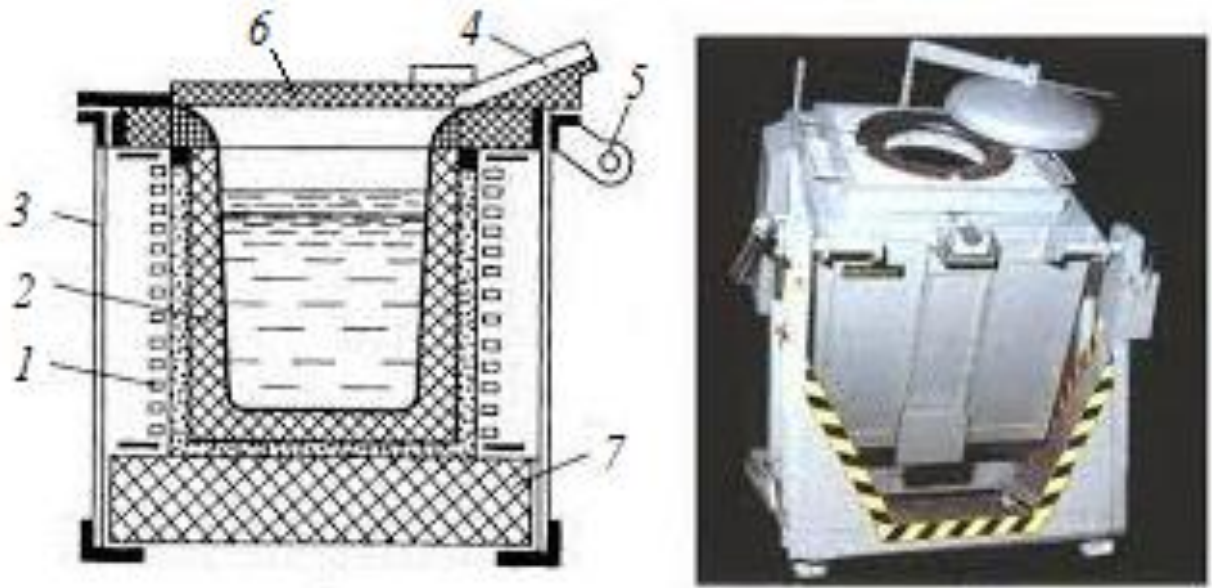


Рис. 2. Схема процесу роботи тигельної індукційної печі:

1 – індуктор; 2 – тигель; 3 – каркас; 4 – жолоб для зливання металу;

5 – вісь поворотна; 6 – футерована кришка; 7 – під печі

Індукційне нагрівання. Індукційне нагрівання металу забезпечується електромагнітним полем, створене індуктором під впливом змінного струму. Вміщений у це поле метал нагрівається завдяки виникненню в ньому вихрових струмів, індуктованих змінним магнітним потоком. Процес плавлення відбувається в тиглі, розміщеному всередині індуктора (рис. 2).

Інтенсивність тепловиділення в металі під час нагрівання прямо залежить від його магнітної проникності: вищий цей показник, то швидше зростає температура і більша кількість енергії виділяється [1,2,3,7].

Безпосередньо перед запуском тигельної печі необхідно провести повну її інспекцію, а саме: оглянути футеровку та, у разі виявлення тріщин, негайно їх усунути; потім перевірити стан котушки, надійність кріплення витків та цілісність ізоляції. Далі видалити пил і вологу, продути конструкцію стисненим повітрям. Після цього перевірити герметичність з'єднань водопровідних шлангів і запуснути воду. По завершенню пуску необхідно пере-

конатися у проходженні води через кожен шланг окремо, контролюючи тиск та температуру води на вході за допомогою манометра і термометра. Необхідно продіагностувати механізм нахилу, приділивши особливу увагу стану бронзових гайок, що переміщуються ходовими гвинтами. Також слід перевірити ізоляційну прокладку в муфті. Обстежити цілісність ізоляційного шару в місцях з'єднання металевих елементів корпусу тигельної печі. Провести перевірку працездатності вентиляційних систем у приміщенні конденсаторів та машинному залі, забезпечивши їх введення в робочий режим. Упевнитися у відключеному стані моторного рубильника, генераторного рубильника та вимикачів конденсаторної батареї, а також перевірити, чи знято збудження з генератора. Подати живлення на трансформатор мотор-генератора та за допомогою вольтметра на щиті (або приладів у трансформаторній) перевірити наявність напруги і останнє: записати показники лічильника [1,2,3,7].

Завантаження печі. Процес завантаження шихти вимагає дотримання наступних вимог. Щільність укладання: матеріал має бути щільно утрамбований, переважно з великих шматків або їх суміші з дрібними для мінімізації пустот. Почерговість: для максимального заповнення об'єму печі компоненти різного розміру завантажують по черзі. Висота завантаження: рівень садки не повинен перевищувати висоту індуктора (котушки), щоб уникнути зайвих тепловтрат. Розміщення: шматки металу слід розміщувати концентричними колами паралельно виткам котушки. Плaskі елементи укладають горизонтально. Повнота тигля: категорично заборонено завантажувати тигель не повністю. Часте досипання шихти призводить до відкривання кришки та зниження температури. Безперервність: додавання нових порцій шихти вимагає переналаштування печі, що суттєво подовжує час плавки.

Ввімкнення печі. Запуск тигельної печі після завантаження проходить послідовно. Спочатку вмикається рубильник двигуна, після чого підключається відповідна шихті ємність. Далі головним рубильником на щиті замикається ланцюг «генератор-піч». Потім маховичком регулятора струму виводять реостат у ланцюзі збудження, уважно стежачи за тим, щоб стрілки при-

ладів не переходили за червону лінію, налаштовують резонанс шляхом підключення або відключення конденсаторів. Про правильне налаштування свідчить максимальний струм в індукторі при безпечних показниках генератора [1,2,3,7].

Проведення налагоджувальних робіт допускається лише на знеструмленому обладнанні; щоб уникнути зниження температури садки, процес повинен бути швидким.

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВКИ МЕТАЛУ В ТИГЕЛЬНІЙ ІНДУКЦІЙНІЙ ПЕЧІ

Тигельні печі забезпечують менший угар елементів та нижчий рівень азотного забруднення металу порівняно з іншими плавильними печами. Це досягається завдяки геометрії тигля – глибокій ванні з мінімальною площею дзеркала металу.

Електромагнітні сили в тигельних індукційних печах викликають природну конвекцію рідкого металу, що інтенсифікує металургійні реакції як у самому об'ємі ванни, так і на межі поділу метал-шлак. [1,4,5].

Для дрібного лиття сталі в сучасній промисловості активно використовуються індукційні тигельні печі. Завдяки швидкому плавленню, компактності та можливості порційної видачі металу, ці печі дозволяють налагодити ефективний масовий випуск виробів, не потребуючи значних виробничих площ чи складної оснастки. Кінцевий продукт вирізняється гарантованою якістю та належним хімічним складом.

Виробництво сталі в тиглях з кислою футеровкою вимагає застосування чистих шихтових матеріалів з мінімальним вмістом шкідливих домішок (сірки та фосфору), тоді як при використанні основної футеровки можлива вища частка скрапу в шихті.

У тигельних агрегатах із кислою чи основною футеровкою шлак підбирають таким чином, щоб уникнути його замішування в металі, забезпечуючи високий поверхневий натяг. Через те, що в індукційних печах без сердешника нагрівається шихта, а не шлак, останній є холоднішим за розплав, що знижує його металургійну ефективність. Щоб підвищити активність шлаку, використовують плавиковий шпат, який покращує рідкотекучість. Крім того, тигельні печі відрізняються значним руйнуванням футеровки під дією шлаку, а також незручністю її ремонту через вертикальне розташування та малу товщину стінок (для невеликих ємностей). Також обмежуючим фактором є

об'єм ванни. Завдяки руху металу, плавлення відбувається швидко, а процеси дегазації та видалення неметалевих включень – досить активно [1,4,5].

Великоємнісні тигельні печі дозволяють легко автоматизувати процес завантаження шихти, що триває лише кілька хвилин.

При підготовці шихти для кислих індукційних печей важливо враховувати слабку здатність процесу видаляти фосфор і сірку, тому їх сумарний вміст не має перевищувати 0,05%. Якщо в шихту додають сталь для підвищення вуглецю, вона має бути з низьким вмістом фосфору. Оскільки кремній, марганець та вуглець легко вигорають, допустимий вміст вуглецю в шихті може лише на 0,1% перевищувати цільовий рівень у металі. Для корекції високого вмісту вуглецю використовують окислений скрап або залізну руду (до 0,5% від маси шихти). Під час плавки металу в індукційних печах із кислотою футеровкою важливо враховувати, що джерелом шлаку є не лише кварцовий пісок, прилиплий до металобрухту, але й сам кремнезем, що складає футеровку тигля.

Використання тигельних печей з основною футеровкою забезпечує значну перевагу, оскільки дає змогу переробляти металобрухт будь-якого складу завдяки швидкому окисненню кремнію, марганцю та вуглецю.

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТИГЕЛЬНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

Розрахунок тигельної індукційної печі включає визначення параметрів індуктора й тигля, а також розрахунок її електротехнічних показників (рис. 5.1) [1,4,5,6,7].

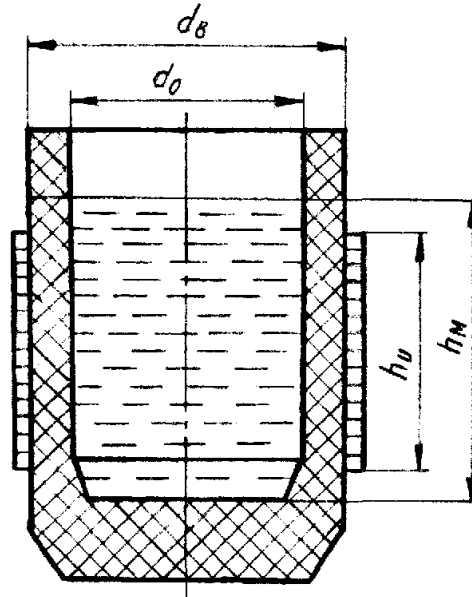


Рис. 5.1. До розрахунку основних розмірів тигельної індукційної печі

Об'єм рідкого металу

$$V_{м} = G/\rho = 0,5/7,2 = 0,07 \text{ м}^3; \quad (5.1)$$

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

Внутрішній діаметр тигля:

$$d_0 = \sqrt[3]{4V_{м}/\pi B} = \sqrt[3]{4 \cdot 0,07/3,14 \cdot 1,75} = 0,370 \text{ м}, \quad (5.2)$$

де B – коефіцієнт, що визначає співвідношення висоти металевого розплаву $h_{м}$ до внутрішнього діаметра тигля, залежно від його місткості. Приймаємо його $B = 1,75$.

Висота металу в тиглі:

$$h_{м} = B \cdot d_0 = 1,75 \cdot 0,370 = 0,647 \text{ м}. \quad (5.3)$$

Товщина стінки тигля печі:

$$S_1 = (0,25 \dots 0,3) \cdot d_0 = 0,280 \cdot 0,370 = 0,103 \text{ м}. \quad (5.4)$$

При визначенні частоти струму розрахунок проводимо для таких умов.

1. Завантаження тигля твердою шихтою, що має температуру 20 °С.

При цій умові:

Питомий електричний опір металу:

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

Відносна магнітна проникність:

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

Середній розмір куска металу:

$$d_M = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2} = \frac{0,4 + 0,32}{2} = 0,36 \text{ м.} \quad (5.7)$$

Мінімальна частота живильного струму:

$$f_{\min 1} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_1}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{20 \cdot 10^{-8}}{40 \cdot 0,36} = 0,96 \text{ Гц.} \quad (5.8)$$

2. Завантаження тигля твердою шихтою, що має температуру до 800 °С.

Для цієї умови маємо:

Питомий електроопір металу:

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

Відносна магнітна проникність:

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

Мінімальна частота живильного струму:

$$f_{\min 2} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_2}}{\mu_1 \cdot d_M^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{110 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,36} = 213 \text{ Гц.} \quad (5.11)$$

3. Тигель наповнений металевим розплавом, нагрітим до 1500 °С. Маємо наступне:

Питомий електроопір металу:

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

Відносна магнітна проникність:

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

Частота живильного струму, мінімальна:

$$f_{\min 3} = 25 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho_{M_3}}{\mu_1 \cdot d_0^2} = 25 \cdot 10^6 \frac{125 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 0,348^2} = 258 \text{ Гц.} \quad (5.14)$$

Прийmemo $f = 50 \text{ Гц}$.

Товщина шару азбесту, що слугує термоізоляцією між тиглем та індуктором

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

Діаметр індуктора, внутрішній

$$D_B = d_0 + 2(S_1 + S_2) = 0,370 + 2(0,103 + 0,005) = 0,916 \text{ м.} \quad (5.16)$$

Корисна теплова потужність плавильного агрегату $P_{\text{кор}} = W_{\text{теор}} \cdot P'$,

де $W_{\text{теор}}$ – питома витрата енергії, теоретична $W_{\text{теор}} = 625 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{т}$; P' – продуктивність тигельної печі, плавильна т/год.

Плавильна продуктивність печі

$$P' = P(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4)/\tau_2 = 0,5(0,28 + 2,1 + 0,25 + 0,068)/2,1 = 0,642 \text{ т/год.},$$

де τ_1 – час завантаження шихтових матеріалів в тигельну піч, год.;
 τ_2 – час плавлення, год.; τ_3 – час доводки металу, год.; τ_4 – час зливання металу з печі, год.; P – продуктивність тигельної печі т/год;

$$P_{\text{кор}} = W_{\text{теор}} \cdot P' = 625 \cdot 0,642 = 401 \text{ кВт.} \quad (5.17)$$

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

де $\eta_{\text{терм}}$ – термічний К.К.Д тигельної печі, приймаємо його $\eta_{\text{терм}} = 0,85$

$$P_a = 401/0,85 = 471 \text{ кВт.} \quad (5.18)$$

Висота індуктора печі

$$h_i = 0,85h_M = 0,85 \cdot 0,390 = 0,33 \text{ м.} \quad (5.19)$$

Глибина проникнення струму в метал

$$\Delta e = 503 \sqrt{\rho_M/\mu_M f} = 503 \sqrt{125 \cdot 10^{-8}/1 \cdot 50} = 0,079 \text{ м.} \quad (5.20)$$

Напряга магнітного поля в індукторі тигельної печі

$$H = 10^3 / K_s \sqrt{\frac{P_a}{6,2 \cdot d_0 h_M A_M \sqrt{\rho_M \mu_M f}}},$$

де K_s – коефіцієнт, що враховує вплив самоіндукції та індуктивного зв'язку («індуктор – садка»), $K = 0,9$; A_M – для корекції активної потужності застосовується коефіцієнт, що враховує геометричну кривизну металевого завантаження. Він визначається залежністю від співвідношення між діаметром садки та глибиною проникнення електромагнітного поля, $d_0/\Delta e = 0,370/0,079 = 4,68$, $A_M = 0,78$

$$H = \frac{10^3}{0,9} \sqrt{\frac{471}{6,2 \cdot 0,370 \cdot 0,647 \cdot 0,78 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50}}} = 252317 \text{ А/м.} \quad (5.21)$$

Реактивна потужність садки, яка буде виділятися у металі

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 d_0 \cdot h_M \sqrt{\rho_M \mu_M f} R_M K_s^2, \quad (5.22)$$

де R_M – коефіцієнт реактивної потужності, $R_M = 1$.

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-9} (252316)^2 \cdot 0,370 \cdot 0,647 \sqrt{125 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} \cdot 1 \cdot 0,9^2 = 604 \text{ квар.}$$

Реактивна енергія, що виникає в зазорі між індуктором та оброблюваним металом

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0 \cdot h_M \left[\left(\frac{D_B}{d_0} \right) - 1 \right]; \quad (5.23)$$

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} (252316)^2 \cdot 50 \cdot 0,370 \cdot 0,647 \left[\left(\frac{0,916}{0,370} \right)^2 - 1 \right] = 24142 \text{ квар.}$$

Розрахунок оптимальної товщини стінки індукторної трубки для мінімізації активних втрат потужності.

$$S_{\text{тр}} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot \Delta e, \quad (5.24)$$

де Δe – проникнення електричного струму в матеріал індуктора (мідь) на відповідну глибину $\Delta e = 10$ мм

$$S_{\text{тр}} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot 0,01 = 13 \text{ мм.} \quad (5.25)$$

Втрати потужності активної в індукторі печі

$$P_i = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 d_b h_i A_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{3.i}, \quad (5.26)$$

де ρ_i і μ_i – питомий опір електричному струму та відносна магнітна проникність, що властиві матеріалу індуктора, $\rho_i = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м: $\mu_m = 1$; A_i – коефіцієнт, що відображає вплив кривизни індуктора на активну потужність, $A_i = 0,95$; $K_{3.i}$ – коефіцієнт заповнення самого індуктора, $K_{3.i} = 0,8$.

$$P_i = 6,2 \cdot 10^{-9} (252316)^2 \cdot 0,916 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 208 \text{ кВт.} \quad (5.27)$$

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

$$Q_i = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 d_b h_i R_i \sqrt{\rho_i \mu_i f} / K_{3.i} \text{ квар.} \quad (5.28)$$

де R_i – коефіцієнт реактивної потужності, розрахований з урахуванням криволінійності індуктора, $R_i = 0,8$

$$Q_i = 6,2 \cdot 10^{-9} (252316)^2 \cdot 0,916 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 175 \text{ квар.} \quad (5.29)$$

Загальна активна потужність $P = P_a + P_i = 471 + 208 = 679$ кВт.

Реактивна потужність загальна

$$Q = Q_m + Q_3 + Q_i = 604 + 24142 + 175 = 24921 \text{ квар.} \quad (5.30)$$

Сумарний показник потужності в системі «індуктор – металевий виріб»

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{679^2 + 24921^2} = 24930 \text{ кВт·А.} \quad (5.31)$$

Струм в індукторі печі

$$I = 10^3 S / U_i. \quad (5.32)$$

де U_i – показник напруги в індукторі тигельної печі під час роботи на максимальній потужності від трансформаторного обладнання, $U_i = 2430\text{В}$

$$I = 10^3 \cdot 24930/2430 = 10259 \text{ А.} \quad (5.33)$$

Число витків індуктора

$$n = H \cdot h_i / I = 252316 \cdot 0,5 / 10259 = 13, n = 13. \quad (5.34)$$

Крок витка індуктора

$$h_{\text{ВИТ}} = h_i / n = 0,5 / 13 = 0,0038 \text{ м.} \quad (5.35)$$

Висота трубки індуктора

$$h_{\text{ТР}} = h_{\text{ВИТ}} \cdot K_{\text{з.і.}} = 0,0038 \cdot 0,8 = 3,04 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (5.36)$$

Товщина міжвиткової ізоляції індуктора

$$h_{\text{ІЗОЛ}} = h_{\text{ВИТ}} - h_{\text{ТР}} = 0,00304 - 2 \cdot 10^{-3} = 0,0010 \text{ м.} \quad (5.37)$$

Міжвиткова напруга індуктора

$$U_{\text{ВИТ}} = U_i / n = 2430 / 13 = 186 \text{ В.} \quad (5.38)$$

Величина напруги на одиницю довжини ізоляції міжвиткового простору індуктора

$$U_1 = 10^{-2} \cdot U_{\text{ВИТ}} / h_{\text{ІЗОЛ}} = 10^{-2} \cdot 186 / 0,0010 = 1860 \text{ В.} \quad (5.39)$$

Ширина трубки індуктора. оберемо трубку круглого профілю діаметром 0,35 мм із товщиною стінки приблизно 15 мм. Площа поперечного перерізу індукторної трубки, через яку пропускається електричний струм, складає 3456 мм^2 . Щільність струму при цьому $347,8:3456 = 0,1 \text{ А/мм}^2$, це допустимо.

Природний $\cos \varphi$ тигельної печі

$$\cos \varphi = P / S = 679 / 24930 = 0,027. \quad (5.40)$$

Ємність конденсаторної батареї

$$C = 10^9 \cdot Q / 2\pi f U_k^2, \quad (5.41)$$

де U_k^2 – конденсаторна напруга відповідає рівню напруги вищого ступеня трансформаторного обладнання, $U_k = 2430\text{В}$.

$$C = 24921 \cdot 10^9 / 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2430^2 = 13441 \text{ мкФ}. \quad (5.42)$$

Переріз магнітопроводів

$$F_{\text{МГ}} = U_i / 4,44 \cdot f n B. \quad (5.43)$$

де B – індукція в магнітопроводі, $B = 1 \text{ Вб/м}^2$

$$F_{\text{МГ}} = 2430 / 4,44 \cdot 50 \cdot 13 \cdot 1 = 0,84 \text{ м}^2. \quad (5.44)$$

Площа поперечного перерізу для одного магнітопроводу (кількість магнітопроводів становить 24)

$$f_{\text{МГ}} = 10^4 F_{\text{МГ}} / N_{\text{МГ}}, \quad (5.45)$$

де $N_{\text{МГ}}$ – число пакетів для магнітопроводу навколо індуктора і становить $N_{\text{МГ}} = 24$

$$f_{\text{МГ}} = 10^4 \cdot 0,84 / 24 = 350 \text{ см}^2. \quad (5.46)$$

РОЗДІЛ 6. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС

Розрахунок матеріального балансу при індукційній плавці у тиглі охоплює:

- 1) визначення переліку та кількості компонентів шихти, необхідних для отримання заданого сплаву;
- 2) метод формування шихтових матеріалів;
- 3) складання загального матеріального балансу [1,2,3].

До складу шихти для сталеплавильного виробництва входять компоненти металевого та неметалевого походження. Металева складова формується із феросплавів, 32% чавуну та 92% брукхту.

Залишки ливникової системи та стружка, отримана в результаті зачистки (шабрування) поверхні болванок від шлакових включень, класифікуються як ливарні відходи. Виробничі втрати інших цехів представлені обрізками, кромками, вирізками та закатами.

Різноманітні металобрукхт і застарілі вироби, що відповідають шихті за складом, але мають різний відсотковий вміст компонентів, відносять до призовних відходів, які використовують у шихтових матеріалах. Хімічний склад шихти наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Хімічний склад шихти

№ п/п	Складові шихти	Вміст, %				
		C	Si	Mn	S	P
1	Скрап	0,3	0,3	0,6	0,04	0,05
2	Чавун	4	1,1	0,8	0,05	0,15
3	Феросіліцій ФС75	0,1	77	0,4	0,03	0,05
4	Феромарганець ФМн75	7,0	2	75	0,03	0,45

Під час процесу плавлення шихтових матеріалів з окисненням будуть вигорати: C – 15%; Fe – 35 %, Si , Mn – 70%.

Матеріальний баланс плавки металу в тигельній печі:

Вміст С в металі при розплавленні металу

$$[C]_p = 0,35 + 0,15 = 0,5\% \quad (6.1)$$

Приймемо наступне, що відходи власного виробництва будуть становити біля 40 % шихти.

Введемо змінні x (скрап) та y (метал) і складемо систему рівнянь для знаходження їх значень

$$\begin{cases} x \cdot 500 \frac{0,3}{100} + y \cdot 500 \cdot \frac{4}{100} = 0,6 \cdot \frac{500}{100} \\ x + y = 1 \end{cases} \quad (6.2)$$

$$y = 0,08$$

$$x = 0,92$$

Отже, шихта (тобто шихтові матеріали) мають такий склад

$$500 \cdot 0,92 = 460 \text{ кг} \text{ – скрап}$$

$$500 \cdot 0,08 = 40 \text{ кг} \text{ – чавунний лом}$$

В процесі плавлення шихтових матеріалів окислюються С, Si, Mn та Fe в таких кількостях

$$G_C = (0,3 \cdot 0,92 + 4 \cdot 0,08) \cdot 500 \cdot 0,15/100 = 0,447 \text{ кг}$$

$$G_{Si} = (0,3 \cdot 0,92 + 1,1 \cdot 0,08) \cdot 500 \cdot 0,7/100 = 1,274 \text{ кг}$$

$$G_{Mn} = (0,6 \cdot 0,92 + 0,8 \cdot 0,08) \cdot 500 \cdot 0,7/100 = 2,156 \text{ кг} \quad (6.3)$$

$$G_{Fe} = 500 \cdot 0,25/100 = 1,25 \text{ кг}$$

$$\Sigma G_i = 5,127 \text{ кг}$$

В процесі плавки відбувається утворення та перехід в шлак наступних оксидів

$$G_{SiO_2} = 1,27 \cdot 60/28 = 2,73 \text{ кг}$$

$$G_{MnO} = 2,156 \cdot 71/55 = 2,78 \text{ кг}$$

$$G_{FeO} = 1,25 \cdot 72/56 = 1,61 \text{ кг}$$

$$\Sigma = 7,12 \text{ кг} \quad (6.4)$$

Для ефективного переведення оксидів заліза та марганцю у шлак, у завалку необхідно додавати чистий кварцовий пісок у співвідношенні 1:1.

$$G_n = 2,78 + 1,61 = 4,39 \text{ кг.} \quad (6.5)$$

З метою забезпечення належної товщини шлакового покриття, у ванну в процесі плавлення додають обіговий шлак у розмірі 2% від ваги металеві завалки:

$$G_{\text{об.шл.}} = 500 \cdot 2/100 = 10 \text{ кг.} \quad (6.6)$$

Припустимо, що певна кількість футерівки розчиняється у шлаку, що складає приблизно 0,5% від маси металеві завалки:

$$G_{\text{фут.}} = 500 \cdot 0,5/100 = 2,5 \text{ кг.} \quad (6.6)$$

Споживання атмосферного кисню тигельною піччю для окислювальних процесів у металі під час плавки.

$$\begin{aligned} G_{\text{O}_2, \text{C}} &= [0,447]16/12 = 0,596 \text{ кг} \\ G_{\text{O}_2, \text{Si}} &= [1,274]32/28 = 1,456 \text{ кг} \\ G_{\text{O}_2, \text{Mn}} &= [2,156]16/55 = 0,627 \text{ кг} \\ G_{\text{O}_2, \text{Fe}} &= [1,25]16/56 = 0,357 \text{ кг} \\ G_{\text{O}_2, i} &= 3,036 \text{ кг} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Утворення CO:

$$G_{\text{CO}} = 0,447 \cdot 28/12 = 1,043 \text{ кг.} \quad (6.8)$$

Вихід шлаку, отриманий у результаті розплавлення шихти

$$G_{\text{шл}} = 7,12 + 4,39 + 10 + 2,5 = 24,01 \text{ кг.} \quad (6.9)$$

або $134 \cdot 100/400 = 3,5\%$ становить від маси металозавалки

Кількість металу після розплавлення

$$G_{\text{мет}} = 500 - 5,127 = 494,87 \quad (6.10)$$

Результати проведених розрахунків наводимо в табл. 6.2.

Зміною маси шлаку та металу при доводці можна знехтувати.

Щоб визначити кількість феросплавів, яку слід додати в рідкий метал для отримання заданого складу, використовуємо такий вираз:

$$G_{\text{ф}} = \frac{G_{\text{р.м.}} \cdot ([E]_{\text{ц}} - [E]_{\text{п}})}{E_{\text{ф}} \cdot K_{\text{Е}}}, \quad (6.10)$$

де $G_{\text{р.м.}}$ – маса рідкого металу, кг; $[E]_{\text{ц}}$, $[E]_{\text{п}}$ – середній в чавуні та початковий в металі перед розкисленням вміст елемента, який береться у відсо-

тках за масою; E_{ϕ} – вміст елемента-розкислювача у феросплаві (також береться в відсотках за масою); K_E – коефіцієнт засвоєння елемента.

Матеріальний баланс процесу плавлення сплаву приведемо в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Матеріальний баланс процесу плавлення сплаву в тигельній індукційній печі ємністю 0,5 т/год

№ п/п	Статті (прибутку або видатку)	кг	% від м/з
	Прибутки:		
1.	Скрап	460	92
2.	Чавун	40	8
3.	Пісок	4,39	0,9
4.	Оборотний шлак	10	2
5.	Футеровка	2,5	0,5
6.	Кисень атмосферний	3,04	0,6
	Σ	519,93	104
	Видатки		
1.	Метал	494,87	99
2.	Шлак	24,0	4,8
3	Газ CO	1,04	0,2
	Σ	519,93	104

Розрахунок вмісту Mn та Si перед розкисленням:

$$\begin{aligned}
 [\text{Mn}]_n &= (0,92 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,08) \cdot 0,3 = 0,18\% \\
 \text{Si}_n &= (0,92 \cdot 0,3 + 0,08 \cdot 1,1) \cdot 0,3 = 0,11\%
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

Кількість феромарганцю

$$G_{\text{FeMn}} = \frac{494,87(0,65 - 0,18)}{75 \cdot 0,7} = 4,43 \text{ кг.}
 \tag{6.12}$$

Кількість феросиліцію

$$G_{\text{FeSi}} = \frac{498,87(0,27 - 0,11)}{77 \cdot 0,7} = 14,7 \text{ кг.}
 \tag{6.13}$$

РОЗДІЛ 7. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС

Робота тигельної печі базується на принципах збереження енергії, які відображає тепловий баланс. Його розрахунок необхідний для визначення витрат палива чи електроенергії, а також для проведення теплотехнічного аналізу роботи печі.

Тепловий баланс тигельної печі – це співвідношення між усіма джерелами теплонадходження та тепловитрат. Він базується на визначенні витрат енергії та дослідженні теплового режиму роботи печі [1,2,3].

Тепло в тигельних індукційних печах утворюється через трансформацію електроенергії та окислення металу. Основна частина цієї енергії витрачається на плавку та нагрівання металу, а також на покриття внутрішніх витрат печі. При цьому частина тепла втрачається в навколишнє середовище через теплопровідність, конвекцію та випромінювання.

Рівняння теплового балансу тигельної печі наступне:

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

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

Розрахунок теплового балансу печі здійснюється в кВт, з урахуванням, що сумарний час на завантаження сировини та плавлення становить 1,5 години.

Теплота екзотермічних реакцій, кВт

$$Q_{\text{екз}} = (11658 \cdot 0,447 + 27696 \cdot 1,274 + 6435 \cdot 2,156 + 4289 \cdot 1,25) / 1,5 \cdot 3600 = 11,1 \quad (7.2)$$

Витрата електроенергії

$$Q_{\text{ел.ен.}} = IU \cdot t / 3600 = 31602 \cdot 800 \cdot 1,35 / 3600 = 878,996 \text{ кВт} \quad (7.3)$$

Теплота металу та шлаку, коли визначаємо їх тепловміст при $t_{\text{м}} = 1550^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{шл}} = 1400^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{м}} + Q_{\text{шл}} = [(50 + 0,87 \cdot 1400)494,87 + (1,86 \cdot 1550 - 1100)2,401] / 1,5 \cdot 3600 = 136,7 \quad (7.4)$$

$Q_{\text{кл}}$ розраховуємо за виразом

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

де $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коефіцієнт конвективного теплообміну від зовнішньої поверхні кладки до навколишнього повітря; $t_{\text{кл}} = 100 \text{ }^\circ\text{С}$ і $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ – температури зовнішньої поверхні кладки та повітря, що її оточує; F – величина зовнішньої поверхні тигельної електропечі.

$$F = 2\pi d^2/4 + \pi DL = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,5^2/4 + 3,14 \cdot 3,5 \cdot 2,1 = 42,31 \text{ м}^2; \quad (7.6)$$

$$Q_{\text{кл}} = 20(100 - 20) \cdot 42,31 = 67,68 \text{ кВт}. \quad (7.7)$$

Величину $Q_{\text{охол}}$ визначаємо, при витраті води біля $10 \text{ м}^3/\text{год}$, $t_{\text{в}}^{\text{поч}} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$, $t_{\text{в}}^{\text{кін}} = 60 \text{ }^\circ\text{С}$;

$$Q_{\text{охол}} = (10000/3600) \cdot 4,2(60 - 20) = 467 \text{ кВт}. \quad (7.8)$$

Для наступних двох статей видаткової частини теплового балансу тигельної печі прийmemo таке співвідношення:

$$Q_{\text{випр}} + Q_{\text{виб}} = 0,2Q_{\text{ел.ен.}} = 0,2 \cdot 224,0 = 44,8 \text{ кВт}. \quad (7.9)$$

Результати розрахунків узгоджуються з літературними даними щодо трансформаторної потужності 0,5-тонних тигельних печей.

Результати проведеного розрахунку теплового балансу тигельної індукційної печі наведемо в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Тепловий баланс плавки сталі в тигельній печі ємністю 0,5 т.

№ п/п	Статті прибутку	кВт	%	№п/п	Статті видатку	кВт	%
1	$Q_{\text{ел.ен.}}$	224,0	95,3	1	$Q_{\text{м}} + Q_{\text{шл.}}$	136,7	58,4
2	$Q_{\text{екз.}}$	11,1	4,7	2	$Q_{\text{кл.}}$	6,8	2,9
	Σ	235,1	100	3	$Q_{\text{охол}}$	46,7	19,9
				4	$Q_{\text{випр}} + Q_{\text{виб}}$	44,9	19,1
					Σ	335,1	100

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній бакалаврській роботі розроблено проект індукційної тигельної печі з основною футеровкою, призначеної для переплаву сталі, продуктивністю 0,5 т/год. У роботі обґрунтовано головні геометричні розміри та електротехнічні характеристики агрегату, а також визначено оптимальний режим його функціонування. Проведено розрахунки теплового та матеріального балансів, необхідні для проектування обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: навч. посіб. для студ. вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
2. Хричиков В.Е., Меняйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: навч. посіб. 2-ге вид., доопрац. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 89 с.
3. 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.
4. Костик К.О., Терентьев Д.П. Особливості розрахунку електрромагнітних 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. Шокаръов Д.А. Енергетичні установки. *Індукційні нагрівальні електроустановки*: конспект лекцій. 2022. 18с.
7. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Рафінування переробного чавуну» з дисципліни «Позаагрегатна обробка розплавів» освітньо професійної програми другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання. Укл.: Чубін К.І., Похвалітий А.А. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 22 с.

ДОДАТКИ