

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 розрахунків дугової електросталеплавильної печі продуктивністю 5 т/год"

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ПМ(ОЛ)-21-3ск

спеціальності 131

«Прикладна механіка»

_____ Ярослав КУРОП'ЯТНИК

«_____» _____ 20__ р.

Керівник бакалаврської роботи

Старший викладач

_____ Микола БОСІЙ

«_____» _____ 20__ р.

Рецензент

канд. техн. наук, старший викладач

_____ Любов 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 (освітньо-наукова) програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛВ

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

«____» _____ 20__р.

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

Куроп'ятника Ярослава В'ячеславовича

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок дугової електросталеплавильної 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: описати основні параметри роботи печі, конструкцію та основи роботи ДСП. Розрахувати основні розміри, матеріальний і тепловий баланси проекрованої 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

_____ Ярослав КУРОП'ЯТНИК

АНОТАЦІЯ

Куруп'ятник Я. В. "Проектування і розрахунок дугової електросталеплавильної печі продуктивністю 5 т/год" спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024. – 37с. Матеріали ілюстрації 3 іл.

Метою кваліфікаційної роботи є вивчення конструкції роботи дугової сталеплавильної печі та основних параметрів роботи її. Розрахувати матеріальний і тепловий баланси печі, основні розміри проєктованого обладнання.

В даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розрахована дугова електросталеплавильна піч продуктивністю 5 т/год з кислотою футеровкою. В розрахунок ДСП входять: матеріальний та тепловий баланси.

До графічної частини входить загальний вид дугової електросталеплавильної печі та електродотримачів.

дугова піч, матеріальний баланс, тепловий баланс.

ABSTRACT

Kuropyatnik Ya. V. " Design and calculation of an arc electric steel melting furnace with a capacity of 5 t/h " specialty 131 "Applied mechanics", OPP - "Computer engineering of technologies, robotics and 3D printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024 - 37 p. Illustration materials 3 images.

The purpose of the qualification work is to study the design of the arc steel melting furnace and its main operating parameters. Calculate the material and heat balances of the furnace, the main dimensions of the designed equipment.

In this bachelor's qualification work, an arc electric steel-melting furnace with a capacity of 5 t/h with an acidic lining is calculated. The chipboard calculation includes: material and heat balances.

The graphic part includes a general view of the arc electric steel melting furnace and electric holders.

arc furnace, material balance, heat balance

З М І С Т

	Стор.
Вступ.....	7
Розділ 1. Основні елементи дугової електросталеплавильної печі.....	8
1.1. Фундамент печі.....	8
1.2. Корпус печі.....	8
1.3. Вогнетривка кладка.....	8
1.4. Механізм нахилу.....	9
1.5. Механізм переміщення електродів.....	9
1.6. Електродотримачі.....	9
1.7. Охолоджувачі електродів (економайзери).....	9
1.8. Механізм завантаження дугової печі	9
1.9. Електричне устаткування дугової печі.....	9
Розділ 2. Устрій та принцип роботи дугової сталеплавильної печі.....	10
2.1. Принцип дії електросталеплавильних печей.....	11
2.2. Процеси плавлення металу в дуговій печі.....	18
Розділ 3. Розрахунок дугової печі.....	21
3.1. Основні розміри робочого простору печі.....	21
3.2. Розрахунок матеріального балансу.....	24
3.3. Розрахунок теплового балансу.....	28
Висновки.....	30
Список використаних джерел.....	31
Додатки.....	32
Додаток 1. Дугова електросталеплавильна піч.....	33
Додаток 2. Загальний вигляд дугової електросталеплавильної печі	34
Додаток 3. Електродотримачі дугової електросталеплавильної печі	35

Вступ

Для виплавлення металу (сталі і чавуну) використовуються дугові електросталеплавильні печі різної ємності.

Дугова електросталеплавильна піч – це піч, в якій використовується теплота електричної дуги для плавлення металів та інших сплавів. Перші промислові дугові печі побудовані в 1898-1901рр. у Франції та Італії. Промислові дугові електросталеплавильні печі мають продуктивність від 0,5 до 200 т і більше. Для плавлення сплавів на виробництві частіше всього використовують дугові печі з меншою продуктивністю від 3 до 25т. [1-5].

Дугові сталеплавильні печі мають широкі можливості у виборі шихти, необмеженому сортаменті виплавленого металу і високої якості, легкість регулювання теплових процесів, маневреність в послідовності плавок.

Переваги електроплавки металу в дуговій печі перед іншими способами сталеплавильного виробництва пов'язанні зі спектром нагріву металу енергією, яка виділяється від електричної дуги. Це дозволяє плавно регулювати температуру металу, вводити в піч велику кількість легуючих добавок, мати у печі відновлювальну атмосферу і безокисні шлаки, одержувати метал з низьким вмістом неметалевих включень, отримувати сталь з низьким вмістом сірки [1-5].

При розрахунку дугових електросталеплавильних печей визначаються оптимальні співвідношення між розмірами печі, а також її ємністю та потужністю самого трансформатора, який підводить електроенергію до печі. Далі визначаються геометричні розміри самого робочого простору дугової печі, потім тепловий розрахунок. Також розраховується потужність трансформатора і продуктивність дугової печі та проводиться розрахунок основних розмірів робочого простору печі, матеріального та теплового балансу [1-5].

Розділ 1. Основні елементи дугової печі

До основних елементів дугової печі відноситься: фундамент печі, корпус печі і футеровка печі, механізм нахилу, механізм переміщення електродів, електродотримачі, охолоджувачі електродів (економайзери), механізм завантаження дугових печей, електричне устаткування печей [1-5].

1.1. Фундамент печі

Фундамент печі, в основному, виконують із залізобетону і зв'язують з кладкою приямка, який також виконують відповідних розмірів для розташування в ньому розливочного ковша металу при нахилі самої печі.

1.2. Корпус печі

Корпус дугової печі також складається зі зварного або клепаного кожуха із сталі товщиною до 30 мм з самою внутрішньою футеровкою.

1.3. Вогнетривка кладка

Вогнетривка кладка футеровки дугової печі виконується наступним чином. На саме дно печі кладуть шар дрібного порошку розміром 5-6 мм, на нього кладуть два ряди цегли шамотної і засипають шамотним порошком. Далі кладуть шар цегли з магнезиту і шви засипають також порошком тільки з магнезиту, а бокові стінки кожуха печі викладають із листового азбесту розміром 20 мм. Магнезитова кладка дугової печі виконується повністю всіх стін, вкінці ще кладуть два ряди цегли з хромомagneзиту, а тоді ще динасову цеглу і зверху викладають подушку з кварцового піску. Сам отвір робочого вікна роблять із магнезиту. Набивка поду печі виконується магнезитовим порошком і рідким склом та щільно утрамбовується [1-5].

Кладка футеровки поду і стін для кислого способу плавки робиться із цегли з динасу. Під робиться з кварцового порошку або кварцового піску з рідким склом. На верхні стіни, що стикаються до склепіння роблять шар хромистої руди з добавкою вогнетривкої глини. Кожух печі також викладають з азбесту. Далі кладуть шамотну цеглу шаром приблизно 200 мм потім трамбують набивну частину футеровки з кварцового піску і рідкого скла.

1.4. Механізм нахилу

Механізм нахилу дугової печі дає змогу плавно нахиляти піч у бік зливного жолоба на 45° та у бік робочого вікна на 15° для зливання металу. Нахил дугової печі можливо здійснювати вручну або електродвигуном з редуктором.

1.5. Механізм переміщення електродів

Механізм переміщення електродів застосовують для утримання електродів в печі, а також для їх підйому і опускання. Дугові електропечі обладнанні автоматичними пристроями, які піддержують відповідну силу струму та регулювання положення самих електродів по висоті. Відстань від електрода до самого металу визначається довжиною дуги – це електрична потужність печі.

1.6. Електродотримачі

Електродотримачі необхідні для закріплення в ньому електрода, а також пересування його. Через сам електродотримач повинна підводитись електроенергія до електрода, тому необхідно забезпечити мінімальний опір на поверхні їх контакту.

1.7. Охолоджувачі електродів (економайзери)

Охолоджувачі електродів виготовляються литими з водяним охолодженням. Вони необхідні для ущільнення щілини в склепінні навколо електрода.

1.8. Механізм завантаження печі

Механізм завантаження печі виконують через склепіння, яке знімається. Шихта завантажується в робочий простір, що відкривається.

1.9. Електричне устаткування печі

Електричне устаткування печі наступне: поруч з нею розміщують трансформатор для зменшення напруги, оскільки в процесі плавлення металу необхідна змінна напруга на електродах, а трансформатор має декілька ступенів напруги. До кожного з електродів підводимо одну фазу трифазного струму. Включаючи їх можливо змінювати напругу на електродах. Робота печі полягає в нерівномірному навантаженні в період плавлення і частих коротких замикання в період плавлення шихти [1-5].

Розділ 2. Устрій та принцип роботи дугової сталеплавильної печі

На рис. 2.1 наведено схему дугової печі трифазного змінного струму [1,3-5].

Електричний режим роботи дугової печі залежить від теплового режиму процесу плавлення металу. При доведенні рідкого металу до необхідного хімічного складу потужність дугової печі порівняно невелика. Регулювати тепловий режим печі можна за допомогою зміни напруги на електродах або довжину дуги, тобто силу току електричної дуги. Дугову піч підключають до трифазної мережі частотою напруги від 6-35кВ. Для печей невеликої продуктивності передбачено дві-чотири ступені напруги трансформатора, а вже для печей більшої ємності можливо і до 25 ступенів, що дозволяє для режиму плавлення підбирати оптимальну напругу [1-8].

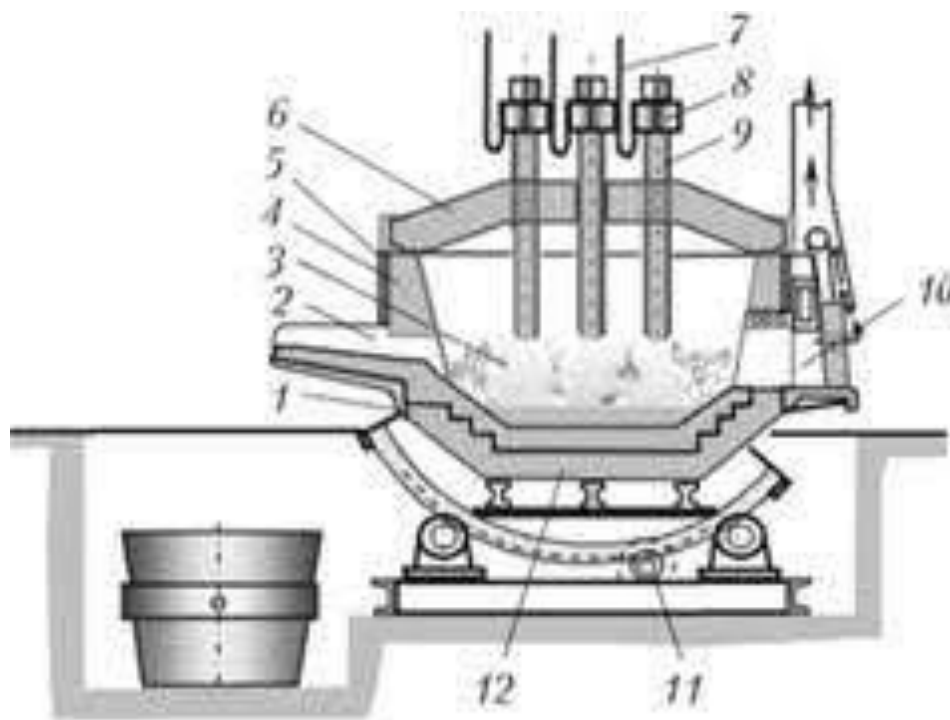


Рис. 2.1 Схема дугової електросталеплавильної печі:

1 – футеровка; 2 – зливний жолоб; 3 – металева шихта; 4 – сталевий кожух; 5 – стінка; 6 – склепіння; 7 – електричні кабелі; 8 – електродотримачі; 9 – циліндричний графітизований електрод; 10 – робоче вікно; 11 - привід для нахилу печі; 12 – під печі

2.1 Принцип дії електросталеплавильних печей

В дугових електропечах (ДСП) енергія перетворюється у тепло в електричній дузі. Теплота електричної дуги передається до металу такими способами, як випромінюванням та конвекцією [1-8].

Потужність, яка виділяється у печі, описується виразом:

$$W = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \text{ Дж},$$

де U – напруга, В; I – сила струму, А; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності пічної установки, ККД дугової печі складає 60%.

Дугові сталеплавильні печі живляться трифазним змінним струмом маючи три циліндричних графітизованих електроди 9, які закріплені в електродотримачі 8, до яких підводиться електричний струм по кабелях 7. Між електродом і металевою шихтою 3 виникає електрична дуга. Корпус печі має форму циліндра. Зовні він закріплений у міцний сталевий кожух 4, в середині футерований основною або кислою цеглою 1. Плавильний простір обмежено стінками 5, подом 12 і склепінням 6. З'ємне склепіння печі 6 має отвори для електродів. В стінці корпусу знаходиться робоче вікно 10 (для зливу шлаку, завантаження феросплавів, взяття проб), закрите при плавленні заслінкою. Готову сталь випускають через зливний отвір зі зливним жолобом 2. Піч спирається на сектори і має привід 11 для нахилу в бік робочого вікна або жолоба. Піч завантажують при знятому склепінні. Ємність дугових печей становить 0,5-400 тон. У металургії застосовують дугові електропечі з основною, а в ливарних з кислою футеровкою (рис. 2.1).

Принцип плавлення в дугових електропечах полягає в зведенні двох вугільних електродів, з'єднаних із джерелом електроживлення, а потім розводять їх на деяку відстань, то між ними виникає безперервний розряд – електрична дуга. Цей процес супроводжується виділенням великої кількості теплоти.

Залежно від способу передачі теплоти від дуги до металу дугові печі бувають прямого, непрямого, змішаного і плазмового нагрівання (рис. 2.2).

В електросталеплавильному виробництві найбільше розповсюдження отримали печі прямого нагріву (рис. 2.2). Дугові печі непрямого нагріву використовуються в кольоровій металургії та в ливарних цехах для розплавлення чавуну та сплавів.

Найбільш високий ККД (70 %) мають електричні печі із закритою дугою (феросплавні печі). В наш час в металургії все більше розповсюдження отримують плазменно-дугові печі (ПДП, рис. 2.2). За формою ванни, футеровки та іншим конструктивним ознакам ПДП нагадують печі ДСП, тільки замість електродів використовують плазмотрони. Плазмотрони працюють на постійному та змінному струмі у декілька сот тисяч ампер та на напрузі 30-150В. При роботі на постійному струмі катодом служить верхній водоохолоджуваній електрод, а анодом ванна рідкого металу, який контактує з водоохолоджуваним мідним подовим електродом. Робочий простір печі заповнюється при роботі плазмоутворюючим газом (аргоном, азотом або воднем) та відповідно створюється нейтральна або відновна атмосфера. При плавлі неметалевої шихти використовують плазмотрони непрямої дії.

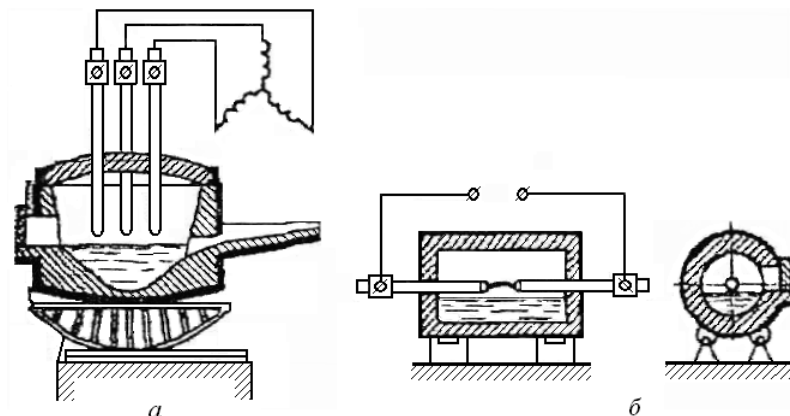


Рис. 2.2 Дугові електропечі, прямого нагріву (а) і непрямої дії (б).

При непрямому нагріванні електричні дуги горять між електродами на деякій відстані від металу, а при прямому між електродами і металом, який нагрівається, що є однією з ділянок електричного ланцюга. Для виробництва сталі використовують переважно печі прямого нагрівання металу. У печах змішаного нагрівання дуги горять під шаром твердої шихти, що ото-

чує електрод. Шихта нагрівається теплотою, що виділяється в дузі безпосередньо в самій шихті при проходженні через неї електричного струму. Такі печі використовуються в основному для виробництва чавуну та феросплавів. В установках плазмового нагріву тепло переноситься іонізованим потоком газу, який подається під тиском у плазмотрон. Плазменні печі використовуються для плавлення спеціальних сталей, сплавів та чистих металів [1-8].

Дугові печі по способу відкривання завантаження шихти поділяють на три типи.

Печі, у яких при завантаженні шихти, склепіння, підвішене до моста, піднімається і з під нього викочується корпус печі, відносяться до печей з корпусом, що викочується.

Печі, у яких склепіння піднімається над піччю і разом з мостом від'їжджає у бік завантажувального вікна або зливного отвору, відносяться до печей з від'їжджаючим склепінням.

Піч, у яких склепіння піднімається над піччю, а опорна колона зі склепінням і стояками повертається навколо осі на $60-90^{\circ}$ і відкриває робочий простір печі, відносять до печей зі склепінням, що відкриваються.

Кожух це частина корпусу, який розташований вище порога робочого вікна. За формою кожух виконаний циліндричноконічним. Кожух з'єднаний із днищем за допомогою пальців із клинами, що дозволяє від'єднати й знімати його під час ремонту футеровки. До верхньої частини кожуха кріпиться кільце пісового затвору. У корпусі зроблені два вирізи для робочого вікна і зливного отвору, які для посилення корпусу обрамлені литими рамами. До рами корпусу біля зливного отвору під кутом 12° до горизонталі закріплений зливний носок, що представляє собою футерований відкритий жолоб. Довжина зливного носка залежить від розташування печі в пічному прольоті цеху і може становити від 1 до 3 м.

Робочий простір печі визначається конфігурацією кожуха, який в існуючих електропечах має різну форму. Більш широко використовуються печі з

похилими циліндричними й циліндроконічними стінками, рідше зустрічаються печі зі стінками діжкоподібної форми.

У всіх випадках форма склепіння й ванна, що вміщує метал і шлаки однакова. Ванна утворена футеровкою подини, має сфероконічну форму, нижня її частина сферична, а укоси нахилені під кутом 45° до горизонталі. Такий нахил необхідний, щоб магнезитовий порошок при заправленні не зсипався з укосів униз (кут укосу магнезиту до 45°). Сферична форма днища кожуха забезпечує мінімальні тепловтрати й витрати вогнетривів на кладку подини.

Питання про вибір раціональної форми стінок електропечей є дискусійним. Перевагами печей із циліндричними стінками є менші габарити, верхні, що віддає теплоту і масу печі. Перевага печей з циліндроконічними і похилими стінками у підвищенні стійкості футеровки внаслідок їхнього віддалення від високотемпературних електричних дуг. При цьому циліндроконічні стінки більш кращі, ніж похилі стінки, при яких зростає діаметр склепіння. Через це більшість електропечей, що споруджувались в останні роки мають робочий простір із циліндроконічними стінками.

Форма кожуха та вогнетривів робочого простору дугової електропечі наведена на рис. 2.3.

Футеровка дугової печі піддається впливу випромінювання електричної енергії, ударом шматків шихти при завантаженні, впливу шлаків і металу, що роз'їдає і термічних напруг, що виникають при різких коливаннях температур під час завалки. Футеровка склепіння зазнає додаткових навантажень, які викликані розпірними зусиллями аркового склепіння. Тому вогнетривкі матеріали, які використовуються повинні мати високі вогнетривкі властивості: термостійкість, міцність і шлакостійкість [1-8].

Під основної печі складається з ізоляційного і робочого шарів. Ізоляційний шар кожуха включає листовий азбест, що укладається на металеве днище, шар шамотного порошку і шар кладки із шамотної цегли для вирівнювання. Товщина ізоляційного шару складає 70-190 мм.

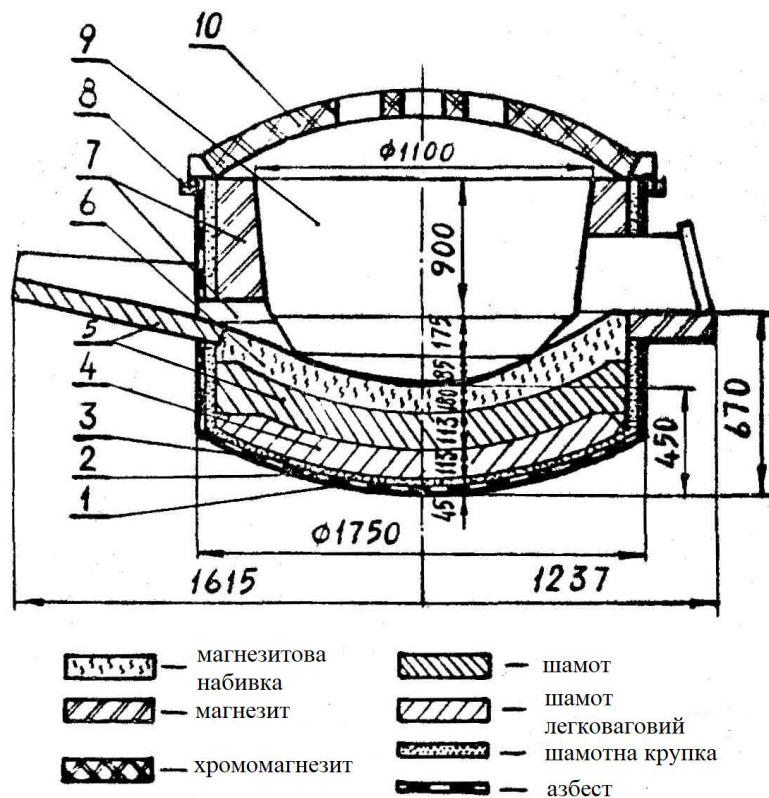


Рис. 2.3 Дугова стелеплавильна піч

1 – кожух печі; 2 – азбестова кладка; 3 – шамотна крупка; 4 – шамотна цегла легковагова (230x113x65); 5 – шамотна цегла (230x113x65); 6 – магнезитова набивка; 7 - магнезитова цегла (230x113x65); 8 – пісочний затвор; 9 – робочий простір; 10 – склепіння хромомагнезитове

Робочий шар включає кладку з декількох рядів магнезитової цегли товщиною від 230 мм для малих печей до 575 мм на більшій і верхній набивний шар з магнезитового порошку товщиною 100-190 мм, що після спікання являє собою монолітну масу.

Стійкість поду складає 2000-8000 плавів і зазвичай не обмежує роботу печі. Робочий набивний шар зношується, тому його обновляють після кожної плавки, заправляючи магнезитовим порошком.

Загальна товщина поду на печах малої і середньої ємності приблизно дорівнює глибині ванни, а на великовантажних знижується до 0,7, на печах з електромагнітним перемішуванням товщина поду не повинна перевищувати 800-900 мм.

Футеровку стін на підприємствах виконують без шару теплоізоляційної кладки тільки з основної цегли (магnezитохромітової, хромомагnezитової, магnezитової), яку укладають на футеровку укосів.

Щоб шлак не розмивав цегельні стінки, стик стінок з укосами (рівень укосів) роблять на 75-150 мм вище рівня порога робочого вікна (або дзеркала ванни). У печах із циліндроконічним кожухом кут нахилу футеровки низу стін 15-30°. Товщина стінок у нижній частини складає 300-575 мм і зростає зі збільшенням ємності печі. Стійкість футеровки стін для печей продуктивністю більше 15т. змінюється в межах 75-350 плавок.

Місця найбільшого спрацювання ремонтують шляхом торкретування, наносячи на футеровку вогнетривку масу. Ще більше збільшення стійкості стін досягнуто в результаті застосування елементів (панелей), що охолоджуються водою. Панелі, які охолоджуються водою, використовують двох типів: плоскі порожнисті і трубчасті у вигляді змійовика, їх встановлюють замість футеровки стін печі трохи вище укосів, замінюючи всю футеровку або її частину.

На поверхні панелей, звернених всередину печі є шини або ребра. Вони втримують вогнетривку масу, що наноситься на панель, а в процесі служби забезпечують утворення шару шлакового гарнісажу. Стійкість панелей складає 7000 плавок. Застосування панелей дозволяє підвищити продуктивність печі за рахунок зниження простоїв на перефутеровку стін і значно знизити витрати вогнетривів, хоча при цьому зростають тепловитрати і необхідна додаткова витрати води.

Заслінка прикриває робоче вікно для зменшення втрат теплоти і виходу газів з печі. Для запобігання від прогару заслінка виконана з зкругленою верхньою частиною, щоб не утворювались парові мішки. Відведення води здійснюється у верхній частині заслінки. Рівномірне охолодження заслінки забезпечується встановленням у середині заслінки направляючих перегородок. У нижній частині заслінки передбачений отвір, що закривається заслінкою. Че-

рез нього відбирають проби металу і шлаків, вимірюють температуру металу і виконують інші операції.

Для забезпечення щільного закриття вікна печі заслінка розміщена в направляючих, площина яких нахилена до вертикалі на 8° . При цьому заслінка під дією власної ваги притискається до направляючих рам. Заслінка підвішена на кронштейнах до двох ланцюгів механізму, що складається з електродвигуна, черв'ячного редуктора з барабаном, ланцюгів і направляючих блоків. При намотуванні ланцюгів на барабан відбувається підйом заслінки, а опускання її здійснюється під дією власної ваги. Поріг виконаний литим у вигляді плити і кріпиться до рами за допомогою клинів. У процесі плавки на плиту порога насипається з вогнетривкого порошку хибний поріг, через який скачують шлаки з печі. У середній частині порога є жолобок для сходу шлаків, тому плиту порога також роблять із западиною в середній частині [1-8].

Гребінка служить для установки поперечини при скачуванні шлаків і перемішуванні металу, вона кріпиться шарнірно до рами. Сталевипускний отвір розташований проти робочого вікна вище рівня металу і шлаків, його нижня частина перебуває на рівні порога робочого вікна. Отвір може бути круглого перетину діаметром 120-150 мм або квадратного перетину зі стороною 150-250 мм. Жолоб, що примикає до отвору, футерують шамотною цеглою.

Склепіння служить для закриття печі зверху і утворення замкнутого робочого простору. Робочий простір складається з кільця склепіння і футеровки, що викладаються за сферою. У футеровці виконанні отвори для переходу електродів. Кільце склепіння сприймає розпірне зусилля від футеровки й через нього склепіння опирається на кожух печі. Щоб кільце склепіння не коробилося від нагрівання, його виконують порожнім, усередині нього циркулює охолоджуюча вода. Склепіння і кожух печі з'єднанні між собою пісковим затвором, що служить для ущільнення печі й запобігання витоку газів між кожухом і кільцем склепіння. Футеровка склепіння викладається з фа-

сонної хромомagneзитової цегли на спеціальному шаблоні, що має форму внутрішнього контуру склепіння.

Отвори для проходу електродів розташовані по вершинах вписаного в окружність рівностороннього трикутника.

При наборі склепіння в кладці залишають три отвори для проходження електродів і отвір для відведення пічних газів. Стійкість склепіння малих печей складає 125-225 плавов, при збільшенні ємності печі стійкість склепіння знижується і становить 50-100 плавов для ємності печей в 60 – 100т. Діаметр окружності, що проходить через центр електродів, є діаметром розводу електродів. Отвори для проходу електродів більші діаметра електродів на 40-50 мм. Це робиться для запобігання поломки електродів при можливих теплових і силових деформаціях склепіння. Щоб нагріті гази не виходили з робочого простору печі в зазори між електродами і склепінням, а також для зниження нагрівання електродотримачів і розпалу футеровки навколо отворів, для зменшення температури і інтенсивності окислювання виступаючої над склепінням частини електродів на отвори склепіння встановлені ущільнювачі [1-8].

По конструктивному виконанню застосовують ущільнювачі, які розділяють на такі види: керамічні, економайзери, газодинамічні. Керамічні ущільнювачі виконанні з цирконієвих або корундових вогнетривів у вигляді накладних кілець, забитих у склепіння. Економайзери являють собою порожні водоохолоджувальні кільця, які встановлюють поверх склепіння або заглиблюють у футеровку склепіння. Для додаткового ущільнення більшість економайзерів оснащено комірами, заповненими шлаковатою. Ущільнюючі кільця і трубки, що підводять до них воду, ізолюють від каркаса склепіння й одну від іншої, щоб уникнути короткого замикання [1-8].

2.2. Процес плавлення металу в дуговій печі

Процес плавлення металу в дугових електросталеплавильних печах можна розбити на чотири етапи [1-9].

Перший етап – електрична дуга горить на поверхні шихти, яка поступово розплавляється біля кожного із трьох електродів. В цей період значна частина теплоти випромінюється на склепіння і запобігаючи його оплавлення до електродів підводиться струм помірної потужності.

Другий етап – електроди в міру розплавлення шихти автоматично опускаються і електрична дуга занурюється у шихту, при цьому потужність струму, що підводиться до електродів, збільшується.

Третій етап – електроди пропалюють у шихті колодязі і електричні дуги горять між шаром рідкого металу, що перебуває на подині печі і електродами. Кількість рідкого металу збільшується, а довжина дуги зменшується, електроди при цьому автоматично піднімаються й шихта між електродами плавиться.

Четвертий етап – майже вся шихта розплавлена і електричні дуги горять відкрито над поверхнею шлаків і рідкий метал сприймає теплоти значно менше ніж тверда шихта. Випромінювання теплоти на стінки і склепіння печі збільшується і щоб уникнути підплавлення кладки потужність струму, що підводиться до електродів, знижується.

Плавлення металу включає такі основні процеси: заправка печі, завантаження шихти, плавлення, окислювальний процес, відновлювальний процес, випуск металу.

Заправка печі виконується для відновлення футеровки плавильного простору в робочому стані. Після випуску чергової плавки на ушкоджені місця подини і укосів за допомогою заправочної машини завантажують сухий магнезитовий порошок, а у випадку великих пошкоджень порошок з добавкою смоли.

Завантаження шихти починають відразу після закінчення заправлення печі. Завантаження шихти здійснюють зверху за допомогою завантажуваль-

ної бадді. Після закінчення завалки шихти, склепіння з електродами встановлюють на піч, електроди опускають і включають струм. Під дією високої температури електричної дуги шихта плавиться під електродами, рідкий метал стікає вниз і накопичується в центральній частині подини. Поступово відбувається повне розплавлення шихти.

Окислення заліза, марганцю, кремнію протікає з виділенням значної кількості теплоти, що прискорює розплавлення залишків металевого брухту. В окислювальному періоді плавки металу зменшується вміст в металі фосфору, водню, азоту. Окислення закінчується, коли вміст вуглецю стає нижче заданої межі, вміст фосфору нижче 0,01%. Наприкінці окислювального процесу повністю видаляють із печі шлаки.

Відновлювальний процес плавлення має на меті розкислення металу, видалення сірки, доведення хімічного складу металу, регулювання температури. Після повного видалення окисних шлаків у піч присаджують шлакоутворюючі суміші разом з розкислювачами, тобто наводиться новий шлак. У якості розкислювачів використовують феромарганець, феросиліцій, алюміній. У піч присаджують також легуючі добавки. Після цього метал *випускають* з печі у встановлений під жолобом ківш, а піч нахиляють у бік випускового металевого отвору. При необхідності в ковші можна проводити додаткове розкислення і легування металу [1-9].

$$H = \sqrt[3]{V_{RM}/12,1} = \sqrt[3]{0,78/12,1} = 0,41 \text{ м}; \quad (3.2)$$

Діаметр дзеркала ванни

$$H = \sqrt[3]{V_{\text{ем}}/12,1} = \sqrt[3]{0,78/0,0968} = 2,079 \text{ м}; \quad (3.3)$$

Висота сферичної частини ванни

$$h_1 = 0,2 \cdot H = 0,2 \cdot 0,41 = 0,082 \text{ м}; \quad (3.4)$$

Висота конічної частини ванни

$$h_2 = 0,8 \cdot H = 0,8 \cdot 0,41 = 0,328 \text{ м}; \quad (3.5)$$

Відстань від порогу п'ят склепіння

$$H_1 = 0,47 \cdot D = 0,47 \cdot 2,079 = 0,97 \text{ м}; \quad (3.6)$$

Діаметр ванни на рівні укосів

$$D_{\text{нл}} = D + 0,2 = 2,079 + 0,2 = 2,279 \text{ м}; \quad (3.7)$$

Стріла опуклості склепіння

$$h_3 = (1/11) \cdot D_{\text{нл}} = (1/11) \cdot 2,279 = 0,20 \text{ м}; \quad (3.8)$$

Повна висота склепіння

$$H_2 = H_1 + h_3 = 0,94 + 0,20 = 1,14 \text{ м}; \quad (3.9)$$

Діаметр плавильного простору на рівні п'ят склепіння

$$D_1 = D + 0,2 \cdot H = 2 + 0,2 \cdot 0,94 = 2,19 \text{ м}; \quad (3.10)$$

Товщина склепіння (для $Q < 20\text{т}$) дорівнює 230 мм. Товщину поду приймемо рівною глибині ванни

$$K = H = 0,41 \text{ м}; \quad (3.11)$$

Кладку на рівні верху укосів (для $Q < 10\text{т}$) приймемо товщиною 230 мм, а ізоляційного шару товщиною 75 мм.

Внутрішній діаметр кожуха дорівнює

$$D_{\text{к.вн}} = 2,96 + 2,0(0,230 + 0,075) = 3,57 \text{ м}; \quad (3.12)$$

Зовнішній діаметр кожуха при 15 мм

$$D_{\text{к.зов.}} = 3,57 + 2 \cdot 0,015 = 3,6 \text{ м}; \quad (3.13)$$

Ширина робочого вікна

$$b = 0,3 \cdot D = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ м}; \quad (3.14)$$

Висота робочого вікна

$$h_{p.в.} = 0,8 \cdot b = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48 \text{ м}; \quad (3.15)$$

Потужність пічного трансформатора

$$P_{mp} = W_{теор} \cdot \Pi / \eta \cdot \cos \varphi = 355 \cdot 5 / 0,5 \cdot 0,8 = 4500 \text{ кВА}; \quad (3.16)$$

де $W_{теор.}$ – теоретичне значення питомої витрати енергії на розплавлення сталі (355 кВт·год/т); Π – продуктивність печі, т/год; η – ККД печі; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності печі.

Орієнтовне значення потужності трансформатора визначаємо за емпіричною формулою

$$P_{mp} = 400 \cdot D_k^2 = 400 \cdot 3,6^2 = 5200 \text{ кВА}; \quad (3.17)$$

Сила струму при вторинній напрузі 220В

$$I = 10^3 P_{mp} / \sqrt{3U} = 10^3 \cdot 4500 / \sqrt{3 \cdot 220} = 11800 \text{ А}; \quad (3.18)$$

Діаметр розпаду електродів

$$d_{p.ел.} = 0,4 \cdot D_{nl} = 0,4 \cdot 2,2 = 0,88 \text{ м}; \quad (3.19)$$

Діаметр електрода при $j=20 \text{ А/см}^2$

$$d_{ел.} = 2 \cdot \sqrt{1/\pi \cdot j} = 2 \cdot \sqrt{11800/3,14 \cdot 20} = 27 \text{ см}; \quad (3.20)$$

3.2. Розрахунок матеріального балансу

Матеріальний баланс плавлення металу в дуговій печі представляє собою: 1) виявлення відповідних вихідних матеріалів;

2) способ складання шихти;

3) складання загального матеріального балансу [1-5].

При розрахунку матеріального балансу враховуємо такі умови:

– футеровка печі - кисла;

– виплавляємий метал – сталь марки 35Л.

Шихта для плавки сталі складається із металевої і неметалевої частин.

Металева частина містить: Скрапу 92%, чавуну 8% і феросплави.

Хімічний склад шихтових матеріалів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Хімічний склад шихтових матеріалів

№ 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

Угар вуглецю під час плавлення шихти становить – 15%; залізо – 35 %, кремній, марганець – 70%.

Розрахунок матеріального балансу проводимо в такій послідовності.

Вміст вуглецю в металі після розплавлення

$$[C]_p = 0,35 + 0,15 = 0,5 \% \quad (3.21)$$

Вміст вуглецю в шихті

$$[C]_{ш} = 0,5 / 0,85 = 0,6 \% \quad (3.22)$$

Приймаємо, що відходи власного виробництва становлять 40 % шихти.

Позначаємо частку скрапу через x , а частку чавуну через y і складаємо систему рівнянь для визначення цих часток:

$$\begin{cases} x \cdot 5000 \frac{0,3}{100} + y \cdot 5000 \cdot \frac{4}{100} = 0,6 \cdot \frac{5000}{100} \\ x + y = 1 \end{cases} \quad (3.23)$$

Розв'язок системи рівнянь

$$\begin{aligned} y &= 0,08 \\ x &= 0,92 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Отже, шихта має складатись із $5000 \cdot 0,92 = 4600$ кг скрапу; $5000 \cdot 0,08 = 400$ кг чавунного лому.

Під час плавки окисляються вуглець, кремній, марганець і залізо в таких кількостях

$$\begin{aligned} G_C &= (0,3 \cdot 0,92 + 4 \cdot 0,08) \cdot 5000 \cdot 0,15/100 = 4,47 \text{ кг} \\ G_{Si} &= (0,3 \cdot 0,92 + 1,1 \cdot 0,08) \cdot 5000 \cdot 0,7/100 = 12,74 \text{ кг} \\ G_{Mn} &= (0,6 \cdot 0,92 + 0,8 \cdot 0,08) \cdot 5000 \cdot 0,7/100 = 21,56 \text{ кг} \\ G_{Fe} &= 5000 \cdot 0,25/100 = 12,50 \text{ кг} \\ \Sigma G_i & \qquad \qquad \qquad 51,27 \text{ кг} \end{aligned} \quad (3.25)$$

При цьому утворюються і переходять в шлак відповідні оксиди

$$\begin{aligned} G_{SiO_2} &= 12,74 \cdot 60/28 = 27,3 \text{ кг} \\ G_{MnO} &= 21,56 \cdot 71/55 = 27,8 \text{ кг} \\ G_{FeO} &= 12,50 \cdot 72/56 = 16,1 \text{ кг} \\ \Sigma & \qquad \qquad \qquad 71,2 \text{ кг} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Для ошлакування оксидів марганцю і заліза передбачаємо завантаження в завалку чистого кварцового піску в кількості 1:1

$$G_n = 27,8 + 16,1 = 43,9 \text{ кг} \quad (3.27)$$

З метою створення достатньої товщини шару шлаку передбачаємо введення у ванну під час плавлення оборотного шлаку у кількості 2% від маси металозавалки:

$$G_{об.шл.} = 5000 \cdot 2/100 = 100 \text{ кг} \quad (3.28)$$

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

$$G_{фут.} = 5000 \cdot 0,5/100 = 25 \text{ кг} \quad (3.29)$$

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

$$\begin{aligned} G_{O_2,C} &= 4,47 \cdot 16/12 = 5,96 \text{ кг} \\ G_{O_2,Si} &= 12,74 \cdot 32/28 = 14,56 \text{ кг} \\ G_{O_2,Mn} &= 21,56 \cdot 16/55 = 6,27 \text{ кг} \\ G_{O_2,Fe} &= 12,5 \cdot 16/56 = 3,57 \text{ кг} \\ G_{O_2,i} &= 30,36 \text{ кг} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Утворюється СО:

$$G_{CO} = 4,47 \cdot 28/12 = 10,43 \text{ кг} \quad (3.31)$$

Кількість шлаку після розплавлення

$$G_{шл} = 71,2 + 43,9 + 100 + 25,0 = 240,1 \text{ кг} \quad (3.32)$$

або $240 \cdot 100/5000 = 4,8\%$ від маси металозавалки

Кількість металу після розплавлення

$$G_{мет} = 5000 - 51,27 = 4948,8 \quad (3.33)$$

Зміною маси металу і шлаку під час доводки нехтуємо.

Розрахунок кількості феросплавів, які необхідно ввести в метал для одержання заданого вмісту в ньому відповідних домішок, проводимо за формулою

$$G_{\phi} = \frac{G_{p.m.} ([E]_c - [E]_n)}{E_{\phi} \cdot K_E}, \quad (3.34)$$

де $G_{p.m.}$ – маса рідкого металу, кг; $[E]_c, [E]_n$ – середній у сталі і початковий в металі перед розкисненням вміст елемента, 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 розкисненням можна визначити так:

$$\begin{aligned} [\text{Mn}]_n &= (0,92 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,08) \cdot 0,3 = 0,18\% \\ [\text{Si}]_n &= (0,92 \cdot 0,3 + 0,08 \cdot 1,1) \cdot 0,3 = 0,11\% \end{aligned} \quad (3.35)$$

Кількість феромарганцю

$$G_{\text{FeMn}} = \frac{4948,8(0,65 - 0,18)}{75 \cdot 0,7} = 44,3 \text{ кг} \quad (3.36)$$

Кількість феросиліцію

$$G_{\text{FeSi}} = \frac{4948,8(0,27 - 0,11)}{77 \cdot 0,7} = 14,7 \text{ кг.} \quad (3.37)$$

Результати проведених розрахунків наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Матеріальний баланс плавки сталі в кислій дуговій печі ємністю 5 т/год

№ п/п	Статті (прибутку або видат- ку)	кг	% від м/з
	Прибутки:		
1.	Скрап	4600,0	92
2.	Чавун	400	8,0
3	Оборотний шлак	100	2,0
4.	Пісок	43,9	0,9
5.	Футеровка	25	0,5
6.	Кисень атмосферний	30,4	0,6
	Σ	5199,3	104,0
	Видатки:		
1.	Метал	4948,8	99,0
2.	Шлак	240,1	4,8
3	Газ CO	10,4	0,20
	Σ	5199,3	104,0

3.3. Розрахунок теплового балансу

Тепловий баланс дугової печі це відношення теплоти між прибутком і видатком. Метою розрахунку теплового балансу дугової печі є визначення витрати електроенергії і потужності її трансформатора [1-5,7,8].

В дуговій електропечі тепла енергія отримується відповідно за рахунок трансформації електричної енергії в теплову, а також за рахунок термохімічних реакцій це окислення металу з виділенням теплоти. Так як найбільша втрата електроенергії припадає на період завалки і плавлення, тому розрахунок виконуємо з урахуванням потреб теплоти на ці процеси, які відбуваються.

Рівняння теплового балансу в даному випадку:

$$Q_{ел.ен.} + Q_{екз} = Q_m + Q_{шл} + Q_{кл} + Q_{охол} + Q_{випр} + Q_{виб} \quad (3.38)$$

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.

Всі статті теплового балансу розраховуємо у кВт. Тривалість завалки і плавки приймаємо 1,35 години.

Теплота екзотермічних реакцій: кВт

$$Q_{екз} = (11658 \cdot 4,47 + 27696 \cdot 12,74 + 6435 \cdot 21,56 + 4289 \cdot 12,5) / 1,5 \cdot 3600 = 111 \quad (3.39)$$

Теплота металу і шлаку при визначенні їх тепловмісту $t_m = 1550^\circ C$,

$$t_{шл} = 1600^\circ C$$

$$Q_m + Q_{шл} = [(0,87 \cdot 1550 + 50)4948,8 + (1,89 \cdot 1600 - 1100)240,1] / 1,5 \cdot 3600 = 1367 \quad (7.4)$$

Величину $Q_{кл}$ розраховуємо за формулою

$$Q_{кл} = \alpha(t_{кл} - t_{нов})F \quad (3.40)$$

де $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ефективний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією поверхні кладки до оточуючого піч повітря; $t_{кл} = 100^\circ C$ і $t_{нов} = 20^\circ C$ – тем-

ператури зовнішньої поверхні кладки і оточуючого повітря; F – величина зовнішньої поверхні печі.

$$F = 2\pi d^2/4 + \pi DL = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,5^2/4 + 3,14 \cdot 3,5 \cdot 2,1 = 42,31 \text{ м}^2 \quad (3.41)$$

Таким чином

$$Q_{кл} = 20(100 \cdot 20) \cdot 42,31 = 67680 \text{ Вт} = 67,68 \text{ кВт} \quad (3.42)$$

Величину $Q_{охол}$ розраховуємо, прийнявши витрату води $2 \text{ м}^3/\text{год}$,
 $t_e^{ноч} = 20^\circ \text{C}$, $t_e^{кін} = 60^\circ \text{C}$;

$$Q_{охол} = (10000/3600) \cdot 4,2(60 - 20) = 467 \text{ кВт} \quad (3.43)$$

Для останніх двох статей видаткової частини теплового балансу приймаємо співвідношення:

Знаходимо витрату електроенергії

$$Q_{ел.ен.} = 2240 \text{ кВт} \quad (3.44)$$

$$Q_{випр} + Q_{виб} = 0,2Q_{ел.ен.} = 0,2 \cdot 2240 = 449 \text{ кВт} \quad (3.45)$$

Одержаний результат близький до значень потужності трансформатора для печей ємністю 5т за літературними даними.

Дані теплового балансу наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Тепловий баланс плавки сталі в дуговій печі ємністю 5 т/год.

№ п/п	Статті прибутку	кВт	%	№п/п	Статті видатку	кВт	%
1.	$Q_{ел.ен.}$	2240	95,3	1.	$Q_m + Q_{шл}$	1367	58,1
2.	$Q_{екз}$	111	4,7	2.	$Q_{кл.}$	68	2,9
	Σ	2351	100	3.	$Q_{охол}$	467	19,9
				4.	$Q_{вип} + Q_{виб}$	449	19,1
				5.	Σ	2351	100

Висновки

В кваліфікаційній бакалаврській роботі розрахована дугова електропід з ємністю 5 т/год з кислотою футеровкою для плавки сталі. Також описані основні параметри роботи печі та визначенні основні електротехнічні характеристики дугової печі. Також розраховані матеріальний і тепловий баланси печі, основні її розміри і параметри роботи проекрованої печі.

Список використаних джерел

1. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ. 2007. 280 с.
2. 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.
3. Самойленко Н. М., Аверченко В. І., Байрачний В. Б. Системи технологій та промислова екологія. Ч. І. Металургійний та енергетичний комплекс. Навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ». Лідер. 2020. 212 с.
4. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Теплотехніка ливарного виробництва» для студентів денної та заочної форм навчання напряму «Ливарне виробництво». Укл.: Чубіна О.А., Кобзева А.І. Дніпродзержинськ. ДДТУ. 2016. 63с.
5. Афтанділянц Є.Г., Зазимко О. В., Лопатько К.Г., Поліщук А.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Конспект лекцій в 2-х книгах. Київ: НУБіП України, 2016. 125. с.
6. Павленко Т.П., Петренко О.М., Лукашова Н. П. Електротехнологічні установки. Конспект лекцій для магістрів усіх форм навчання за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 130 с.
7. Єременко А.П. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво виливків з чорних металів» частина «Виробництво виливків зі сталі» для студентів напряму «Ливарне виробництво». Дніпродзержинськ. ДДТУ, 2015. 51 с.
8. Пахаренко В.Л., Марчук М.М. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво). Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2009. 179с.
9. Люта А. В. Удосконалення систем управління приводом переміщення електродів дугових сталеплавильних печей. Монографія. Краматорськ: ДДМА, 2020. 147 с.

ДОДАТКИ