

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра «Матеріалознавства та ливарного виробництва»

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Проектування електродугової печі для
плавки сталі ємністю 12 т»**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го

курсу групи МЗ-23мб

ОПП «Прикладне матеріалознавство та
інжиніринг»

спеціальності 132 «Матеріалознавство»

_____ Юрій ВОЛОШИН

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Сергій КОНОНЧУК

Рецензент:

Кропивницький – 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Механіко-технологічний .
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва .
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) .
Галузь знань 13 Механічна інженерія .
Спеціальність 132 Матеріалознавство .
Освітньо-професійна програма «Прикладне матеріалознавство та інжиніринг».

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2026 р.

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

_____ Волошин Юрій Олександрович

1. Тема: «Проектування електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т»
2. Керівник роботи: Конончук Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент
3. Строк подання роботи до захисту: 15.06.2026 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Проектування електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т. Описати будову і принцип роботи електродугової печі. Розрахувати основні розміри плавильного агрегата а також виконати повний електротехнічний розрахунок. Спроекувати креслення загального виду електродугової печі та креслення блоку газоочистки.
5. Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид електродугової печі,
2) Блок газоочистки

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Оглядовий	Конончук С.В.		
Конструкторський	Конончук С.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури по темі роботи	10.04.2026	
2	Розрахунки по конструкторській частині	30.04.2026	
3	Креслення по конструкторській частині	20.05.2026	
4	Оформлення пояснювальної записки	10.06.2026	
5	Оформлення презентації роботи	15.06.2026	
6	Здача роботи на кафедрі та перевірка на наявність запозичень	15.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2026	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ Конончук С.В.

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис здобувача

_____ Волошин Ю.О.

Анотація

ВОЛОШИН Юрій Олександрович. Проектування електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2026. 33 с.

Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид електродугової печі, 2) Блок газоочистки.

В першому розділі описано печі для плавки сталі, будову і принцип роботи електродугової печі.

В другому розділі розраховано основні розміри електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т. Виконано повний електротехнічний розрахунок плавильного агрегату.

Розроблені креслення загального виду печі та блоку газоочистки.

Ключові слова: електрод, склепіння, сталь, перегрів, економайзер, потужність, футеровка, газоочистка.

Abstract

VOLOSHYN Yurii. Design of an electric arc furnace for melting steel with a capacity of 12 t. Qualification work for the first (bachelor's) level of higher education: CUNTU, 2026. 33 p.

List of graphic material: 1) General view of an electric arc furnace, 2) Gas purification unit.

The first section describes the furnace for steel melting, the structure and principle of operation of the electric arc furnace.

The second section calculates the main dimensions of an electric arc furnace for steel melting with a capacity of 12 tons. A full electrical calculation of the melting unit is performed.

Drawings of the general view of the furnace and the gas purification unit are developed.

Keywords: electrode, arch, steel, overheating, economizer, power, lining, gas purification.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1. КОНСТРУКЦІЯ І ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ	9
1.1. Печі ливарного виробництва для плавки сталі	9
1.2. Устрій і принцип роботи електродугової печі	12
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ	22
2.1. Вихідні дані для розрахунку	22
2.2. Розрахунок основних розмірів	23
2.3. Електротехнічний розрахунок	26
3. ПЛАВКА СТАЛІ В ДУГОВІЙ ПЕЧІ З ОСНОВНОЮ ФУТЕРОВКОЮ	27
ВИСНОВКИ	30
ЛІТЕРАТУРА	31
ДОДАТКИ	33

ВСТУП

Актуальність роботи. Електродугові печі є найперспективнішими агрегатами сучасного ливарного виробництва, оскільки вони поєднують високу екологічність із можливістю переробки будь-якого брухту. Потужна електрична дуга створює температуру понад 3000°C, що дозволяє ефективно плавити тугоплавкі, високолеговані та спеціальні сталі. На відміну від індукційних печей, цей агрегат має відмінну рафінуючу здатність, успішно очищуючи метал від шкідливих домішок сірки та фосфору за допомогою активних шлаків. Завдяки гнучкості керування металурги можуть точно контролювати хімічний склад розплаву та швидко змінювати марочний асортимент продукції. Майбутнє цієї технології тісно пов'язане із глобальним трендом "зеленої металургії" та зниженням вуглецевого сліду. Сучасне ливарне виробництво орієнтується на використання відновлюваної електроенергії та інтеграцію печей із процесами прямого відновлення заліза воднем. Енергоефективність агрегатів постійно зростає завдяки автоматизації з елементами штучного інтелекту, впровадженню цифрових двійників для контролю футеровки та використанню газокисневих пальників. Хоча робота печей залежить від вартості електрики, створює коливання напруги в мережі та потребує значних інвестицій у потужні системи газоочищення, економічні та технологічні переваги роблять електродугові печі безальтернативним лідером модернізації ливарних цехів. Тому задачі розрахунку та проектування електродугових печей для плавки сталі є актуальними.

Мета і задачі дослідження. Проектування електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- Огляд печей для плавки сталі;
- Опис будови і принципу роботи електродугової печі;
- розрахунок основних розмірів плавильного агрегату;
- електротехнічний розрахунок печі;

– розробка конструкції та креслення загального виду електродугової печі.

Об'єкт дослідження – електродугова піч.

Предмет дослідження – електротехнічний розрахунок електродугової печі.

Практичне значення – розроблено конструкцію електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т.

Особистий внесок – виконано розрахунок основних розмірів плавильної печі та описано технологію плавки сталі.

1. КОНСТРУКЦІЯ І ПРИНЦИП РОБОТИ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ

1.1. Печі ливарного виробництва для плавки сталі

Сучасне ливарне виробництво сталі базується на жорстких критеріях економічної ефективності, гнучкості технологічного процесу, високої якості готового литва та відповідності суворим міжнародним стандартам екологічної безпеки. Історично промисловість використовувала найрізноманітніші плавильні агрегати, проте сьогодні класичні великотоннажні споруди, такі як **мартенівські печі** та **конвертери**, майже повністю зникли зі структури сучасних ливарних цехів. Мартенівські агрегати є морально та технологічно застарілими, занадто громіздкими, капіталомісткими та енергоємними. Процес плавки в них триває багато годин, що унеможливорює оперативне керування виробництвом, а величезні об'єми спалюваного палива призводять до колосальних викидів парникових газів. Конвертери, у свою чергу, хоч і мають високу швидкість обробки металу, критично залежать від безперервного постачання рідкого чавуну безпосередньо з доменних печей. Це робить їх абсолютно нерентабельними для умов дискретного, порційного фасонного литва в умовах машинобудівних заводів. Через ці критичні обмеження обидва типи агрегатів повністю поступилися місцем електричним плавильним комплексам, які пропонують значно вищий рівень контролю та економічності.

Індукційні тигельні печі є дуже популярним і виправданим вибором для малих, середніх та експериментальних ливарних підприємств. Нагрів металу в цих агрегатах здійснюється безконтактно за рахунок вихрових струмів Фуко, які наводять навколо вогнетривкого тигля потужний мідний індуктор, підключений до джерела високочастотного або середньочастотного струму. Виникаючі при цьому потужні електромагнітні сили забезпечують інтенсивне автоматичне

перемішування рідкого розплаву по всьому об'єму тигля. Це гарантує ідеальну однорідність хімічного складу і температури сталі перед заливкою у форми. Головною технологічною перевагою індукційного процесу є мінімальний чад і вигорання коштовних легуючих елементів, таких як хром, нікель, молібден чи титан. Оскільки в індукційній печі відсутні графітові електроди, повністю виключається ризик небажаного науглецювання сплаву, що критично важливо під час виробництва низьковуглецевих і нержавіючих марок сталі. Такі печі мають дуже низькі пилогазові викиди, не потребують громіздких очисних споруд і легко запускаються з холодного стану після повного спорожнення. Проте вони мають суттєві обмеження: індукційні агрегати вимагають використання лише чистого, сухого, дрібногабаритного та дорогого брухту, а їхня рафінуюча здатність є вкрай слабкою. Холодний шлак в індукційній печі не дозволяє ефективно зв'язувати та видаляти з металу шкідливі домішки сірки та фосфору, що змушує ливарників купувати дорожчу первинну сировину [1].

Електродугові печі є найбільш перспективними, потужними, універсальними та технологічно гнучкими агрегатами для промислової виплавки сталі будь-якого марочного сортаменту. Метал у цих печах плавиться за рахунок тепла електричної дуги, яка горить між кінцями потужних графітованих електродів та металевою шихтою. Температура в зоні горіння дуги легко перевищує три тисячі градусів Цельсія, завдяки чому агрегат здатний швидко розплавляти тугоплавкі матеріали та великі шматки металобрухту.

Найголовніша перевага електродугового процесу — це його унікальна рафінуюча здатність [1, 11, 14]. Завдяки наведенню активних основних шлаків із високим вмістом вапна, в електродугових печах успішно проходять процеси глибокої дефосфорації та десульфурзації. Це дозволяє підприємству використовувати стовідсоткову завалку з найдешевшого, низькоякісного, габаритного брухту і власних важких

відходів цеху, отримуючи при цьому сталь найвищої якості.

Для сучасного середнього ливарного виробництва оптимальним вибором є печі ємністю 10–15 т, які комплектуються пічними трансформаторами потужністю від 8 до 12 мегавольт-ампер. Питома витрата електроенергії в таких сучасних комплексах утримується в межах 400–500 кіловат-годин на тону рідкої сталі.

Щоб максимально знизити собівартість продукції, печі додатково обладнують газокисневими пальниками для підігріву шихти в «мертвих зонах», а також інтегрують у лінію з установками позапічної обробки типу піч-ковш. Це дозволяє перенести етапи остаточного легування і доведення сталі з печі в ківш, скорочуючи загальний цикл роботи ДСП до 50–80 хвилин і підвищуючи продуктивність усього цеху на 20–30%.

Водночас екологічний та інфраструктурний аспекти експлуатації потужних дугових печей вимагають значних капітальних інвестицій на етапі будівництва. Процес горіння дуги та плавлення брухту супроводжується інтенсивним виділенням дрібнодисперсного оксидного пилу та шкідливих газів, через що цех обов'язково оснащують потужними вентиляторами та системами сухих рукавних фільтрів, які очищують повітря до жорстких нормативних показників нижче 10 міліграм на метр кубічний. Екстремальний рівень шуму, що сягає 110–120 децибел під час початкового розплавлення брухту, змушує монтувати навколо печі спеціальні звукоізоляційні захисні кожухи.

Крім того, різкозмінний характер споживання струму дугою створює серйозні проблеми для загальної електричної мережі, викликаючи флікер-ефект та викривлення синусоїди напруги. Для компенсації цих негативних факторів та захисту обладнання сусідніх споживачів підприємство змушене встановлювати дорогі промислові фільтрокомпенсуючі пристрої або сучасні високодинамічні системи компенсації реактивної потужності.

Отриманий у процесі роботи шлак також піддається переробці: його пропускають через магнітні сепаратори для повернення залишків заліза у

виробництво, а чистий мінеральний залишок подрібнюють і продають як безпечний будівельний щебінь, закриваючи цикл безвідходного виробництва.

1.2. Устрій і принцип роботи електродугової печі

Дугова піч – це електрична піч, в якій використовується тепловий ефект електричної дуги для плавки металів та інших матеріалів. Перші промислові дугові печі побудовані в 1898 – 1901 р.р. П.Еру у Франції і Е.Стассано в Італії. В Росії перша дугова піч установлена у 1910р. на Обухівському заводі в Петербурзі.

Промислові дугові печі мають ємність від 0,5 до 200 і більше тон. В ливарному виробництві здебільшого використовуються печі з номінальною ємністю від 3 до 25 т. В чорній металургії ємність діючих дугових печей становить до 350 т і більше.

Конструкція **фундаменту** (рис.1.1) промислової печі виконується із міцного залізобетону, який жорстко зв'язується з монолітною кладкою прямокутника. Габарити підпечного прямокутника з боку випускного жолоба розраховуються таким чином, щоб усередині простору вільно вміщувався ливарний ківш під час повного нахилу агрегату. З протилежного боку, безпосередньо під робочим вікном печі, облаштовується окрема технологічна зона для встановлення шлаковні. За умов високого рівня залягання ґрунтових вод конструкція прямокутника потребує улаштування надійної гідроізоляції для повного захисту від проникнення вологи всередину споруди. Для захисту від механічних пошкоджень усі кути прямокутника додатково зміцнюються міцним металевим обрамленням. Безпека персоналу забезпечується встановленням металевих поруччя по всьому периметру робочої зони. Самі прямокутники надійно перекриваються знімними щитами або металевими кришками, які зручно відсуваються вбік по спеціальних напрямних рейках [1].

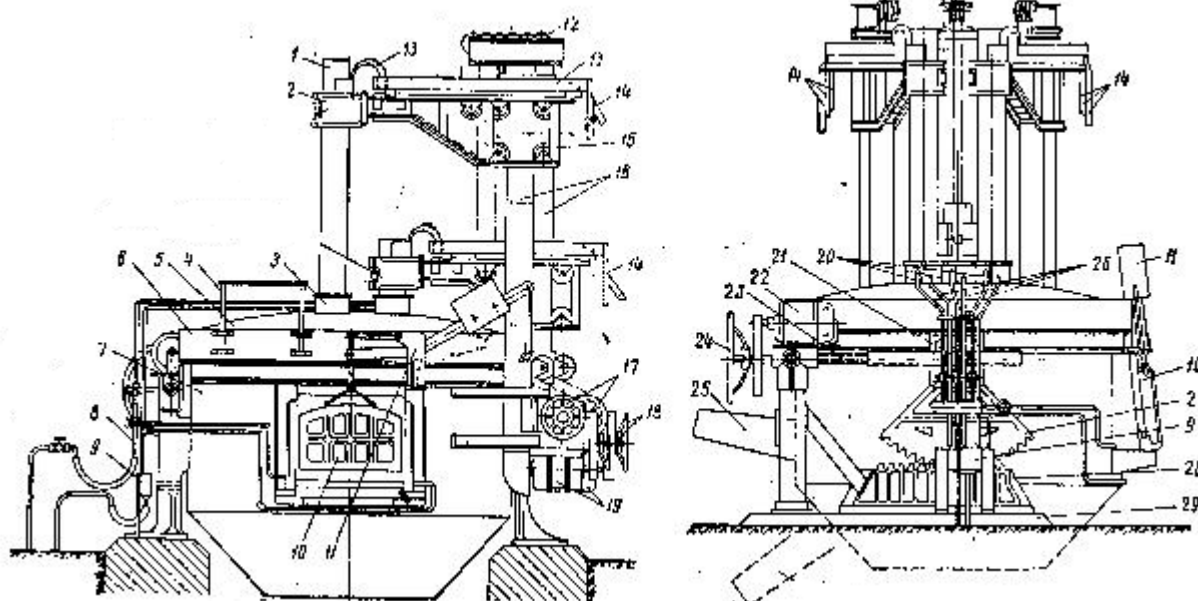


Рис. 1.1. Дугова електросталеплавильна піч з номінальною ємністю 3т:

1 – електрод; 2 – електродотримач; 3 – охолоджувач електрода (економізатор); 4 – місток для обслуговування електродів зводу; 5 – звід печі; 6 – зводове кільце; 7 – корпус печі; 8 – трубопровід подачі холодної води; 9 – зливальний бак для води, що іде з охолоджуваних пристроїв; 10 – завантажувальне вікно; 11 – пристрій підйому завантажувальних дверей; 12 – блоки підвіски електродотримачів; 13 – струмопідвідні шини до електродотримачів; 14 – кабелі електричного струму; 15 – каретка електродотримача; 16 – стійки кареток електродотримачів; 17 – механізм підйому кареток електродів; 18 – штурвали ручного підйому електродів; 19 – електродвигуни підйому електродів; 20 – трубки подачі холодної води економізаторів; 21 – гайка механізму нахилу печі; 22 – електродвигун нахилу печі; 23 – гвинт механізму нахилу печі; 24 – штурвал ручного нахилу печі; 25 – жолоб випускного отвору; 26 – зливальні трубки холодної води економізаторів; 27 – зубчастий сегмент; 28 – опора з зубчастою рейкою; 29 – фундамент

Корпус печі являє собою зварний або клепакий кожух, виготовлений зі сталевих листів товщиною 12–30 мм, який має внутрішню вогнетривку футеровку. Раніше середню частину корпусу переважно виконували циліндричної форми, однак сучасні конструкції передбачають використання конічного корпусу, що дозволяє збільшити місткість печі та підвищити тривалість її експлуатації. Зокрема, застосування корпусу з нахилом стінок 6° від вертикалі та днищем у вигляді зрізаного конуса забезпечило збільшення верхнього діаметра робочого простору на 310 мм, а корисного об'єму — на $0,93 \text{ м}^3$.

У верхній частині корпус підсилюється кільцем жорсткості, яке зазвичай виготовляється зі швелера, привареного до кожуха суцільним швом. Утворена кільцева порожнина використовується для організації водяного охолодження верхньої частини печі. Робоче вікно обладнується сталевією рамою з водяним охолодженням. Рама робочого вікна та зливний

жолоб, який може бути зварним або литим, кріпляться до кожуха болтовими з'єднаннями. У футеровці робочого простору та в корпусі навпроти робочого вікна передбачений випускний отвір, який у печах великої місткості додатково обладнується водоохолоджуваною рамою.

Вогнетривка кладка основної печі виконується у декілька етапів. Після видалення залишків попередньої футеровки на дно кожуха насипається шар дрібного шамотного порошку товщиною 5–6 мм. Далі укладаються два ряди шамотної цегли насухо із заповненням швів шамотним порошком. Поверх цього шару монтується магнезитова цегла на ребро із засипанням швів магнезитовим порошком. Потім викладаються східчасті укуси товщиною в півтори цеглини з аналогічним заповненням швів.

Бічні поверхні кожуха ізолюються листовим азбестом товщиною 20 мм. Стіни печі викладаються у півтори цеглини з перев'язкою швів, при цьому кладка формується уступами відповідно до конусності корпусу. Магнезитова кладка завершується за шість рядів до верхньої частини печі, після чого укладаються два ряди хромомагнезитової та чотири ряди динасової цегли. На шар динасу наноситься конічна подушка з кварцового піску. Робоче та випускне вікна викладаються магнезитовою цеглою з арковим перекриттям. Подина печі набивається магнезитовим порошком із рідким склом у 3–4 шари з ретельним ущільненням кожного шару пневматичними трамбовками.

У кислих печах кладка поду та стін виконується з динасової цегли за аналогічною технологією. Для набивання поду використовують просіяний кварцовий порошок або кварцовий пісок із додаванням рідкого скла. На верхній торець стіни, що контактує зі склепінням, наносять шар хромістої руди з домішкою вогнетривкої глини, що запобігає приварюванню склепіння до стін.

На багатьох металургійних підприємствах застосовується набивна футеровка стін із механізованим завантаженням. У цьому випадку

внутрішню поверхню кожуха покривають листовим азбестом товщиною 20 мм, після чого укладають шамотну цеглу на плашку в півцеглини. Далі пошарово, товщиною 150–200 мм, ущільнюють набивну масу. Для кислих печей використовують суміш кварцового піску (92 %) і водного розчину рідкого скла густиною 1,3 (8 %). Для основних печей застосовують магнезитовий порошок або подрібнені відходи магнезитової чи хромомагнезитової цегли фракцією 5–6 мм у кількості 92–94 %, а також 6–8 % вогнетривкої глини.

Після кожного випуску металу проводять заправку стін аналогічною масою через верхню частину печі при демонтованому склепінні. Використання набивної футеровки дозволяє підвищити стійкість стін до 8000–10000 плавов, тоді як традиційна футеровка потребує ремонту вже після приблизно 50 плавов. Заслінка робочого вікна в усіх випадках футерується шамотною цеглою.

Склепіння печі (рис.1.2) викладається у спеціальному склепінному кільці коритного або двотаврового профілю, що забезпечує можливість його швидкої заміни. Для кладки або набирання склепіння застосовують динасову, а в основних печах — також термостійку хромомагнезитову цеглу. Використовують як фасонну склепінну цеглу, так і стандартну. Складання склепіння здійснюється на дерев'яному або чавунному шаблоні, форма якого відповідає контуру внутрішньої поверхні склепіння. На шаблоні встановлюються елементи для формування отворів під електроди, а для опорного кільця передбачена плоска опорна частина. Найбільш навантаженими та вразливими зонами склепіння є отвори для електродів і ділянки між ними, тому під час їх виготовлення необхідно забезпечувати особливо високу якість виконання кладки.

Механізм нахилу печі призначений для забезпечення плавного повороту агрегату в бік зливного жолоба до 45° та в напрямку робочого вікна до 15° . У печах невеликої місткості (до 5 т) механізм нахилу розташовується збоку корпусу. Його конструкція включає стійку,

закріплену на фундаменті, у верхній частині якої в підшипнику шарнірно встановлений гвинт нахилу. Гвинт проходить через гайку, закріплену на корпусі печі, і при обертанні забезпечує її переміщення вздовж осі гвинта, що викликає нахил печі. Привід механізму може бути ручним або електромеханічним із використанням редуктора.

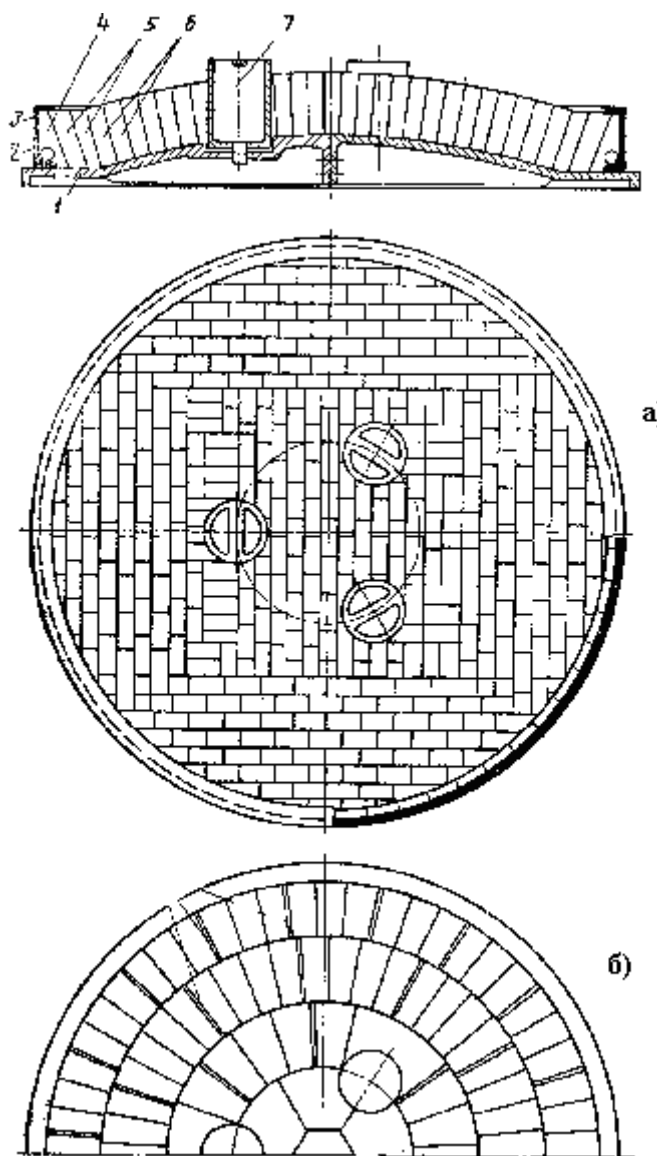


Рис. 1.2. Склепіння електropечі:

- a* – звід, набраний нормальною цеглою; *б* – звід, набраний спеціальною цеглою;
 1 – литий шаблон для наборки зводу; 2 – трубка водяного охолодження зводового кільця;
 3 – зводове кільце; 4 – п'ятова цегла; 5,6 – цегла нормальна і клин-торець;
 7 – шаблон отвору для електродів

Такий тип механізму характеризується компактністю та самогальмуванням, однак його одностороннє розташування створює додаткові механічні напруження в корпусі печі. У зв'язку з цим у печах великої місткості механізми нахилу розміщують у приямку під піччю. Подібні системи, як правило, оснащуються електроприводом або гідравлічним приводом. Недоліком нижнього розташування механізму є ризик його пошкодження у випадку аварійного прориву металу в приямок.

Механізм переміщення електродів призначений для утримання електродів у необхідному положенні у сводових отворах, а також для їх піднімання та опускання. Система повинна забезпечувати як швидке переміщення електродів, наприклад, при короткому замиканні внаслідок обвалення шихти, так і плавне регулювання в процесі плавлення, коли рівень металу у ванні поступово підвищується. Відстань між кінцем електрода та поверхнею металу визначає довжину електричної дуги, а отже — і електричну потужність печі, оскільки зі збільшенням довжини дуги зростає її електричний опір.

Сучасні електропечі оснащуються автоматичними системами регулювання, які підтримують задану силу струму шляхом зміни положення електродів по висоті. При автоматичному режимі швидкість переміщення електродів зазвичай становить 0,4–1,2 м/хв. У деяких конструкціях переміщення може здійснюватися вручну за допомогою окремих електродвигунів. Для кожного електрода передбачений індивідуальний механізм підйому.

Основним елементом механізму переміщення електродів є стійки, виконані у вигляді колон круглого або прямокутного перерізу. Вони закріплюються до корпусу печі та нахиляються разом із нею. У верхній частині стійки з'єднуються між собою для підвищення жорсткості конструкції. Уздовж стійок переміщуються каретки з електродотримачами, хід яких становить приблизно 1–2 м. Переміщення кареток здійснюється лебідками за допомогою тросової системи, а маса каретки з

електродотримачем урівноважується противагою, розташованою всередині стійки.

Електродотримачі (рис. 1.3) забезпечують надійне закріплення електродів та можливість швидкого послаблення затиску для їх переміщення. Оскільки через електродотримач подається електричний струм, конструкція повинна забезпечувати мінімальний електричний опір у зоні контакту з електродом. Для цього необхідно досягти щільного прилягання електродотримача до поверхні електрода по всій висоті контакту та застосовувати матеріали з високою електропровідністю і достатньою термостійкістю.

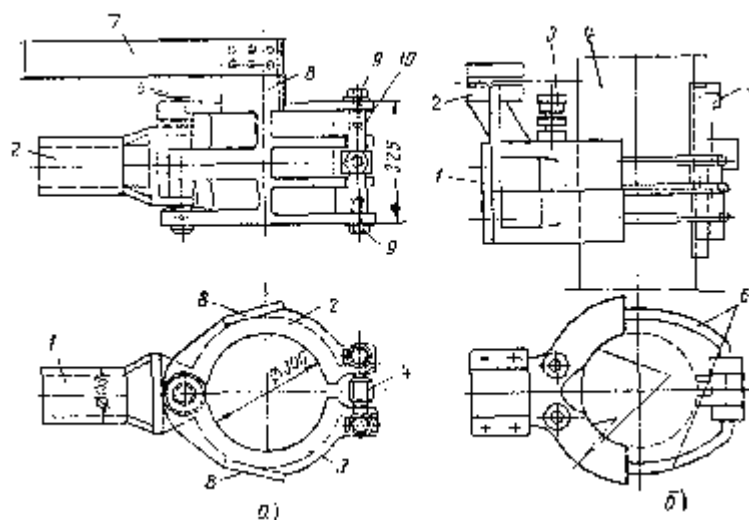


Рис. 1.3. Електродотримачі:

a – клинний: 1 – трубчаста частина кріплення до каретки; 2 – рухома щока; 3 – нерухома щока; 4 – гвинт стяжки щік; 5 – гайка шарніра; 6 – вісь шарніра; 7 – гнучкий наконечник струмопідвідної шини; 8 – щока кріплення струмопідвідної шини; 9 – стопорний болт; 10 – упор натяжний; *b* – клиновий: 1 – фланець кріплення до каретки; 2 – затиск струмопідвідного кабелю; 3 – затисний контакт струмопідвідного кабелю; 4 – електрод; 5 – клин; 6 – водоохолоджувані труби

У сучасних електродугових печах найбільшого поширення набули клинний та клиновий електродотримачі. Основним матеріалом для їх виготовлення є лита сталь, яка може працювати разом із графітовими електродами без застосування водяного охолодження. Бронзові електродотримачі, навпаки, потребують обов'язкового охолодження водою, оскільки при нагріванні їх поверхня легко оплавляється та

окиснюється. Це призводить до збільшення контактного електричного опору, посиленого нагрівання і швидкого виходу електродотримача з експлуатації.

Для забезпечення електричної ізоляції електродотримачі кріпляться до несучих конструкцій через міканітові прокладки. Підведення електричного струму здійснюється за допомогою мідних шин, закріплених уздовж каретки на ізоляторах. Один кінець шин приєднується до силових кабелів, а інший — до гнучкого пакета мідних стрічок, з'єднаного безпосередньо з електродотримачем.

Передача електроенергії від трансформаторного приміщення до печі виконується гнучкими кабелями, що утворюють петлі для забезпечення можливості переміщення кареток електродотримачів та нахилу печі. Зазвичай використовують пустотілі кабелі з азбестовою ізоляцією перерізом до 500 мм². У потужних печах на кожну фазу може припадати до двадцяти кабелів. Для запобігання їх взаємному контакту кабелі окремих фаз закріплюють дерев'яними прокладками або колодками.

Система електропроводки електропечі містить значну кількість контактних з'єднань, які потребують регулярного технічного обслуговування, зокрема очищення від оксидів та періодичної підтяжки. Особливу увагу приділяють пакету мідних стрічок, приєднаних до електродотримача, оскільки вони зазнають інтенсивного впливу гарячих газів, що виходять із печі.

Охолоджувачі електродів, або економайзери (рис.1.4), призначені для ущільнення кільцевого зазору між електродом і склепінням печі. Вони можуть бути литими або зварними та оснащуються системою водяного охолодження. Для запобігання виникненню індукованих струмів кільця охолоджувачів виконуються розрізними. Охолоджувачі можуть встановлюватися як на поверхні склепіння, так і безпосередньо в його кладці.

У сучасних конструкціях для покращення герметизації застосовується ущільнювальна набивка зі зволоженої шлакової вати з додаванням невеликої кількості вогнетривкої глини. Для обслуговування електродів та електродотримачів над склепінням монтується зварний обслуговувальний майданчик із поручнями, який спирається на склепінне кільце або верхню частину корпусу печі.

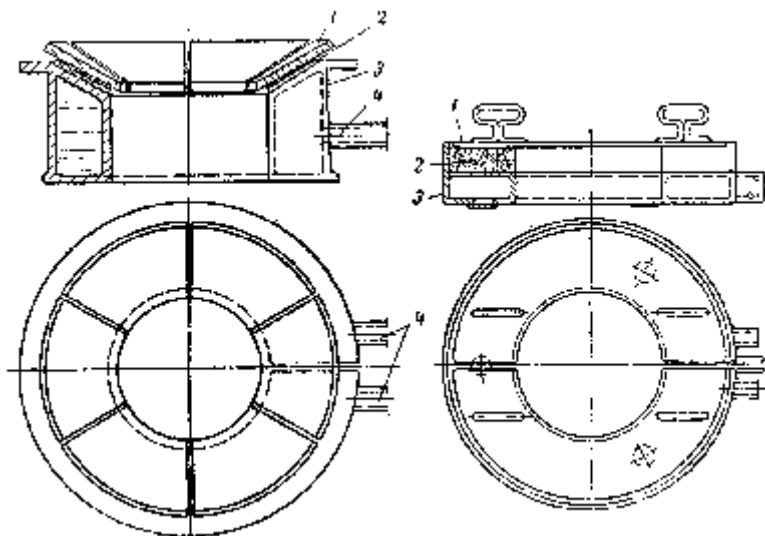


Рис. 1.4. Охолоджувачі електродів:

а – з ущільнювачими секторами: 1 – сектори, що ущільнюють; 2 – мідна прокладка; 3 – корпус; 4 – патрубкі водяного охолодження;
б – з ущільненням шлаковою ватою: 1 – кришка; 2 – шлакова вата з глиною; 3 – корпус

Електричне устаткування дугових печей характеризується роботою при значних споживаних потужностях і відносно низькій напрузі, яка зазвичай не перевищує 300 В. У зв'язку з цим безпосередньо біля печі встановлюється понижувальний трансформатор, призначений для перетворення напруги мережі до необхідних робочих параметрів.

Оскільки в процесі плавки виникає потреба у зміні електричного режиму, трансформатор оснащується декількома ступенями регулювання напруги. До кожного електрода підводиться окрема фаза трифазного струму. Залежно від схеми підключення — «трикутник» або «зірка» — забезпечується зміна величини напруги на електродах.

Характерною особливістю роботи дугових електропечей є нерівномірність електричного навантаження протягом плавки, а також часте виникнення коротких замикань у період розплавлення твердої шихти. Для зменшення струмових поштовхів під час коротких замикань у електричне коло вмикається дросель, а сама установка обладнується системою електричного захисту. Пічні трансформатори проєктуються з урахуванням можливості витримування значних короткочасних перевантажень без пошкодження обладнання.

Кожна електропічна установка оснащується комплексом контрольно-вимірювальних приладів і автоматизованих систем керування, які забезпечують контроль та регулювання теплового режиму роботи печі.

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЕЧІ

2.1. Вихідні дані для розрахунку

Продуктивність печі $P = 10$ т/год; тривалість окремих періодів плавки: заправка 0,1 год, завалка 0,1 год, плавлення і доводка 1,0 год, випуск металу і шлаку 0,05 год; первинна напруга струму 6000 В; частота 50 Гц.

При розрахунку електричних дугових сталеплавильних печей розв'язується задача знаходження оптимальних співвідношень між розмірами печі, її продуктивністю і потужністю трансформатора, що подає електроенергію до печі [1]. При заданій номінальній ємності печі в тонах спочатку визначаються геометричні розміри робочого простору, після чого виконується тепловий розрахунок футеровки. Далі знаходять потужність трансформатора і продуктивність печі.

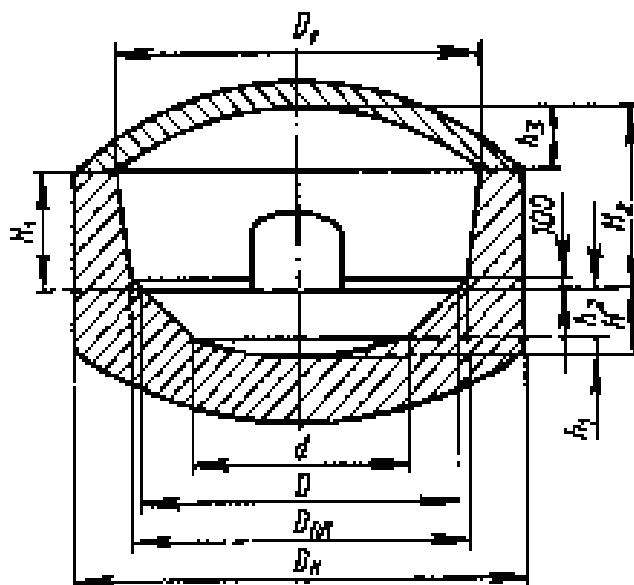


Рис. 2.1 – Робочий простір печі

Визначення геометричних розмірів робочого простору починається з вибору форми ванни печі. В даний час застосовуються дві форми ванни: сферична і сфероконічна (рис. 2.1). Остання форма більш зручна [1, 15].

Форма ванни повинна забезпечувати:

- 1) відносно невеликий тепловий опір у вертикальному напрямку;
- 2) можливо швидке розплавлення шихти;
- 3) можливо швидке протікання реакцій між металом і шлаком, видалення з металу газів і неметалевих включень;
- 4) досить глибокий шар рідкого металу на поду до закінчення проплавлення колодязів, щоб уникнути руйнування поду під дією близько розташованих електричних дуг.

Оптимальною формою ванни є зрізаний конус, повернений вниз своєю меншою основою, до якої додається кульовий сегмент, з ухилом конічної частини до горизонталі 45° (див. рис. 2.1). Така форма забезпечує прискорення розплавлення, тому що рідкий метал накопичується в кульовій частині ванни. Кут 45° забезпечує нормальні умови для заправки і збереження форми ванни в процесі роботи.

2.2. Розрахунок основних розмірів

Ємність печі

$$Q = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \cdot P = (0,1 + 0,10 + 1,00 + 0,05) \cdot 10 = 12 \text{ т.}$$

Об'єм ванни

$$V_{\text{в}} = 0,17Q = 0,17 \cdot 12 = 2,04, \text{ м}^3.$$

Глибина ванни

$$H = \sqrt[3]{V_{\text{в}}/12,1} = \sqrt[3]{2,04/12,1} = 0,55 \text{ м.}$$

Діаметр дзеркала ванни

$$D = \sqrt[3]{V_{\text{в}}/0,0968} = \sqrt[3]{2,04/0,0968} = 2,76 \text{ м.}$$

Висота сферичної частини ванни

$$h_1 = 0,2H = 0,2 \cdot 0,55 = 0,11 \text{ м.}$$

Висота конічної частини ванни

$$h_2 = 0,8H = 0,8 \cdot 0,55 = 0,44 \text{ м.}$$

Відстань від порогу до п'ят склепіння

$$H_1 = 0,47D = 0,47 \cdot 2,76 = 1,30 \text{ м.}$$

Діаметр ванни на рівні укосів

$$D_{\text{шт}} = D + 0,2 = 2,76 + 0,2 = 2,96 \text{ м.}$$

Стріла опуклості склепіння

$$h_3 = (1/11)D_{\text{шт}} = (1/11) \cdot 2,96 = 0,27 \text{ м.}$$

Повна висота склепіння

$$H_2 = H_1 + h_3 = 1,30 + 0,27 = 1,57 \text{ м.}$$

Діаметр плавильного простору на рівні п'ят склепіння

$$D_1 = D + 0,2H_1 = 2,76 + 0,2 \cdot 1,3 = 3,02 \text{ м.}$$

Товщину склепіння приймаємо 230 мм.

Товщину поду приймаємо рівною глибині ванни:

$$h_{\text{п}} = H = 0,55 \text{ м.}$$

Товщину кладки на рівні верху укосів приймаємо 345 мм, а товщину теплоізоляційного шару – 75 мм. Тоді внутрішній діаметр кожуха дорівнюватиме:

$$D_{\text{к.вн}} = 2,96 + 2(0,345 + 0,075) = 3,8 \text{ м.}$$

Зовнішній діаметр кожуха при його товщині 15 мм:

$$D_{\text{к.зов}} = 3,8 + 2 \cdot 0,015 = 3,83 \text{ м.}$$

Ширина робочого вікна

$$b = 0,3D = 0,3 \cdot 2,76 = 0,83 \text{ м.}$$

Висота робочого вікна

$$h_{\text{п.в}} = 0,8b = 0,8 \cdot 0,83 = 0,66 \text{ м.}$$

2.3. Електротехнічний розрахунок

Потужність пічного трансформатора

$$\text{а) } P_{\text{тр}} = W_{\text{теор}} \Pi / \eta \cdot \cos \varphi = 355 \cdot 10 / 0,6 \cdot 0,9 = 6600 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$\text{б) } P_{\text{тр}} \approx 400 \cdot 3,83^2 = 5900 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Сила струму при вторинній напрузі 250 В

$$I = 10^3 P_{\text{тр}} / \sqrt{3} U = 10^3 \cdot 6600 / \sqrt{3} \cdot 250 = 15200 \text{ А}.$$

Діаметр розпаду електродів

$$d_{\text{р.ел}} = 0,4 D_{\text{шт}} = 0,4 \cdot 2,96 = 1,18 \text{ м}.$$

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

$$d_{\text{ел}} = 2 \sqrt{I / \pi j} = 2 \sqrt{15200 / \pi \cdot 20} = 31 \text{ см}.$$

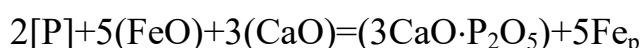
3. ПЛАВКА СТАЛІ В ДУГОВІЙ ПЕЧІ З ОСНОВНОЮ ФУТЕРОВКОЮ

Електродугові печі з основною футеровкою забезпечують можливість видалення зі сталі шкідливих домішок, насамперед сірки та фосфору. Основною метою плавки є одержання рідкого металу із заданим хімічним складом і необхідною температурою. Залежно від якості шихтових матеріалів та марки сталі, що виплавляється, у печах з основною футеровкою застосовують три основні способи ведення плавки: переплав, плавку з окисненням та плавку з окисненням і відновленням.

Плавка методом переплаву використовується у випадках, коли шихта містить незначну кількість сірки та фосфору, а також при виплавленні звичайних або якісних вуглецевих сталей, наприклад марок 25Л, 35Л, 45Л. Технологічний процес у цьому випадку включає заправку печі, завалку шихти, плавлення, розкиснення металу та випуск готової сталі [1].

Найбільш поширеним способом є плавка з окисненням [1, 12]. На відміну від переплаву, вона містить додатковий етап — доводку металу. Загальна послідовність процесу включає заправку, завалку, плавлення, доводку, розкиснення та випуск металу. Під час доводки здійснюється дефосфорація, десульфурація, зневуглецювання та нагрівання металу до температури, необхідної для завершення плавки.

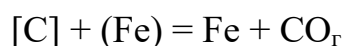
Доводка складається з двох етапів: рудного та чистого кипіння. У період рудного кипіння відбувається окиснення фосфору та його перехід у шлак. Процес описується реакцією [16]:



Оскільки реакція є екзотермічною, вона найбільш ефективно проходить одразу після розплавлення шихти, коли температура ванни ще відносно невисока. Для успішного видалення фосфору необхідний високоосновний,

залізистий і достатньо рідкоплинний шлак. З цією метою у ванну вводять залізну руду або окалину, а також вапно чи вапняк. При високому вмісті фосфору частину шлаку видаляють і формують новий шлак шляхом введення шлакоутворювальних добавок.

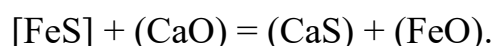
Одночасно з дефосфорацією відбувається окиснення вуглецю за реакцією:



Утворення оксиду вуглецю спричиняє характерне «кипіння» ванни. Пухирці газу, проходячи крізь метал і шлак, забезпечують інтенсивне перемішування, що сприяє очищенню металу від неметалевих включень і газів. Заключний етап доводки, який називають чистим кипінням, проходить без введення нових матеріалів, за винятком плавикового шпату для підтримання рідкоплинності шлаку. Наприкінці цього періоду отримують метал із необхідним вмістом вуглецю та заданою температурою.

Після доводки проводять осадочне розкислення. Його призначення полягає у видаленні кисню, розчиненого в металі. Процес здійснюється у дві стадії: попереднє розкислення в печі та остаточне — у ковші. Спочатку у ванну вводять феромарганець, а потім феросиліцій. Під час випуску металу в ківш додають електропічний феросиліцій та алюміній. Основними перевагами осадочного розкислення є невелика тривалість процесу та низький вміст кисню у готовій сталі. Водночас цей метод супроводжується підвищеним забрудненням металу неметалевими включеннями та значними втратами розкислювачів і легувальних елементів.

У процесі доводки також відбувається десульфуріяція металу:

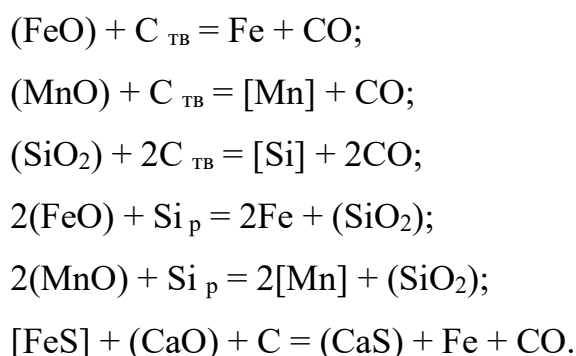


Для ефективного видалення сірки необхідні високоосновний шлак, низький вміст оксиду заліза та висока температура ванни. Однак у плавці з

окисленням вміст FeO у шлаку залишається значним, тому десульфурація проходить недостатньо інтенсивно. Через це такий спосіб плавки не застосовують при високому вмісті сірки у шихті або при жорстких вимогах до якості сталі.

У подібних випадках використовують плавку з окисленням і відновленням. Після завершення окислювального періоду шлак повністю видаляють і формують новий — відновлювальний. Основними вимогами до нього є висока основність, мінімальний вміст FeO і MnO, а також наявність відновників — вуглецю, кремнію або алюмінію. Для формування такого шлаку використовують свіжовипалене вапно, плавиковий шпат, шамотний бій, мелений кокс і феросиліцій.

У відновлювальний період ванна перебуває у спокійному стані, тому її називають «мертвою». У цей час відбуваються реакції розкислення та десульфурації:



Через відсутність інтенсивного перемішування ці процеси проходять повільно, тому відновлювальний період може тривати понад годину. Проте саме такий спосіб дозволяє отримати метал із дуже низьким вмістом сірки — до 0,005–0,008 %. Подібна сталь характеризується високою чистотою та підвищеними експлуатаційними властивостями, зокрема при роботі в умовах низьких температур.

Головною перевагою дифузійного розкислення є отримання металу з мінімальним вмістом неметалевих включень, оскільки продукти розкислення формуються переважно у шлаку, а не в об'ємі металу. Основним недоліком цього способу є значна тривалість процесу, що знижує продуктивність дугової печі.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе технічне завдання проектування електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- виконано огляд печей для плавки сталі;
- описано будову і принцип роботи електродугової печі;
- виконано розрахунок основних розмірів та електротехнічний розрахунок плавильного агрегату.

В першому розділі описано печі ливарного виробництва для плавки сталі, будову і принцип роботи електродугової печі.

В другому розділі розраховано основні розміри електродугової печі для плавки сталі ємністю 12 т. Виконано електротехнічний розрахунок плавильного агрегату.

В третьому розділі описано технологію плавки сталі в електродуговій печі з основною футеровкою.

Розроблені креслення загального виду печі та блоку газоочистки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: Навчальний посібник для студентів-ливарників вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 280с.
2. Долотов Г.П., Кондаков Є.А. Печі та сушила ливарного виробництва. - М.: Машинобудування, 1990. - 304 с.
3. Методичні вказівки до дослідницьких лабораторних робіт із застосуванням ЕОМ за курсом «Металургійні печі та плавка» / Упоряд. І.М. Москальов, Т.Г. Сабірзянов. - Кіровоград: КІСМ, 1988. - 84 с.
4. Металургійна теплотехніка. У 2-х томах. Т 2. Конструкція та робота печей: Підручник для вузів / Кривандін В.А., Неведомська І.М., Кобахідзе В.В. та ін - М.: Металургія, 1986. - 592 с.
5. Свенчанський А.Д. Електричні промислові печі. - М.: Держенерговидав, 1978. - 288 с.
6. Еднерал Ф.П. Електрометалургія сталі та феросплавів. - М.: Металургія, 1977. - 488 с.
7. Благонравов Б.П., Грачов В.А., Сухарчук Ю.С. Печі у ливарному виробництві: Атлас конструкцій. - М.: Машинобудування, 1989. - 156 с.
8. Сабірзянов Т.Г. Матеріальні і теплові баланси печей ливарного виробництва. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – 22 с.
9. Практикум з ливарних сплавів та їх плавки: Навч. посібник / Луньов В.В., Москальов І.Н. – К.: ІСДО, 1993. – 228 с.
10. Сабірзянов Т.Г. Теплотехніка ливарних процесів [Навчальний посібник для студентів-ливарників] / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402с.
11. Сабірзянов Т.Г. Сучасний стан термодинаміки металургійних розплавів та її практичне використання // Наукові праці Кіровоградського державного технічного університету. - 1999. - В.5. - С. 221-224.

12. Москальов І.Н. Ліварні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. К.: НМКВО, 1993. 368с.
13. Титов І.Д., Степанов Ю.А. Технологія ливарного виробництва. М: Машинобудування, 1966. 271 с.
14. Могильов В.К., Лев О.І. Довідник ливарника. М: Машинобудування, 1988. 271 с.
15. Конончук С.В. Фізико-хімічні дослідження металургійних процесів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Фізико-хімічні основи ливарного виробництва» для студентів-ліварників спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С.В. Конончук, О.В. Скрипник. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. 76 с.
16. Конончук, С.В. Фізико-хімічні основи ливарного виробництва: навч. посіб. / С.В. Конончук, В.М. Кропівний, О.В. Скрипник; за ред. професора В.М. Кропивного. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 338 с.
17. Воронова Н.А. Десульфуратія чавуну магнієм. М.: Металургія, 1980. 239 с.
18. Соколов О. М., Самойленко А. М. Теорія і технологія електрометалургії сталі : навч. посіб. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. 238 с.
19. Поляков О. І., Гасик М. І. Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів : навч. посіб. Дніпропетровськ : Журфонд, 2009. 116 с.
20. Козлов Г. О. Дугові сталеплавильні печі : метод. посібник. Нікополь : НТ НМетАУ, 2006. 60 с.
21. Федосєєв С. П. Електросталеплавильні печі та установки спеціальної електрометалургії : курс лекцій. Дніпро : НМетАУ, 2011. 115 с.
22. Зайцев О. С. Електротехнологічні установки : електронне навч. видання. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. 142 с.

ДОДАТКИ