

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 індукційної тигельної печі
для плавки бронзи ОЦ555 ємністю 1 т»**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го
курсу групи МЗ-23мб

ОПП «Прикладне матеріалознавство та
інжиніринг»

спеціальності 132 «Матеріалознавство»

_____ Олександр БОДЯЛ

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Сергій КОНОНЧУК

Рецензент:

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**

_____ Бодял Олександр Вікторович

1. Тема роботи: «Проектування індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 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 індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т. Описати будову і принцип роботи індукційної тигельної печі. Розрахувати основні розміри плавильного агрегата а також виконати повний електротехнічний розрахунок. Спроекувати креслення загального виду плавильної печі та індуктора.
5. Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид індукційної тигельної печі,
2) Індуктор

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

_____ Бодял О.В.

Анотація

БОДЯЛ Олександр Вікторович. Проектування індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2026. 33 с.

Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид індукційної тигельної печі, 2) Індуктор.

В першому розділі описано печі для плавки бронзи, будову і принцип роботи індукційної тигельної печі.

В другому розділі розраховано основні розміри індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т. Виконано повний електротехнічний розрахунок плавильного агрегату.

Розроблені креслення загального виду печі та індуктора.

Ключові слова: індуктор, тигель, бронза, плавка, магнітопровід, шихта, футеровка, електроустаткування.

Abstract

BODYAL Oleksandr. Design of an induction crucible furnace for melting bronze SnZnPb555 with a capacity of 1 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 induction crucible furnace, 2) Inductor.

The first section describes the furnace for melting bronze, the structure and principle of operation of the induction crucible furnace.

The second section calculates the main dimensions of the induction crucible furnace for melting bronze OCS555 with a capacity of 1 t. A full electrical calculation of the melting unit has been performed.

Drawings of the general view of the furnace and inductor have been developed.

Keywords: inductor, crucible, bronze, melting, magnetic circuit, charge, lining, electrical equipment.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПЛАВКИ БРОНЗИ	9
1.1. Печі для плавки мідних сплавів	9
1.1.1. Полуменеві печі	9
1.1.2. Електричні печі опору	10
1.1.3. Індукційні тигельні печі	10
1.2. Особливості плавки олов'яних бронз	12
1.3. Будова та принцип роботи індукційної тигельної печі	13
2. РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ	21
2.1. Вихідні дані для розрахунку печі	21
2.2. Розрахунок основних розмірів індукційної тигельної печі	21
2.3. Електротехнічний розрахунок індукційної тигельної печі	23
ВИСНОВКИ	29
ЛІТЕРАТУРА	30
ДОДАТКИ	33

ВСТУП

Актуальність роботи. Індукційні тигельні печі є найперспективнішим обладнанням для плавки бронзи завдяки забезпеченню найвищої якості мідних сплавів. Використання цих агрегатів у ливарному виробництві відкриває значні технологічні та економічні можливості завдяки точному контролю температури та електромагнітному перемішуванню розплаву. Електромагнітні сили забезпечують ідеальну однорідність хімічного складу металу та повністю ліквідують розшарування важких компонентів. Оскільки нагрівання відбувається безпосередньо в об'ємі металу, процес мінімізує втрати олова, свинцю та цинку через випаровування і чад. Високий коефіцієнт корисної дії гарантує відмінну енергоефективність, а захист від насичення розплаву газами суттєво зменшує пористість готових виливків. Ливарні цехи отримують високу технологічну гнучкість, адже конструкція печі дозволяє швидко та без великих втрат переходити з однієї марки бронзи на іншу. Економічний ефект від впровадження індукційних комплексів полягає у різкому зниженні відсотка браку та підвищенні загальної продуктивності цеху за рахунок високої швидкості плавлення. Сучасні системи автоматизації спрощують керування процесом і зменшують витрати на ручну працю, а компактні розміри обладнання дозволяють ефективно використовувати площу підприємства без необхідності спорудження масивних газовідводів.

Плавка олов'яних бронз в індукційних тигельних печах має критичне значення для отримання щільних виливків через високу схильність цих сплавів до газовідділення та ліквідації. Основна складність роботи з олов'яними бронзами полягає в широкому інтервалі кристалізації олова, що часто призводить до утворення мікропористості та нерівномірного розподілу компонентів за об'ємом сплаву. Індукційне нагрівання вирішує цю проблему за допомогою інтенсивного електромагнітного перемішування, яке підтримує абсолютну однорідність рідкого металу та запобігає осіданню важких легувальних елементів. Для захисту розплаву від інтенсивного насичення воднем та киснем плавку проводять під

шаром спеціальних флюсів або деревного вугілля, які засипають у тигель разом із першою порцією шихти. Оскільки олово легко окислюється з утворенням тугоплавкого діоксиду, технологічний процес обов'язково включає операцію попереднього розкислення розплаву фосфористою міддю безпосередньо перед введенням олова або під час випуску металу. Точний температурний контроль, який забезпечують сучасні індукційні комплекси, дозволяє суворо дотримуватися оптимального теплового режиму та уникати перегріву вище необхідних меж. Тому задачі розрахунку та проектування індукційних тигельних печей є актуальними.

Мета і задачі дослідження. Проектування індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- Огляд печей для плавки мідних сплавів;
- Опис будови і принципу роботи індукційної тигельної печі;
- розрахунок основних розмірів плавильного агрегата;
- повний електротехнічний розрахунок печі;
- розробка конструкції та креслення загального виду печі.

Об'єкт дослідження – індукційна тигельна піч.

Предмет дослідження – електротехнічний розрахунок індукційної тигельної печі.

Практичне значення – розроблено конструкцію індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т.

Особистий внесок – виконано повний електротехнічний розрахунок печі.

1. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ПЛАВКИ БРОНЗИ

1.1. Печі для плавки мідних сплавів

Для плавки мідних сплавів у сучасному ливарному виробництві використовують кілька типів плавильних агрегатів, кожен з яких відрізняється конструкцією, джерелом тепла та металургійними можливостями. Вибір конкретного типу печі безпосередньо впливає на якість рідкого металу, рівень безповоротних втрат легуючих елементів, енергоефективність підприємства та загальну собівартість готових виливків.

1.1.1. Полуменеві печі. Полуменеві печі традиційно застосовують у великосерійному виробництві, на заводах із переробки брухту та кольорового металобрухту, які працюють на природному газі, мазуті або іншому рідкому паливі. До цієї категорії належать великі стаціонарні або поворотні відбивні печі, а також газові тигельні печі меншої місткості. Основна конструктивна та технологічна особливість таких агрегатів полягає в тому, що факел палива та високотемпературні продукти згоряння безпосередньо контактують із поверхнею металу або дзеркалом розплаву. Через таку взаємодію виникає серйозна металургійна проблема: мідні сплави за температур вище 1000 градусів Цельсія починають інтенсивно поглинати гази з пічної атмосфери, насамперед водень, кисень та чадний газ. Це призводить до утворення сильної газової пористості, синеви та оксидних включень у структурі майбутнього лиття. Крім того, прямий контакт із полум'ям викликає колосальний чад (вигорання) цінних і легколетких легуючих елементів, таких як цинк, олово, свинець та алюміній. Щоб мінімізувати ці негативні явища, плавку в полуменевих печах змушені вести за суворими правилами: поверхню металу обов'язково засипають товстим шаром прожареного деревного вугілля, флюсами на

основі силікатів або покривними солями, які створюють бар'єр між газами та розплавом. Попри значну місткість і здатність переплавляти масивну, забруднену шихту, полуменеві печі мають низький коефіцієнт корисної дії (близько 15–25%), потребують громіздких систем очищення відхідних газів і не дозволяють точно контролювати хімічний склад сплаву.

1.1.2. Електричні печі опору. Електричні печі опору використовують переважно для точного лиття, виготовлення дрібних партій деталей, ювелірних робіт, а також в експериментальних лабораторіях і невеликих майстернях. У цих агрегатах тепло виділяється при проходженні електричного струму через провідники з високим омичним опором — металеві спіралі з ніхрому чи фехралю або карбідокремнієві нагрівальні стержні (греналі), здатні працювати за температур до 1250–1300 градусів Цельсія. Теплова енергія передається керамічному чи графітовому тиглю, всередині якого міститься металева зарядка, переважно за рахунок випромінювання та конвекції. Електричні печі опору забезпечують дуже чисте сприятливе середовище для плавки, оскільки в робочому просторі повністю відсутні продукти згоряння палива і рух повітря мінімальний. Це дозволяє отримувати високоякісний розплав із мінімальним вмістом газів та стабільним хімічним складом. Крім того, сучасні мікропроцесорні системи дозволяють автоматично керувати процесом і підтримувати задану температуру з точністю до кількох градусів. Головними недоліками печей опору є їхня висока термічна інерційність (піч довго розігрівається), відносно низька продуктивність, обмежена місткість тиглів та значні витрати дорогої електроенергії на одиницю виплавленої продукції, що обмежує їх застосування в промислових масштабах.

1.1.3. Індукційні тигельні печі. Індукційні тигельні печі визнані найбільш прогресивним, високоефективним та затребуваним рішенням у сучасному промисловому литті мідних сплавів. Принцип їхньої дії базується на явищі електромагнітної індукції. Навколо вогнетривкого

тигля розміщується водоохолоджуваний мідний індуктор, через який пропускають змінний струм середньої або високої частоти. Цей струм створює потужне змінне магнітне поле, яке пронизує шматки металу всередині тигля і збуджує в них вторинні вихрові струми (струми Фуко). Завдяки власному електричному опору металевої зарядки відбувається її надзвичайно швидке та інтенсивне внутрішнє нагрівання й подальше розплавлення.

Головною перевагою індукційних тигельних печей є їхня колосальна швидкість плавлення та висока питома потужність. Швидкий перехід металу з твердого стану в рідкий суттєво скорочує час перебування розплаву за критичних високих температур, що радикально знижує насичення міді воднем та зменшує чад легуючих елементів до мінімальних 1–2%. Важливою перевагою є виникнення потужних електродинамічних сил у розплавленому металі під час роботи індуктора. Ці сили викликають так званий ефект магнітогідродинамічного перемішування — метал у тиглі починає активно циркулювати, утворюючи характерний випуклий меніск на поверхні. Таке самоперемішування гарантує абсолютну хімічну та температурну однорідність розплаву по всьому об'єму тигля, повністю виключаючи появу зон із різною густиною чи недогрітих шарів. Оскільки індукційні тигельні печі не мають залишкових каналів (на відміну від індукційних каналних печей), вони забезпечують унікальну гнучкість виробництва: ливарники можуть легко та без залишку зливати весь метал і в наступній плавці використовувати зовсім іншу марку сплаву, просто замінивши або очистивши внутрішній тигель. Печі мають високий тепловий ККД (до 60–70%), є екологічно чистими, виділяють мінімум тепла в робочу зону цеху і чудово піддаються повній автоматизації плавильного циклу.

Попри очевидні переваги, індукційні тигельні печі мають і ряд конструктивних та технологічних недоліків. По-перше, це висока капітальна вартість самого плавильного комплексу, який вимагає

наявності дорогих напівпровідникових перетворювачів частоти, конденсаторних батарей та замкнутих систем водяного охолодження індуктора. По-друге, через те, що тепло виділяється безпосередньо всередині самого металу, наведені на поверхню шлаки залишаються холоднішими за розплав, оскільки вони не реагують на магнітне поле індуктора. Це ускладнює наведення активних рідких шлаків і уповільнює металургійні процеси рафінування на межі розділу фаз "метал-шлак". Крім того, вогнетривка футеровка або графіто-шамотні тиглі в таких печах працюють в умовах жорстких температурних ударів та постійної ерозії від рухомого рідкого металу, що вимагає їх регулярного контролю, ремонтів або повної заміни.

1.2. Особливості плавки олов'яних бронз

Особливості плавки олов'яних бронз в індукційних тигельних печах вимагають від ливарників суворого дотримання технологічної дисципліни через специфічні фізико-хімічні властивості олова та супутніх компонентів. Олов'яні бронзи мають широкий інтервал кристалізації та відрізняються надзвичайно високою схильністю до поглинання газів, особливо водню, який при охолодженні металу виділяється і створює дрібну, рівномірно розподілену газову пористість, що різко знижує щільність та герметичність виливків. Висока швидкість індукційної плавки є тут рятівним фактором: водень просто не встигає дифундувати в метал у великих об'ємах. Проте через велику різницю в питомій вазі міді та олова, олов'яні бронзи схильні до так званої ліквіації за питомою вагою (розшарування сплаву). Постійний рух металу під дією індуктора повністю нівелює цей ефект, забезпечуючи ідеальний розподіл олова в матриці міді. Під час плавки олово легко окислюється з утворенням тугоплавкого діоксиду олова SnO_2 , який забруднює розплав неметалевими включеннями. Для запобігання цьому явищу плавку ведуть під шаром захисного

покриття: застосовують ретельно просушене деревне вугілля або флюси на основі зневодненої бури, кальцинованої соди та битого силікатного скла. Найважливішим етапом плавки олов'яних бронз в індукційній печі є операція дезоксидації (розкислення). Перед випуском металу або безпосередньо в тигель вводять дезоксидант — фосфористу мідь (купрум-фосфор) у кількості 0,1–0,3% від маси шихти. Фосфор має більшу спорідненість до кисню, ніж олово та мідь. Він миттєво вступає в реакцію з оксидами, відновлює чисту мідь та олово, а сам перетворюється на легкий оксид фосфору, який спливає у шлак у вигляді рідких рухливих фосфатів. Ця операція не лише очищує розплав, а й кардинально підвищує його рідкоплинність, покращує заповнюваність ливарних форм та забезпечує високі механічні й антифрикційні властивості готових бронзових деталей.

1.3. Будова та принцип роботи індукційної тигельної печі

Індукційні плавильні печі оснащені індуктором — котушкою, підключеною до мережі змінного струму. Під час проходження струму через котушку навколо неї утворюється змінне електромагнітне поле, під дією якого метал нагрівається. Інтенсивність нагрівання визначається теплофізичними властивостями металу та параметрами електромагнітного поля. Нагрівання відбувається внаслідок виникнення у металі вихрових струмів, або струмів Фуко. Під час проходження цих струмів у металі, відповідно до закону Ленца–Джоуля, виділяється теплота, що забезпечує його нагрівання та плавлення.

На відміну від постійного струму, змінний індукований струм розподіляється по перерізу провідника нерівномірно. Найбільша густина струму спостерігається у поверхневих шарах, тоді як у центральній частині вона значно менша. Ступінь нерівномірності залежить від частоти струму, діаметра провідника, його електропровідності та магнітної проникності. За високих частот практично весь струм концентрується у тонкому

поверхневому шарі провідника.

У ливарному виробництві індукційні тигельні печі застосовують для виплавки сталі, чавуну, міді, бронзи, алюмінієвих та інших сплавів. У середині індуктора розміщується тигель із вогнетривкого матеріалу, який заповнюється рідким металом. Тигель виконує захисну функцію, ізолюючи індуктор від контакту з розплавом. Товщина його стінок істотно впливає на електричні параметри печі: зі збільшенням товщини частина магнітного потоку не бере участі у нагріванні металу, що призводить до зменшення коефіцієнта потужності печі. Для тигельних індукційних печей значення коефіцієнта потужності становить приблизно 0,05–0,2.

Для компенсації індуктивної потужності паралельно до індуктора підключають конденсаторні батареї. У процесі плавки кількість підключених конденсаторів змінюють, оскільки зі зміною температури шихти змінюються її електричний опір та магнітні властивості. Через коло індуктора та конденсаторної батареї проходять струми великої сили, тому для їх з'єднання використовують шини та кабелі великого перерізу.

Магнітний потік, створений індуктором, поширюється як усередині, так і зовні котушки. Залежно від характеру проходження зовнішнього магнітного потоку розрізняють відкриту, екрановану та закриту конструкції індукційних печей.

У печах відкритої конструкції магнітний потік з зовнішнього боку індуктора проходить через повітря. У такому випадку конструктивні елементи, що знаходяться поблизу індуктора, повинні бути виготовлені з неметалевих матеріалів або розташовуватись на значній відстані від нього. Для цього використовують деревину, азбоцемент та інші немагнітні матеріали. Сталеві елементи розміщують не ближче одного діаметра індуктора. Такі печі зазвичай мають невеликі габаритні розміри.

В екранованих печах зовнішній магнітний потік відокремлюється від металевих конструкцій мідним екраном. Завдяки низькому електричному опору міді втрати енергії в екрані незначні, що дозволяє розташовувати

сталеві елементи ближче до індуктора та зменшувати габарити установки.

У печах закритої конструкції зовнішній магнітний потік проходить через магнітопроводи з пакетів трансформаторної сталі. Оскільки магнітна проникність трансформаторної сталі значно перевищує проникність повітря, майже весь магнітний потік концентрується в магнітопроводах. Їх розміщують максимально близько до індуктора, що забезпечує компактність конструкції та підвищує її жорсткість. Кількість і розміри магнітопроводів визначаються потужністю печі, частотою струму та характеристиками сталі. Закриті конструкції найчастіше використовують у печах великої місткості.

Важливим параметром роботи індукційної печі є частота живильного струму. Для кожної місткості тигля та електричного опору шихти існує оптимальна частота струму. При її виборі враховують, що внутрішній діаметр тигля має бути не меншим за 3,5 глибини проникнення струму в метал.

Основними складовими індукційної тигельної печі є індуктор, магнітопроводи, каркас, футеровка, механізм нахилу, система охолодження та електрообладнання.

Індуктор (рис.1.1) являє собою циліндричну котушку, виготовлену з мідної трубки. Використання міді пояснюється її низькими втратами енергії в електромагнітному полі. Трубки можуть мати круглий, квадратний або прямокутний профіль. Товщину стінки трубки вибирають залежно від частоти струму — вона повинна перевищувати глибину проникнення струму приблизно на 30 %. Розмір внутрішнього каналу трубки визначається витратою охолоджувальної води, а поперечний переріз — величиною струму, що проходить через індуктор.

Для підведення електроенергії та охолоджувальної води індуктор оснащують спеціальними штуцерами. Між витками встановлюють електроізоляційні прокладки, а поверхню індуктора покривають шаром епоксидної смоли, що забезпечує надійну ізоляцію витків і підвищує

безпечність роботи печі.

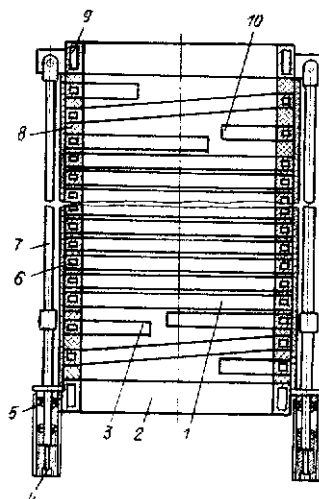


Рис. 1.1. Індуктор тигельної печі у зборі

Магнітопровід (рис.1.2) призначений для зменшення впливу полів розсіювання, які виникають навколо індуктора та можуть спричинити нагрівання металевих елементів печі. Для цього навколо індуктора встановлюють зовнішній магнітопровід, виготовлений із листової трансформаторної сталі. Він складається з окремих пакетів, рівномірно розташованих по периметру індуктора. У печах промислової частоти використовують сталь товщиною 0,5 мм, а в печах підвищеної частоти — 0,35 мм.

Довжина пакетів магнітопроводу перевищує висоту індуктора. Пакети закріплюють на каркасі печі болтами та встановлюють максимально близько до індуктора. Таке розташування забезпечує підвищення жорсткості конструкції та зменшення втрат магнітного потоку.

Каркас печі є несучою конструкцією, яка сприймає всі механічні навантаження, що виникають під час роботи агрегату. У печах невеликої місткості каркаси виготовляють із дерева, азбоцементу або немагнітних металів. Для печей великої місткості, де необхідні підвищені міцність і жорсткість, застосовують профільну сталь — швелери, кутники та балки. Каркас забезпечує стійкість печі під час теплового розширення, нахилу корпусу, а також у процесі зливання металу та шлаку.

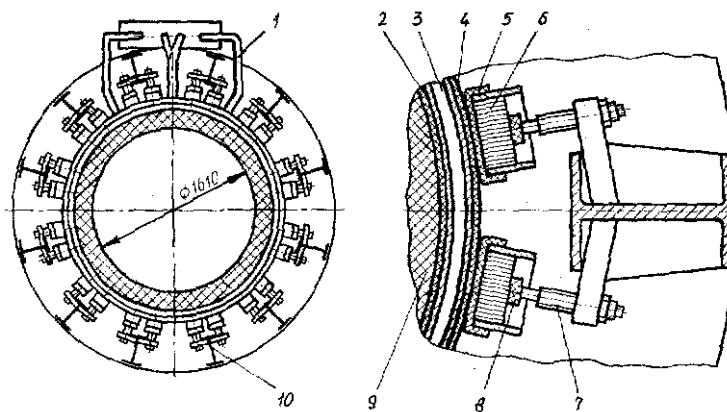


Рис. 1.2. Поперечний розріз індукційної тигельної печі:

1 – електровивід; 2,4 – азбест; 3 – індуктор; 5,8 – ізолятори; 6 – магнітопровід;
7 – прижимний гвинт; 9 – футеровка печі; 10 – балка каркаса печі

Футеровка індукційної печі працює в складних умовах, тому до неї висуваються високі вимоги щодо міцності, термостійкості та герметичності. Вона повинна витримувати механічний вплив рідкого металу, особливо у печах великої місткості понад 10 т.

З боку контакту з металом футеровка має утворювати щільний спечений шар, який перешкоджає проникненню розплаву всередину конструкції. Водночас шар футеровки, розташований біля індуктора, залишають неспеченим. Це необхідно для запобігання утворенню наскрізних тріщин. Під час експлуатації у спеченому шарі можуть виникати мікротріщини. Якщо рідкий метал проникає в них, то, потрапляючи до неспеченого шару, він спричиняє його локальне спікання, завдяки чому тріщини самоущільнюються. Така будова футеровки запобігає проникненню металу до індуктора та підвищує безпечність роботи печі.

Довговічність футеровки значною мірою визначає міжремонтний ресурс печі. Залежно від особливостей металургійного процесу використовують кислі або основні вогнетривкі матеріали.

Футеровка індукційної печі складається з поду, тигля, верхнього кільця та кришки. Для її виготовлення зазвичай застосовують вогнетривкі маси, а для поду — фасонні вогнетривкі вироби (рис. 1.3).

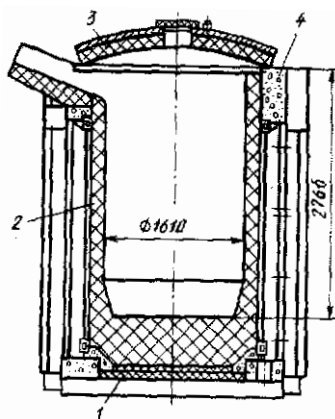


Рис. 1.3. Футеровка індукційної тигельної печі

Індукційні тигельні печі футерують сухими кварцитовими масами. Спочатку з фасонних вогнетривких виробів викладають подину печі, після чого на внутрішню поверхню індуктора наносять шар кварцитової обмазки товщиною близько 10 мм, який після затвердіння покривають листовим азбестом або теплоізоляційними плитами.

Футеровку тигля виготовляють методом вібраційного ущільнення з використанням сухих кварцитових мас. Після формування нижньої частини тигля встановлюють металевий шаблон, а простір між ним та індуктором заповнюють вогнетривкою масою. Для запобігання розшаруванню матеріалу масу подають через матер'яний або гумотканинний рукав. Після завершення футерування шаблон або залишають у печі для подальшого розплавлення, або використовують повторно.

Довговічність футеровки значною мірою залежить від зернового складу набивної маси. Дрібнозернисті фракції забезпечують щільне спікання і високу стійкість до дії металу та шлаку, однак їх надлишок знижує термічну стійкість футеровки й може спричинити утворення тріщин. Велика кількість крупних фракцій, навпаки, погіршує щільність і спіклівість футеровки.

Кришку печі виготовляють із вогнетривкої набивної маси або фасонних вогнетривких виробів. Для великих печей застосовують мулітокорундову масу з високим вмістом оксиду алюмінію.

Після виготовлення футеровку поступово сушать і прогрівають, що запобігає її розтріскуванню. Для нагрівання в піч завантажують сталеві або чавунні блоки, які під дією вихрових струмів передають тепло футеровці. Нагрівання до 1000 °С триває до 10 годин, після чого піч переводять на вищу напругу та розплавляють метал. Остаточне спікання футеровки відбувається при робочій температурі близько 1500 °С протягом приблизно однієї години.

Механізм нахилу. Для випуску металу індукційна піч оснащується механізмом нахилу, який дозволяє повертати корпус печі разом з індуктором і футеровкою на кут 95–100°. У печах невеликої місткості застосовують ручні механізми нахилу, зокрема лебідки. Печі великої місткості, як правило, обладнують гідравлічними приводами. Нахил здійснюється за допомогою гідроциліндра, з'єданого шарнірами з каркасом печі та опорною рамою. Гідросистема працює під тиском до 20 МПа. Для підвищення пожежної безпеки замість масла в гідросистемах доцільно використовувати негорючі робочі рідини.

До складу **електроустаткування** індукційної печі входять трансформатор, конденсаторні батареї, перетворювач частоти струму, щити керування та живильні кабелі. Піч підключають до мережі високої напруги через високовольтний вимикач. Трансформатор має декілька ступенів регулювання вторинної напруги, що дозволяє змінювати режим роботи печі відповідно до технологічних потреб.

Для компенсації індуктивної потужності індуктора використовують конденсаторні батареї. Одна з них працює постійно, а інша підключається поетапно залежно від режиму плавки. Це дозволяє підтримувати коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ на рівні, близькому до одиниці.

Індукційні тигельні печі, що працюють на підвищених або високих частотах, додатково оснащуються перетворювачами частоти — тиристорними або машинними.

Система охолодження печі. Елементи індукційної печі, зокрема

індуктор, конденсатори та кабелі, потребують інтенсивного охолодження для забезпечення надійної роботи. Як охолоджувальне середовище переважно використовують воду. Для печей невеликої потужності застосовують звичайну воду, тоді як великі печі охолоджуються спеціально підготовленою водою.

На рис. 1.4 наведено схему системи охолодження індукційної тигельної печі. Охолоджувальна вода циркулює по замкненому контуру, до складу якого входять піч 1, трубчастий теплообмінник 2 та конденсатори 10. Рух води в первинному контурі забезпечується насосами 8 і 9 з електроприводом, які працюють по чергово. У разі відключення електроенергії в роботу вводиться резервний насос 7 з приводом від поршневого двигуна.

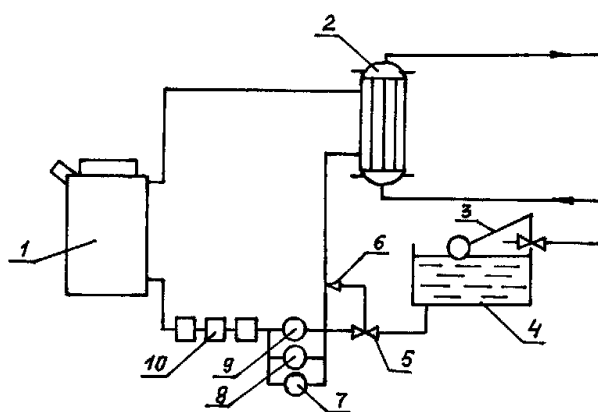


Рис. 1.4. Схема охолодження індукційної печі

Для компенсації втрат води у первинному контурі передбачена система підживлення спеціально підготовленою водою. До її складу входять бак 4, регулювальний клапан 5 та перетворювач тиску 6. Рівень води в баку автоматично підтримується за допомогою поплавкового пристрою 3.

2. РОЗРАХУНОК ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

2.1. Вихідні дані для розрахунку печі

Призначення. Індукційна тигельна піч призначена для плавки бронзи ОЦС555 з відходів власного виробництва розміром 50...100 мм, переплаву стружки розміром 200x200x100 мм та бронзових чушок 200x150x500 мм.

Ємність тигля 1 т.

Тривалість періодів плавки. Час завантаження 0,1 год, час плавлення 1 год, час доводки металу 0,1 год і час розливу 0,05 год.

Температура перегріву. Робоча температура перегріву металу складає 1150 °С, максимальна – 1200 °С.

Властивості металу. Плавильна піч служить для плавки бронзи марки ОЦС555 ДСТУ 613:2008.

Параметри живлячого струму. Напруга електромережі – 380 В, частота живлячого струму – 50 Гц.

2.2. Розрахунок основних розмірів індукційної тигельної печі

Об'єм рідкого металу в печі:

$$V_m = m/\gamma_m = 1/8,8 = 0,12 \text{ м}^3,$$

де $\gamma_m = 8,8 \text{ т/м}^3$ – густина рідкого металу.

Внутрішній діаметр тигля (рис. 2.1), м:

$$d_0 = \sqrt[3]{4V/\pi B},$$

де B – коефіцієнт, що залежить від місткості печі: 1,5–2 до – 1 т; 1,35–1,5 – для 1 – 3 т і 1,25 – 1,35 – понад 3 т. Приймаємо $B=1,4$.

Внутрішній діаметр тигля при $B = 1,4$

$$d_0 = \sqrt[3]{4V/\pi B} = \sqrt[3]{4 \cdot 0,12/\pi \cdot 1,4} = 0,48 \text{ м.}$$

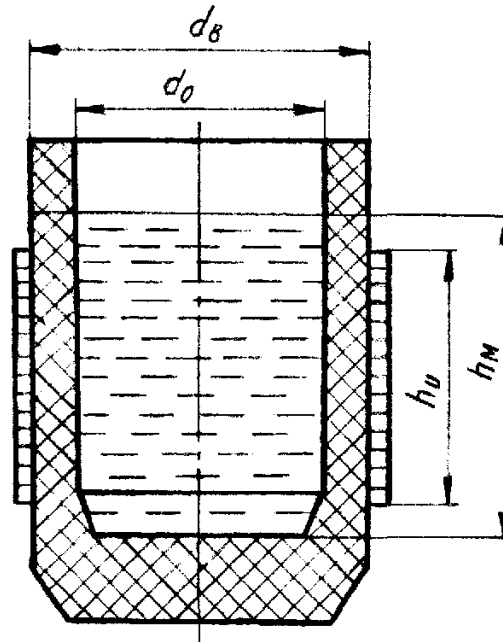


Рис. 2.1 До розрахунку розмірів індукційної тигельної печі

Висота металу в тиглі

$$h_M = B d_0 = 1,4 \cdot 0,48 = 0,67 \text{ м.}$$

Товщина s_1 стінки тигля: $(0,15 \div 0,25)d_0$ – для печей ємністю до 3 т

$$s_1 = 0,2 d_0 = 0,2 \cdot 0,48 = 0,096 \text{ м.}$$

Товщину ізоляційного шару для печей місткістю до 3 т складає 0,005 м.
Приймаємо $s_2 = 0,005$ м.

Внутрішній діаметр індуктора

$$d_B = d_0 + 2(S_1 + S_2) = 0,48 + 2 \cdot (0,096 + 0,005) = 0,682 \text{ м.}$$

З урахуванням шару обмазки із кварцитової маси товщиною 5 мм на внутрішній поверхні індуктора приймаємо $d_B = 0,692$.

Знаходимо висоту індуктора. При промисловій частоті струму індуктор розміщують нижче рівня металу. Приймаємо висоту індуктора на 15 % меншою за висоту металу в тиглі:

$$h_i = 0,85h_M = 0,85 \cdot 0,67 = 0,57 \text{ м.}$$

2.3. Електротехнічний розрахунок індукційної тигельної печі

Мінімальна частота живильного струму, Гц,

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^6 \rho_M / (\mu_M d_M^2),$$

де ρ_M – питомий електроопір металу, Ом·м; μ_M – відносна магнітна проникність металу; d_M – діаметр металу, м (для рідкого металу $d_M = d_0$ для металобрухту d_M – середній розмір куска металу).

З метою визначення мінімальної частоти живильного струму виконуємо розрахунок для трьох характерним умов: тигель заповнений немагнітною твердою шихтою, а також рідким металом.

а) Тигель заповнений твердою шихтою з температурою 20 °С. Приймаємо питомий електроопір міді $2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, відносну магнітну проникність 1 (див. табл. 5.1 [3]), середній розмір куска металу 0,15 м.

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^6 \rho_M / (\mu_M d_M^2) = 25 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-8} / (1 \cdot 0,15^2) = 22,2 \text{ Гц.}$$

б) Тигель заповнений рідким металом з температурою 1150 °С. Приймаємо питомий електроопір міді $21 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (див. табл. 5.1 [3]), відносну магнітну проникність 1, діаметр металу таким, що дорівнює внутрішньому діаметру тигля.

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^6 \rho_M / (\mu_M d_M^2) = 25 \cdot 10^6 \cdot 21 \cdot 10^{-8} / (1 \cdot 0,48^2) = 22,78 \text{ Гц.}$$

З урахуванням отриманих результатів приймаємо частоту струму 50 Гц.

Продуктивність печі:

$$P = m / (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) = 1 / (0,1 + 1,0 + 0,1 + 0,05) = 0,8 \text{ т/год.}$$

Корисна теплова потужність печі при теоретичній питомій витраті енергії для сталі 180 кВт·год/т:

$$P_{\text{пол}} = W_{\text{теор}} P' = W_{\text{теор}} P (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) / \tau_2 = 180 \cdot 0,8 (0,1 + 1,0 + 0,1 + 0,05) / 1 = 180 \text{ кВт.}$$

Корисна активна потужність печі при $\eta_{\text{терм}} = 0,85$

$$P_M = P_{\text{пол}} / \eta_{\text{терм}} = 180 / 0,85 = 212 \text{ кВт.}$$

Глибина проникання струму в метал, м

$$\Delta = 503 \sqrt{\rho_M / (\mu_M f)} = 503 \sqrt{21 \cdot 10^{-8} / (1 \cdot 50)} = 0,033 \text{ м.}$$

Напруженість магнітного поля в індукторі. Оскільки $d_0 / \Delta = 0,48 / 0,033 = 14,54$, то $A_M = 0,95$, $R_M = 1$, $k_s = 0,9$ (рис. 5.2, [3]), тоді:

$$H = (10^3/k_s) \sqrt{P_M / (6,2 d_0 h_M A_M \sqrt{\rho_M \mu_M f_M})} = (10^3/0,9) \times \\ \times \sqrt{212 / (6,2 \cdot 0,48 \cdot 0,67 \cdot 0,95 \sqrt{21 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50})} = 14869 \text{ А/м.}$$

Реактивна потужність, що виділяється в металі при $R_M = 1$ (рис. 5.2, [3]),

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_0 h_M R_M k_s^2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} = 6,2 \cdot 10^{-6} (14869)^2 \times \\ \times 0,48 \cdot 0,67 \cdot 1 \cdot 0,9^2 \sqrt{21 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} = 223 \text{ квар.}$$

Реактивна потужність, що виділяється в зазорі між металом і індуктором,

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0^2 h_M \left[(d_B/d_0)^2 - 1 \right] = 6,2 \cdot 10^{-9} \cdot (14869)^2 \times \\ \times 50 \cdot 0,48^2 \cdot 0,67 \left[(0,682/0,48)^2 - 1 \right] = 43,2 \text{ квар.}$$

Товщина стінки трубки індуктора, мм, з умов мінімальних втрат активної потужності в індукторі

$$S_{тр} = 10^3 \cdot 1,3\Delta,$$

де Δ - глибина проникнення струму в матеріал індуктора (мідь), яка вибирається з табл. 5.1 [3] для 20 °С з урахуванням прийнятої частоти струму 50 Гц. Приймаємо $\Delta=0,008$ м.

Товщина стінки трубки індуктора при $\Delta = 0,008$ м:

$$S_{тр} = 10^3 \cdot 1,3\Delta = 10^3 \cdot 1,3 \cdot 0,008 = 10 \text{ мм.}$$

Розраховуємо втрати активної потужності в індукторі. Питомий електроопір мідного індуктора $\rho_{\text{и}} = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Оскільки $d_{\text{в}}/\Delta_{\text{и}} = 0,682/0,008 = 85$, більше 14, а $2s_{\text{тр}}/\Delta_{\text{и}} = 2 \cdot 10/10 = 2$, то поправочний коефіцієнт активної потужності, який враховує кривизну індуктора та визначається по суцільним лініям (рис. 5.3 [3]) $A_{\text{и}} = 1$. Коефіцієнт заповнення індуктора приймаємо $k_{\text{з.и}} = 0,8$ [3]. Тоді

$$P_{\text{и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_{\text{в}} h_{\text{и}} A_{\text{и}} \sqrt{\rho_{\text{и}} \mu_{\text{и}} f} / k_{\text{з.и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} (14869)^2 \times \\ \times 0,682 \cdot 0,57 \cdot 0,95 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 6,32 \text{ кВт.}$$

Реактивна потужність, що виділяється в індукторі при поправочному коефіцієнті рекактивної потужності, який враховує кривизну індуктора та визначається по пунктирним лініям (рис. 5.3 [3]) $R_{\text{и}} = 0,8$,

$$Q_{\text{и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_{\text{в}} h_{\text{и}} R_{\text{и}} \sqrt{\rho_{\text{и}} \mu_{\text{и}} f} / k_{\text{з.и}} = 6,2 \cdot 10^{-6} (14869)^2 \times \\ \times 0,682 \cdot 0,57 \cdot 0,8 \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 50} / 0,8 = 5,33 \text{ квар.}$$

Загальна активна потужність

$$P = P_{\text{м}} + P_{\text{и}} = 212 + 6,32 = 218,32 \text{ кВт.}$$

Загальна реактивна (індуктивна) потужність

$$Q = Q_{\text{м}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{и}} = 223 + 43,2 + 5,33 = 271,53 \text{ квар.}$$

Повна потужність системи індуктор-метал

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{218,32^2 + 271,53^2} = 348,42 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Визначаємо силу струму в індукторі. Піч підключають до трансформатора з максимальною напругою 380 В, гнучкості регулювання досягають переключенням на різні ступені (10 ступенів). Отже:

$$I = 10^3 S / U_i = 10^3 \cdot 348,42 / 380 = 916,89 \text{ А}.$$

Число витків в індукторі:

$$n = Hh_i / I = 14869 \cdot 0,57 / 916,89 = 9,24$$

Приймаємо $n = 10$.

Крок витка індуктора:

$$h_{\text{ВИТ}} = h_i / n = 0,57 / 10 = 0,057 \text{ м}.$$

Висота трубки індуктора:

$$h_{\text{ТР}} = h_{\text{ВИТ}} k_{3,i} = 0,057 \cdot 0,8 = 0,046 \text{ м}.$$

Товщина ізоляції між витками:

$$h_{\text{ІЗОЛ}} = h_{\text{ВИТ}} - h_{\text{ТР}} = 0,057 - 0,046 = 0,011 \text{ м}.$$

Напруга струму між витками індуктора:

$$U_{\text{ВИТ}} = U_i / n = 380 / 10 = 38 \text{ В}.$$

Напруга на 1 см ізоляції між витками:

$$U_1 = 10^{-2} U_{\text{вит}} / h_{\text{ізол}} = 10^{-2} \cdot 38 / 0,011 = 34,5 \text{ В.}$$

Ширина трубки індуктора. Приймаємо трубку квадратного поперечного перерізу 40×40 мм із стінкою товщиною 10 мм. Площа поперечного перерізу трубки для електричного струму 1200 мм², густина струму 348,42/1200 = 0,29 А/мм², що допустимо.

Коефіцієнт потужності печі:

$$\cos \phi = P/S = 218,32/348,42 = 0,63 .$$

Розраховуємо ємність конденсаторної батареї. Напруга в конденсаторі приймається рівній напрузі вищого ступеня трансформатора 380 В, тоді:

$$C = 10^9 Q / (2\pi f U_k^2) = 10^9 \cdot 271,53 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 380^2) = 5988 \text{ мкФ.}$$

Загальна площа поперечного перерізу магнітопроводу:

$$F_{\text{мг}} = U_i / 4,44 f n B = 380 / (4,44 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 1,4) = 0,122 \text{ м}^2.$$

Площа поперечного перерізу одного магнітопроводу:

$$F_{\text{мг}} = 10^4 F_{\text{мг}} / N_{\text{мг}} = 10^4 \cdot 0,122 / 16 = 76,4 \text{ см}^2.$$

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе технічне завдання проектування індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- виконано огляд печей для плавки мідних сплавів;
- описано будову і принцип роботи індукційної тигельної печі;
- виконано розрахунок основних розмірів та повний електротехнічний розрахунок плавильного агрегата;

В першому розділі описано печі для плавки бронзи, будову і принцип роботи індукційної тигельної печі.

В другому розділі розраховано основні розміри індукційної тигельної печі для плавки бронзи ОЦС555 ємністю 1 т. Виконано повний електротехнічний розрахунок плавильного агрегату.

Розроблені креслення загального виду печі та індуктора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ломакін В. М., Кропівний В. М. Практикум. Плавка ливарних сплавів : навч.-метод. посіб. – Кропивницький : Центральноукраїнський національний технічний університет, 2023. – 54 с.
2. Шейко І. В., Григоренко Г. М. «Класифікація методів індукційної плавки металів і сплавів, методи безтигельної плавки» // Сучасна електromеталургія. - 2003. - № 2 (71). – С. 26–33.
3. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: Навчальний посібник для студентів-ливарників вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 280с.
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. Електromеталургія 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. Десульфуріяція 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.
22. Волощук К. В., Островерхова К. В., Костик К. О. «Індукційні тигельні печі» // Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві : матеріали 7-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 15–18 жовтня 2019 р. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – С. 63.

23. Волощук К. В., Островерхова К. В., Костик К. О. «Особливості застосування індукційних тигельних печей» // Литво. Металургія. 2019 : матеріали 15-ї Міжнар. наук.-практ. конф. – Запоріжжя : АА Тандем, 2019. – С. 50–51.
24. Волощук К. В., Островерхова К. В., Костик К. О. «Аналіз і вибір індукційної плавильної установки для плавки сплаву» // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. MicroCAD–2019. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – Ч. 1. – С. 285.
25. Ломакін В. М., Кропивний В. М. Практикум. Плавка ливарних сплавів : навч.-метод. посіб. – Кропивницький : Центральноукраїнський національний технічний університет, 2023. – 54 с.
26. Шейко І. В., Григоренко Г. М. «Класифікація методів індукційної плавки металів і сплавів, методи безтигельної плавки» // Сучасна електromеталургія. - 2003. - № 2 (71). – С. 26–33.
27. Долотов Г.П., Кондаков Є.А. Печі та сушила ливарного виробництва. - М.: Машинобудування, 1990. - 304 с.
28. 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.

ДОДАТКИ