



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ
УКРАЇНИ



Г.О.КОЗЛОВ

В.Л.ТОПОЛОВ

ІНДУКЦІЙНІ ПЕЧІ

Затверджено методичною радою
Нікопольського технікуму НМетАУ

Рекомендовано
предметно-цикловою комісією
металургійних дисциплін

Нікополь

2008

Індукційні печі: Навчальний посібник для студентів ВНЗ./ Козлов Г.О., Тополов В.Л., - Нікополь: НТ НМетАУ, 2008. - 32 с.

Розглядається конструкція індукційних та вакуумних індукційних печей. Приведена сучасна класифікація, маркірування, устрій сучасних індукційних та вакуумних індукційних печей. Охарактеризоване основне та допоміжне обладнання печей. Наведено короткі характеристики технологічних процесів виплавки сталі.

Призначений як навчальний посібник для студентів ВНЗ I-II рівня акредитації спеціальності: "Виробництво сталі і феросплавів» денної та заочної форм навчання

Іл. 12 табл. 5 бібліогр. список 8 назв.

Уклали

Г.О. Козлов

В.Л. Тополов

Рецензент

В.Л. Самойлов

Відповідальний за випуск

Г.О. Козлов

© Г.О. Козлов, В.Л. Тополов

© НТ НМетАУ, 2008

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	6
1.1 Устрій індукційної печі підвищеної частоти	7
1.2 Індукційні печі промислової частоти	11
1.3 Плавка в індукційній печі з основною футерівкою	12
1.4 Плавка в індукційній печі з кислою футерівкою	13
1.5 Установки індукційного нагріву з сердечником	13
1.6 Установка індукційного нагріву без сердечника	13
1.7 Конструкція індукційних тигельних печей	15
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ	22
2.1 Визначення геометричних розмірів	22
ЛІТЕРАТУРА	23

ВСТУП

Використання електричної енергії у металургії для виплавки металів і сплавів за останній час дістало дуже широке розповсюдження.

Електричні печі мають велику продуктивність, у кілька разів перевищуючу продуктивність печей з безпосереднім спалюванням палива. Так, десять 6-тонних індукційних печей без сердечника можуть дати за добу таку ж кількість сталі, як і шість 75-тонних мартенівських печей, при цьому капітальні витрати (вартість будівель, споруд, обладнання і т. і.) у першому випадку значно менші, ніж у другому.

Крім високої продуктивності, електричні печі забезпечують також високу якість лиття, що особливо характерно для індукційних плавильних печей. Тому плавка латуні, бронзи, мідно-нікелевих та інших тяжких кольорових сплавів здійснюється зараз на 90% у індукційних печах із залізним сердечником.

Плавка алюмінієвих сплавів також здійснюється у індукційних печах із залізним сердечником.

Високоякісні спеціальні сталі виплавляються у індукційних печах без сердечника. Останні забезпечують особливо велику чистоту плавки, внаслідок чого необхідна якість деяких сплавів (як наприклад, на нікелевій та хромонікелевій основах), в яких не припускається забруднення сіркою, фосфором та вуглецем, може бути отримано тільки в таких печах.

З цих причин індукційні печі без сердечника отримали велике розповсюдження.

Позначення індукційних печей:

Перша буква позначення виражає спосіб нагріву:

"І" - індукційний.

Друга буква визначає найменування металу або сплаву, для плавки якого призначена електропіч даного типу:

"С" - сталь і жаротривкі сплави.

Третя буква визначає основну конструктивну ознаку плавильної електропечі:

для індукційних відкритих "Т" – тигельна;

для вакуумних індукційних "В" - вакуум.

Цифра після буквеного позначення для плавильних електропечей визначає ємкість у тоннах.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Індукційні печі знайшли широке застосування при виплавці сталі в цехах дрібного лиття. У цей час випускаються печі: **високочастотні** (100 - 200 кГц), **середньої частоти** (500 - 1000 Гц), **промислової частоти** (50 Гц).

В індукційній печі метал розплавляють у тиглі, розташованому усередині індуктора, що являє собою спіраль із декількома витками зі струмопровідного матеріалу. Через індуктор пропускають перемінний струм; створюваний при цьому усередині індуктора перемінний магнітний потік наводить у металі вихрові струми, які забезпечують його нагріву й плавлення.

Щоб надмірно не збільшувати потужність живильного піч генератора в схему печі включають конденсатори, що компенсують індуктивний опір індуктора. Чим вище частота, тим менше потрібна ємність конденсаторної батареї.

Важливою особливістю індукційних печей є інтенсивна циркуляція рідкого металу, викликувана взаємодією електромагнітних полів, порушуваних з одного боку струмами, що проходять по індуктору й, з іншого, вихровими струмами в металі.

Явище нагріву металевих тіл у перемінних магнітних полях стало відомо ще в епоху перших робіт Фарадея над електромагнітною індукцією. Струми індукції, що виникають під впливом перемінного магнітного поля й які нагрівають їх, отримали назву струмів **Фуко** (по імені вченого) або **вихрових** струмів. Застосування вихрових струмів або індукційного нагріву для плавки чорних і кольорових металів відноситься до початку двадцятого століття.

Характер циркуляційних потоків показаний на рисунку 1.1.

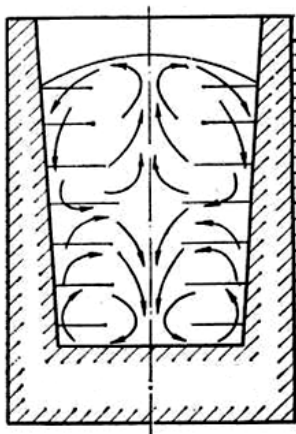


Рисунок 1.1 - Електродинамічна циркуляція металу в тиглі індукційної печі

Позитивний бік цього явища полягає в тому, що завдяки перемішуванню прискорюються плавлення й вирівнювання складу й температури металу, негативний - у тім, що поверхня металу виходить опуклою й може оголюватися, тому що шлак стікає до стінок тигля.

Ще однією особливістю індукційних печей є те, що щільність струмів, які індуктуються, досягає максимуму на поверхні металу біля стінок тигля й знижується

в напрямку до осі тигля («поверхневий ефект»). У цьому поверхневому шарі виділяється найбільша кількість тепла, за рахунок якого плавиться шихта. Товщина шару металу з великою щільністю струмів, що індуктуються, обернено пропорційна кореню квадратному із частоти.

Індукційні печі мають такі **переваги** в порівнянні з дуговими:

- відсутні високотемпературні дуги, що зменшує поглинання водню й азоту й вигар металу при плавленні;
- незначний вигар легуючих елементів при переплаву легованих відходів;
- малі габарити печей, що дозволяють помістити їх у закриті камери й провадити плавку й розливання у вакуумі або в атмосфері інертного газу;
- електродинамічне перемішування, що сприяє одержанню однорідного по складу й температурі металу.

Основними недоліками індукційних печей є мала стійкість основної футерівки й низька температура шлаків, які нагріваються від металу; із-за холодних шлаків утруднене видалення фосфору й сірки при плавці.

Як відмічалось вище індукційні печі поділяють на:

- 1) такі, що живляться струмом підвищеної частоти;
- 2) такі, що живляться струмом промислової частоти (50 Гц).

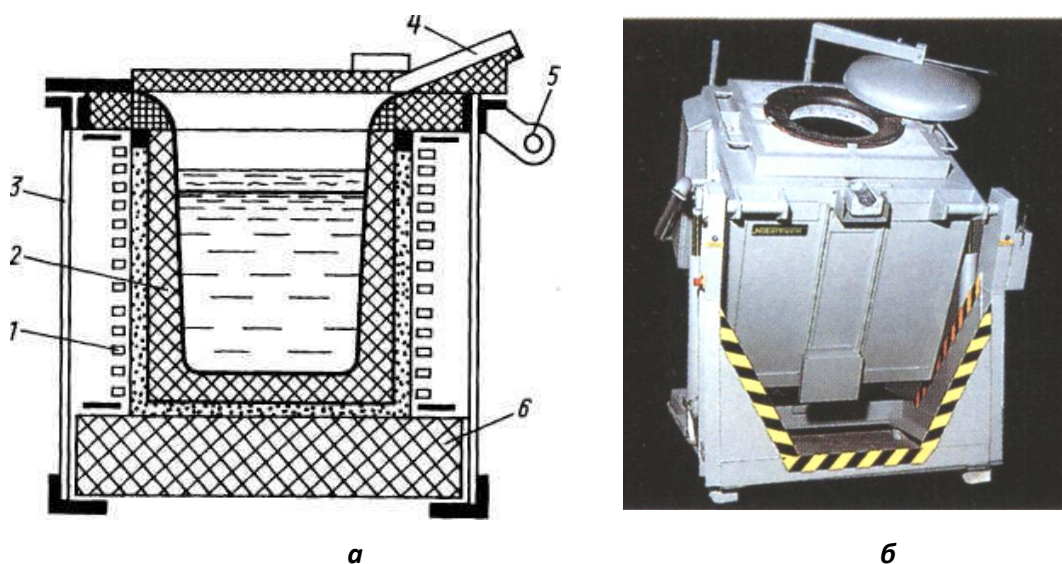
У печах першого типу частота живильного струму зазвичай знижується в міру збільшенні ємності й діаметра тигля; малі (кілька кілограм і менше) печі живляться струмом із частотою від 50 до 1000 кГц, середньою й великі (ємністю до десятків тонн) струмами із частотою 0,5 - 10 кГц.

Індукційні печі промислової частоти отримують живлення через понижувальний трансформатор, що дає вторинну напругу в межах $100 \div 1000$ В. Зазначені печі мають мінімальну витрату електроенергії, простіші в обслуговуванні й вимагають менших виробничих площ. Печі мережевої частоти використовують для виплавки чавуну й сталі, не потребуючої тривалої витримки рідкого металу в тиглях. Середня питома витрата електроенергії в цих печах складає при виплавці чавуну - 550 кВт·год/т і сталі - 730 кВт·год/т. Ємність індукційних печей досягає 60 тон.

1.1 Устрій індукційної печі підвищеної частоти

Індукційна плавильна установка складається з печі з механізмом нахилу й живильного електрообладнання (генератора підвищеної частоти, батареї конденсаторів, щита управління й на великих печах - автоматичного регулятора електричного режиму).

1.1.1 **Індукційна піч** (див. рис. 1.2) являє собою своєрідний трансформатор, у якого первинною обмоткою служить індуктор 1 (див. рис.1.2, **а**), а вторинною – металева шихта в тиглі 2. Шихту щільно укладають у тигель, виготовлений з вогнетривких матеріалів.



а – схема; *б* – загальний вигляд

Рисунок 1.2 - Індукційна тигельна піч

Тигель печі виготовляється набиванням або викладається цеглою. Для набивання використовують мелені вогнетривкі матеріали: основні (магнезит) або кислі (кварцит). Тигель знаходиться в індукторі, що представляє спіраль із визначеним числом витків з мідної трубки; усередині трубки циркулює охолоджуюча вода. Живиться індуктор від високочастотного генератора перемінного струму. Струм, високої частоти індуктує потужні вихрові струми в металі, що перебувають у тиглі, при цьому метал швидко нагрівається й плавиться.

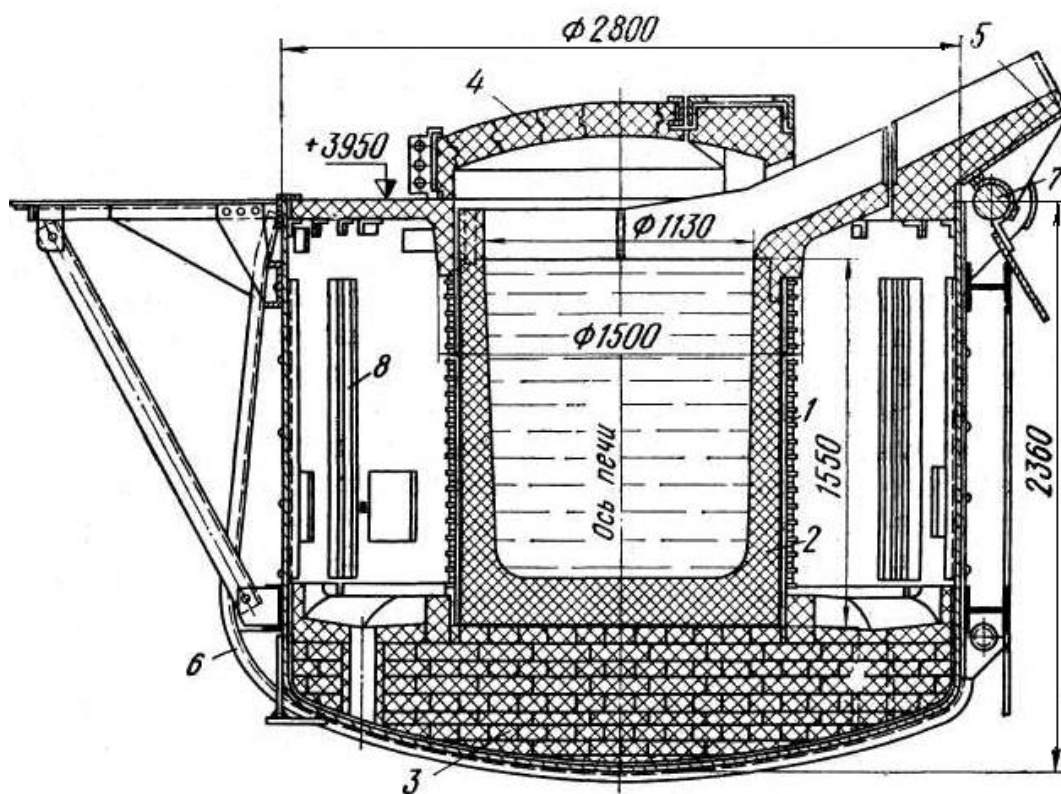
У тиглі відбувається електродинамічне перемішування металу під впливом індукційних вихрових струмів, що сприяє вирівнюванню хімічного складу металу й спливанню неметалічних включень.

Струм індуктора й частота регулюються автоматично залежно від стану металу в печі й ступені заповнення її шихтою. Печі середньої частоти дозволяють збільшувати потужність, що підводиться, у порівнянні з печами промислової частоти і це приводить до зниження часу розплавлювання шихти.

Набивний тигель 2 з вогнетривкого порошку закріплений у каркасі 3 і встановлений на плиті 6 з вогнетривкого бетону. Випуск сталі провадиться через зливний носок 4 при повороті печі разом з каркасом щодо осі 5.

1.1.2 Каркас (кожух) печей невеликої ємності (< 0,5 т) роблять у формі прямокутного паралелепіпеда, використовуючи азбоцемент, дерево, виконуючи несучі ребра з кутків і смуг немагнітної сталі, дюралюмінію. У місцях з'єднання металевих елементів укладають ізоляційні прокладки для виключення виникнення кільцевих струмів. Індуктор у такому каркасі кріплять до верхньої і нижньої опорної азбоцементної плити. У печах середньої й великої ємності каркас виконують зі сталі у вигляді суцільного кожуха циліндричної форми (див. рис. 74) і іноді у вигляді

«білячої клітки», що представляє собою групу вертикальних стояків, приварених до верхніх і нижньому опорних кілець.



- 1 - індуктор; 2 - тигель; 3 - подова плита; 4 - зйомне склепіння;
5 - зливний носок; 6 - сталевий кожух; 7 - вісь повороту;
8 - магнітопровід із трансформаторної сталі

Рисунок 1.3 - Індукційна піч ємністю 8 т

Для зменшення нагріву таких каркасів струмами, що індуктуються, й втрат з потоками розсіювання використовують такі конструктивні рішення:

- а) каркас виконують із немагнітної сталі;
- б) між каркасом зі звичайної сталі й індуктором розміщують магнітопровід з декількох пакетів трансформаторної сталі, розташованих уздовж індуктора;
- в) між індуктором і каркасом розміщують замкнутий електромагнітний екран з металу з низьким питомим опором (міді, алюмінію).

У каркасі жорстко кріплять індуктор, подову плиту, верхню кераміку, пакети магнітопроводу. До передньої частини каркаса на рівні зливного носка прикріплюють дві цапфи, що необхідно для повороту печі при зливі металу.

1.1.3 Механізм нахилу призначений для нахилу печі при зливі металу. Метал з тигля зливають через зливний носок, повертаючи встановлений на двох цапфах каркас печі на кут до 95°. Нахил печі здійснюють лебідками, тельферами, а на великих печах встановлюють гідравлічний механізм нахилу.

Таблиця 1.1 - Розміри індуктора й тигля індукційних печей

Ємність, кг	Розміри індуктора,		Розміри тигля, мм			
	висота	внутрішній діаметр	глибина	товщина дна	товщина стін	
						унизу
100	490	410	440	165	50	80
500	790	700	610	215	70	100
1400	830	760	720	200	90	130

1.1.4 Електричне обладнання служить для подачі живлення на індуктор індукційної печі. Спрощена електрична схема індукційної печі підвищеної частоти, що живиться від машинного або лампового генератора, показана на рисунку 1.4.

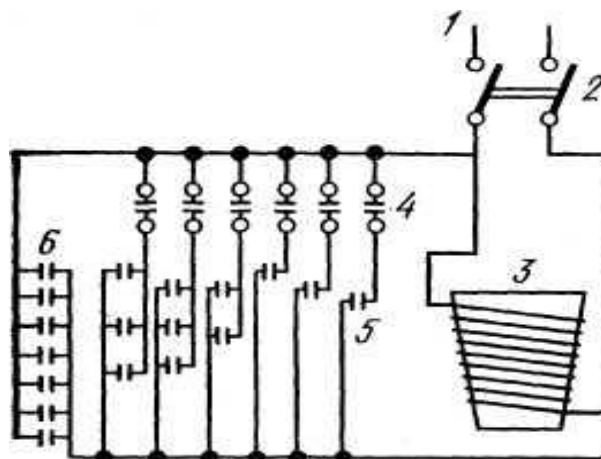


Рисунок 1.4 - Спрощена електрична схема індукційної печі

Перемінний струм високої частоти від генератора 1 через вимикач 2 подається на індуктор 3, паралельно якому підключені конденсатори 5 і 6.

Конденсатори призначені для компенсації індуктивного опору індуктора й установки в цілому (компенсації реактивної потужності установки). У ланцюг включені дві групи конденсаторів: конденсатори першої групи 6 підключені постійно; а конденсатори другої групи 5 включають якщо буде потреба.

У процесі плавки в міру нагріву шихти змінюються її питомий опір і магнітна проникність, що змінює індуктивний опір установки. Включаючи або відключаючи додаткові конденсатори домагаються рівності індуктивного і ємнісного опорів.

Як джерела живлення (перетворювачів частоти) використовують лампові й машинні генератори, тиристорні перетворювачі. Для живлення малих печей (< 30 ÷ 50 кг) застосовують лампові генератори, що виробляють струм із частотою від 30 кГц до декількох мегагерц; їхня потужність змінюється від 0,3 до 1000 кВт.

Більша частина промислових печей з тиглями ємністю 60 ÷ 100 кг і більше живляться від машинних генераторів. Їх випускають потужністю від 12 до 2500 кВт із частотою вироблюваного струму 0,5; 1; 2,4; 4; 8 і 10 кГц.

Співвідношення між ємністю печі й потужністю генератора приблизно таке:

Ємність, т.	0,06	0,4	1,0	6	10	16	25
Потужність,	50	250	500	2500	3000	5000	6000

В останні роки як джерела живлення усе ширше застосовуються тиристорні перетворювачі частоти. Промисловість випускає тиристорні перетворювачі потужністю до 3200 кВт із частотою вироблюваного струму від 0,5 до 10 кГц.

Ці перетворювачі мають у порівнянні з машинними генераторами такі переваги: більш високий електричний к.к.д.; висока готовність до роботи; можливість автоматичної підтримки оптимального електричного режиму без переключення в силовому ланцюзі (не потрібно переключення конденсаторів, що спрощує конструкцію конденсаторної батареї); відсутність обертових частин і безшумність у роботі.

До складу електрообладнання індукційної печі входять через трансформатори, що підключають також до силового ланцюга, струми й напруги електровимірювальні прилади й прилади захисту (від перевантажень по струму й напрузі й у випадку відключення охолодної води).

Великі індукційні печі обладнані автоматичним регулятором, що підтримує оптимальний електричний режим шляхом взаємозалежного регулювання коефіцієнта потужності, напруги й сили струму. Основні параметри роботи електрообладнання (потужність генератора, ємність конденсаторів, необхідна частота струму й інші) визначають розрахунком, виходячи із заданих ємності печі, тривалості плавлення, температури рідкого металу.

1.2 Індукційні печі промислової частоти

Футерівка й індуктор печей промислової частоти такі ж, як у печей підвищеної частоти. У схемі електроживлення відсутній генератор струму підвищеної частоти; піч включається в мережу через східчастий понижувальний трансформатор із вторинною напругою від 100 до 1000 В. Через відсутність перетворювача частоти для цих печей характерна менша (на 5 - 10 %) питома витрата електроенергії й більш високий коефіцієнт потужності.

Однак при низькій частоті живильного струму (50 Гц) у цих печей інтенсивність електродинамічного перемішування металу значно вища, ніж у печах підвищеної частоти. Щоб уникнути надмірної циркуляції металу, печі промислової частоти розраховують на меншу питому потужність, ніж печі підвищеної частоти; такої потужності недостатньо для швидкого розплавлення сталевих шихти. Тому печі промислової частоти зазвичай використовують для плавки металів з більш низькою температурою плавлення (чавуну, кольорових металів).

Потужність печі ємністю 1 т складає 360 кВт·А, ємністю 25 т - 4800 кВт·А.

1.3 Плавка в індукційній печі з основною футерівкою

Тривалість плавки в індукційній печі дуже невелика, що не дозволяє багаторазово перевірити склад металу шляхом його аналізу. Тому отримання сталі із заданим складом базується на попередньому розрахунку шихти, для чого необхідні точне знання її складу й зважування.

Зокрема, вміст вуглецю, сірки й фосфору не повинне перевищувати припустимих у виплавлюваній сталі меж.

Шихту складають із дрібних і великих шматків, що забезпечує щільність її укладання й скорочення тривалості плавлення. Найбільш великі шматки укладають біля стінок тигля, де щільність струмів максимальна.

Тугоплавкі феросплави завантажують у нижню половину тигля.

Після включення струму стежать за тим, щоб шматки шихти не зварювалися в «мости», що перешкоджають осіданню шматків, що плавляться, вниз. Періодично шихту «осаджують» за допомогою ломика.

У міру осідання шихти довантажують ту її частину, що не вмістилася при завалці. Після появи рідкого металу в тигель уводять шлакоутворюючу суміш із вапна, плавикового шпату й магnezиту в співвідношенні 4:1:1.

Призначення шлаків, що наводяться - зменшити насичення металу газами з атмосфери й окислювання легуючих елементів. При плавленні підтримують максимальну потужність генератора. Тривалість плавлення змінюється від 30 - 40 хвилин на малих печах (ємністю ~50 кг) до 2 годин на великих.

Після розплавлювання відбирають пробу металу на аналіз і зливають плавильні шлаки, щоб запобігти відновленню з нього фосфору, після чого наводять нові шлаки, додаючи шлакоутворюючу суміш того ж складу, що й у період плавлення.

Потужність, що подається на індуктор, знижують на 30÷40 %. Після отримання результатів аналізу проводять легування, корегування складу металу і його розкислення шляхом вводу в тигель відповідних феросплавів, після чого метал зливають із тигля в ківш.

Іноді при виплавці високоякісних сталей здійснюють дифузійне розкислення металу. Для цього в шлаки вводять суміш розкислювачів, що складаються з вапна, меленого феросиліцію, порошкоподібного алюмінію, роблячи витримку протягом приблизно 30 хв; циркуляція металу в тиглі індукційної печі прискорює розкислення.

Феросплави при плавці в індукційній печі присаджують у такому порядку:

- ферохром, феровольфрам і феромолібден уводять у завалку;
- феромарганець, феросиліцій і ферованадій - за 7 ÷ 10 хвилин до випуску;
- алюміній перед випуском.

При такому порядку введення вигар елементів такий: вольфраму біля 2 %, хрому, марганцю й ванадію - 5 ÷ 10 %, кремнію -10 ÷ 15 %, титану 25 ÷ 35 %.

1.4 Плавка в індукційній печі з кислотою футерівкою

Вміст сірки, фосфору й вуглецю не повинне перевищувати припустимих у виплавлюваній сталі меж. При виплавці сталей, легованих хромом, вольфрамом і молібденом, у завалку вводять ферохром, феровольфрам і феромолібден. Завантаження шихти й розплавлювання ведуть так само, як і в тиглі з основною футерівкою. Шлаки під час плавлення шихти наводять добавками бою скла, шамоту й вапна.

Після розплавлювання й аналізу відібраної проби металу здійснюють легування (коректування складу) і розкислення. Феромарганець, феросиліцій і, якщо необхідно, ферованадій, вводять у метал на 7 - 10 хвилин до випуску, алюміній безпосередньо перед випуском. Вигар марганцю складає 10 %, кремній практично не вивірюється, вигар вольфраму й молібдену близько 2 %, хрому 5 %.

Витрата електроенергії при виплавці сталі в індукційних печах складає 500÷700 кВт·год/т.

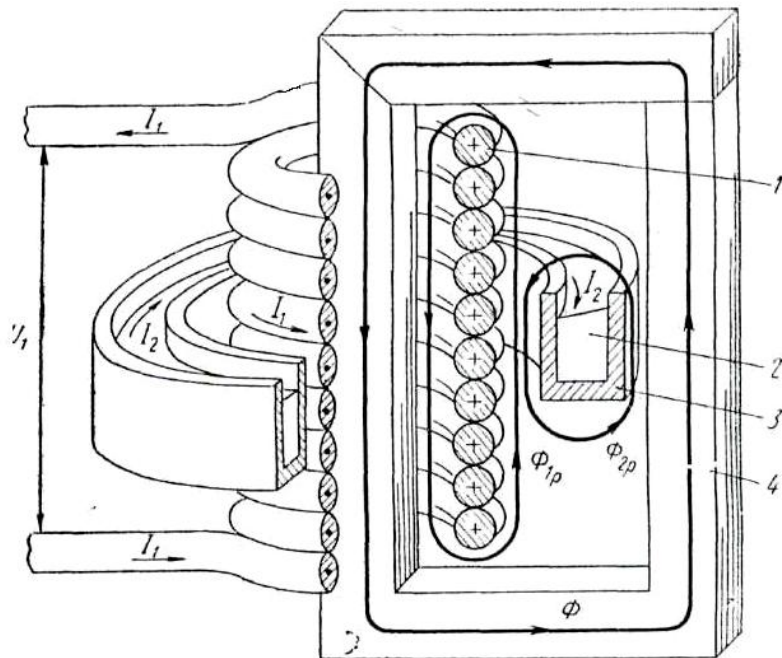
1.5 Установки індукційного нагріву з сердечником

У плавильній печі (рис. 1.1) циліндричний багатовитковий індуктор, виготовлений з мідної профільованої трубки, насаджують на замкнений сердечник, набраний з листової електротехнічної сталі (товщиною листів 0,5 мм). Навколо індуктора розміщують вогнетривку керамічну футеровку з вузьким кільцевим каналом (горизонтальним, або вертикальним), де знаходиться рідкий метал. Необхідною умовою роботи є замкнене електропровідне кільце. Тому неможливо розплавити окремі шматки твердого металу в такій печі. Для запуску печі доводиться в канал заливати порцію рідкого металу від попередньої плавки (залишкова ємкість печі).

В сталюму магнітопроводі індукційної каналної печі замикається великий робочий магнітний потік і лише невеличка частина повного магнітного потоку, який створюється індуктором, замикається через повітря у вигляді потоку розсіювання. Тому такі печі успішно працюють на промисловій частоті (50 пер/с).

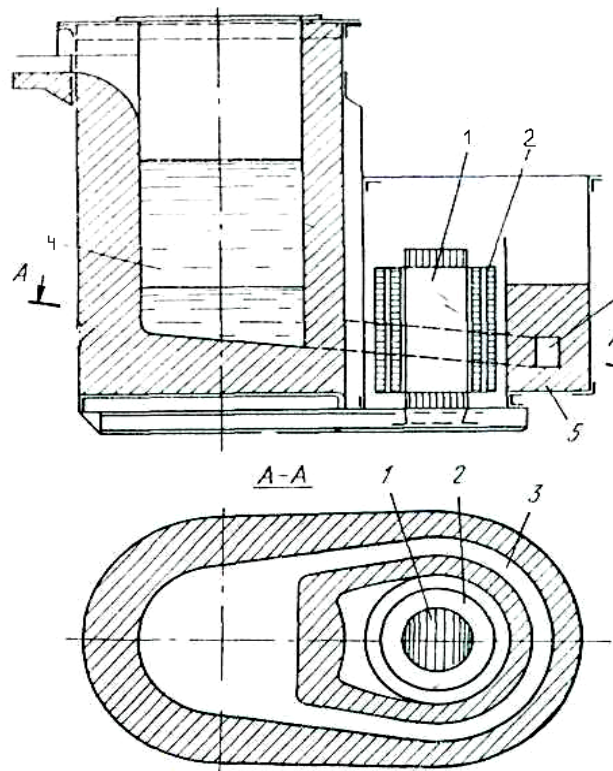
1.6 Установка індукційного нагріву без сердечника

В плавильній печі метал, що розплавляється, знаходиться у керамічному тиглі, який розташований у середині циліндричного багатовиткового індуктора. Індуктор виготовляють з мідної профільованої трубки, через яку пропускають охолоджуючу воду.



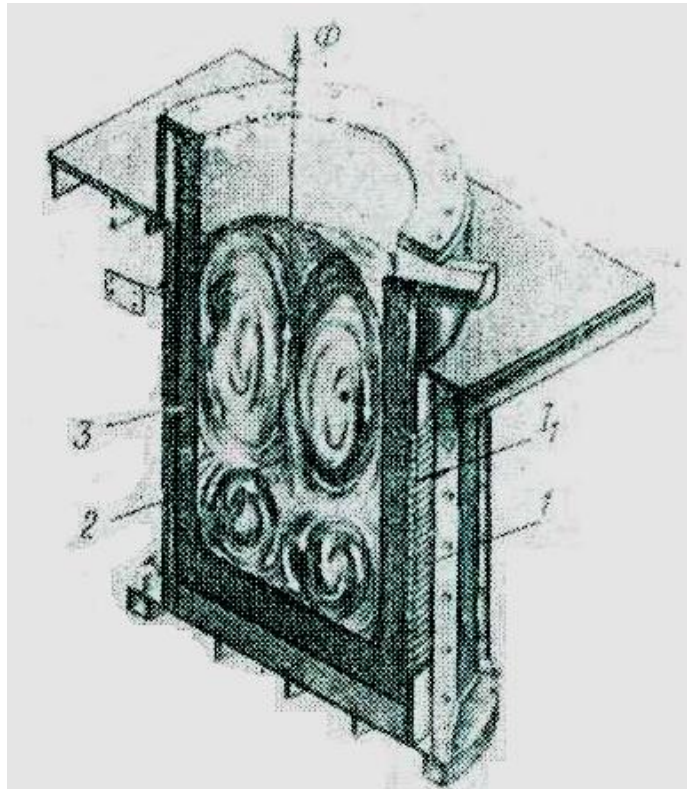
1- індуктор; 2- метал; 3- канал; 4- магнітопровід;
 Φ - основний магнітний потік; Φ_{1p} - магнітні потоки розсіювання;
 U_1 та I_1 – напруга та струм у ланцюзі індуктора; I_2 - струмопровідність у металі.

Рисунок 1.5 - Схема будови індукційної каналної печі



1- сердечник; 2-первинна обмотка; 3-горизонтальний канал;
 4-шахта; 5-подова цегла.

Рисунок 1.6 - Індукційна піч із закритим «горизонтальним» каналом.



1 - індуктор; 2 - метал; 3 - тигель

(стрілками вказана траєкторія циркуляції рідкого металу у результаті електродинамічних явищ)

Рисунок 1.7 - Схема будови індукційної тигельної печі

Відсутність сталюого сердечника приводить до різкого збільшення магнітного потоку розсіювання; кількість магнітних силових ліній, що зчіпляються з металом в тиглі, буде надто малою. Ця обставина потребує співвідносного підвищення частоти змінювання (у часі) електромагнітного поля. Тому для ефективної роботи індукційних тигельних печей доводиться споживати їх струмами підвищеної, а в окремих випадках і високої частоти від відповідних перетворювачів струму. Подібні печі мають дуже низький натуральний коефіцієнт потужності ($\cos \varphi = 0,03 \div 0,10$). Тому необхідно використовувати конденсатори для компенсації реактивної (індуктивної) потужності.

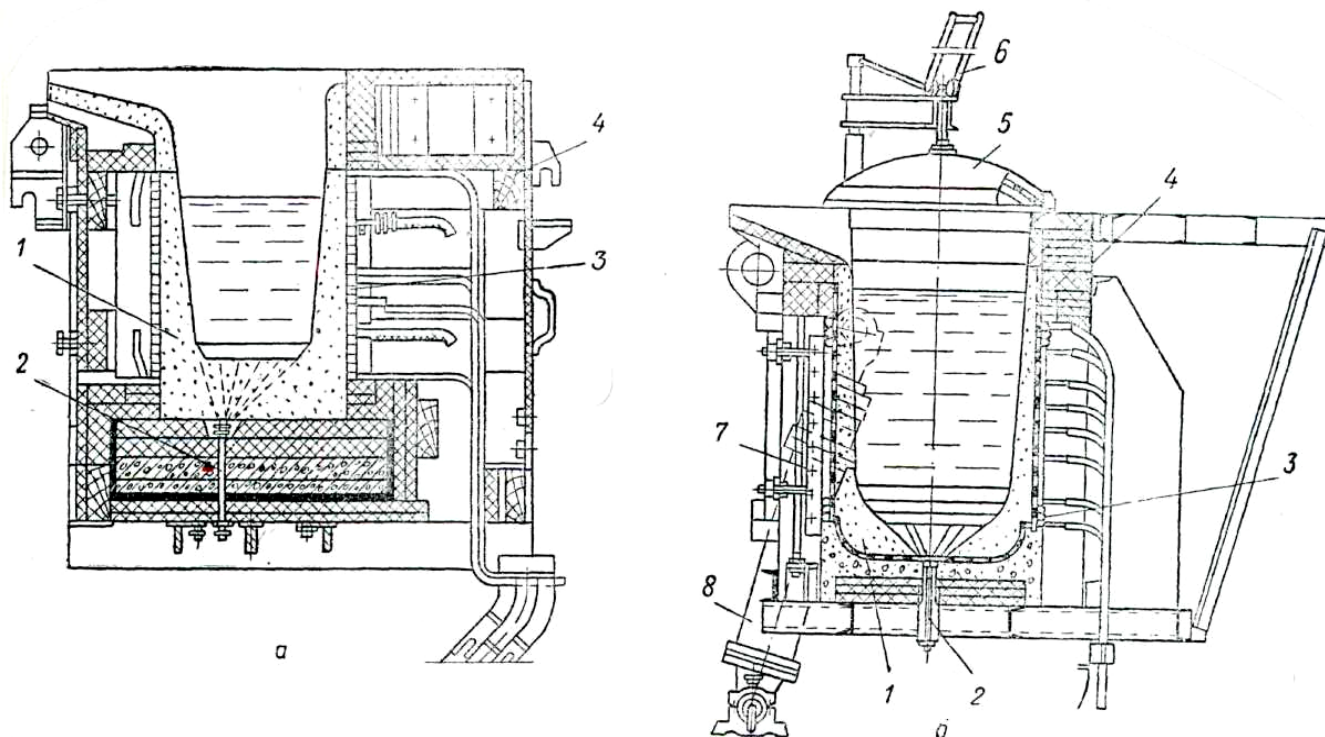
1.7 Конструкція індукційних тигельних печей

1.7.1 Корпус

Корпус є основою печі, яка механічно з'єднує в єдине ціле усі конструктивні елементи. Для індукційних печей характерна наявність поблизу індуктора сильного електромагнітного поля, що створює значні труднощі при конструюванні корпусу печі, тому що у металевих масах поглинаються електромагнітні хвилі, які викликають втрати потужності печі і небажаний нагрів корпусу.

Корпус печей малої ємкості (приблизно до 1 т) часто виготовляють з неметалевих матеріалів - дерева або азбестоцементу, з'єднуючи їх за допомогою деталей з немагнітних металів (латунних шпильок, накладок і т. д.).

Корпус печей великої ємкості виготовляють у вигляді кожуху з немагнітної сталі. Кожух кріплять таким чином, щоб не виникали замкнуті електричні контури навколо індуктора, для чого у вузлах кожуху встановлюють ізолюючі прокладки та передбачають електричну ізоляцію болтів, стержнів та шпильок.

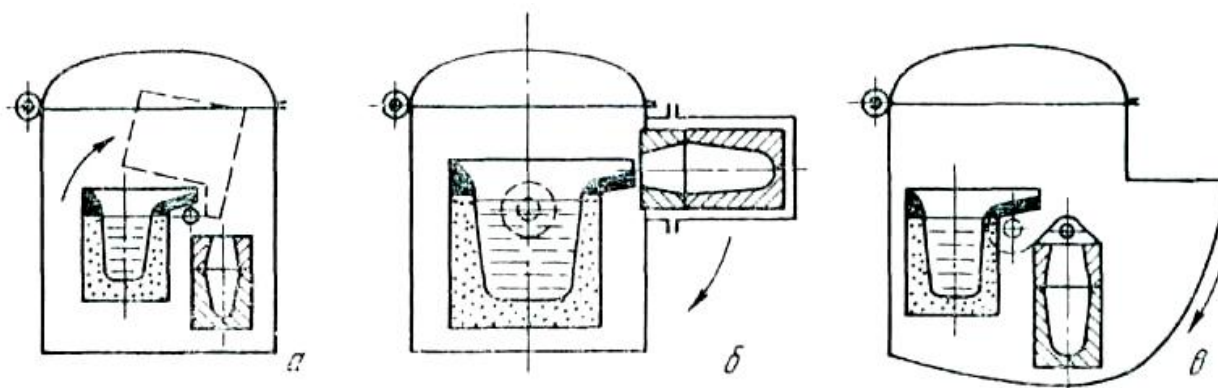


а) середньої ємкості

б) великої ємкості (зверх 1т)

- 1 - футерівка; 2 - сигналізатор контролю стану футерівки; 3 - індуктор;
4 - корпус печі; 5 - склепіння; 6 - механізм підйому та повороту склепіння;
7 - зовнішній магнітопровід; 8 - механізм нахилу печі.

Рисунок 1.8 - Індукційна тигельна піч серії ICT



а) з тиглем, що нахилиється; б) піч, яка обертається, з закріпленою виливницею;
в) піч яка обертається, з виливницею, яка качається.

Рисунок 1.9 - Типи індукційних вакуумних печей

1.7.2 Екрани

Екрани застосовують для зниження напруженості магнітного поля поблизу корпусу печі. Екран може складатись з пакету магнітопроводу, який набирають з листів трансформаторної сталі, ізольованих лаковим покриттям. Маса феромагнітного екрану (у вигляді зовнішнього магнітопроводу) досить значна: для печей малої ємкості - перевищує масу металу, що розплавляється; для печей середньої і великої ємкості - трохи менша маси садки.

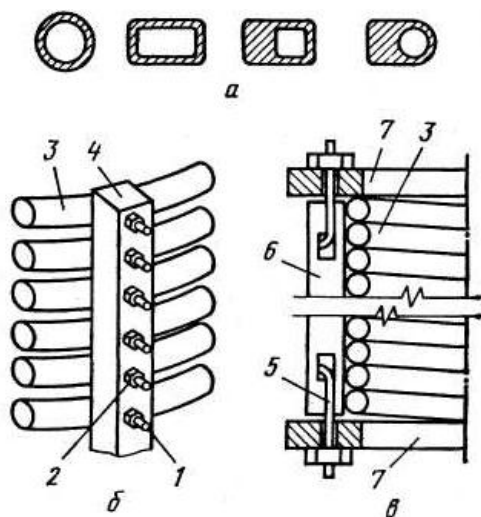
Для зменшення втрат потужності у корпусі печі можна застосовувати також електромагнітний екран у вигляді замкнутого циліндричного листа, який розташовують між індуктором і корпусом печі.

Електромагнітні екрани виконують з металу з малим питомим опором - міді, алюмінію. Такі екрани при невеликих втратах у самому екрані дуже значно зменшують втрати у корпусі печі. Застосування феромагнітних або електромагнітних екранів зменшує напруженість магнітного поля поблизу корпусу печі настільки, що дозволяє виготовляти каркас корпусу з прокату звичайної вуглецевої сталі (замість немагнітної сталі).

1.7.3 Індуктор

Індуктор призначений для створення змінного магнітного поля заданої напруженості, а також є важливим елементом кріплення тигля, утримуючим його від зміщення при нахилі печі для зливу рідкого металу. Тому конструкція індуктора повинна задовольняти не тільки електротехнічним вимогам, але також і вимогам механічної жорсткості і міцності при дії сил, які прагнуть зрушити тигель.

Індуктор виготовляють з мідної трубки спеціального профілю (рис.7). Це необхідно для того, щоб забезпечити мінімальні електричні втрати; розмістити на довжині індуктора розрахункове число витків; пропустити через живий розтин отвору трубки розрахункову кількість води, яка її охолоджує.



- 1 - латунна шпилька;
- 2 - гайка;
- 3 - витки індуктора;
- 4 - стояк з ізоляційного матеріалу;
- 5 - стяжний болт;
- 6 - вертикальна рейка;
- 7 - натискний фланець

Рисунок 1.10 - Профілі трубок для виготовлення індуктора (а) і способи кріплення витків індуктора (б, в):

Профілювання мідних трубок, крім того, зменшує середню величину зазору між індуктором і металом, що розплавляється, і декілька збільшує електричний к. к. д. системи індуктор - метал.

Індуктор являє собою циліндричну котушку, яка утворена або гвинтоподібно нагвинченою мідною трубкою з постійним кутом нахилу (спіральна навивка), або плоскими витками, які з'єднані між собою короткими нахильними ділянками трубки (намотка з переходом). Перевагою першої конструкції є простота навивки індуктора. У другому випадку, хоч виготовлення складніше, торці індуктора виявляються плоскими і їх конструктивно простіше кріпити між стяжними плитами.

Кріплення індуктора можна здійснити двома способами:

1. Кожний виток індуктора при допомозі приварених або припаяних до трубки кількох латунних шпильок кріплять незалежно до вертикальних ізоляційних (наприклад, азбестоцементних) стійок, які також є деталями кріплення тигля. При такій конструкції кріплення витки індуктора можуть бути неізольованими (роль електричної ізоляції виконує повітряний проміжок між витками, який дорівнює $1 \div 2$ см).

2. Усі витки щільно стискають між двома плитами (з ізолюючого матеріалу) та фіксують вертикальними ізолюючими стойками, які запобігають зміщенню витків та тигля при нахилі печі. При такій конструкції кріплення, витки індуктора ізолюють прокладками з миканіта, склострічкою або обмазують ізоляційним складом (мінімальна товщина 1,5 мм, яка забезпечує напругу на 1 мм ізоляційного зазору від 10 до 40 В).

1.7.4 Система водоохолодження

Система водоохолодження індуктора призначена для відводу активної потужності, яка витрачається у індукторі (P_1), та потужності теплових втрат теплопровідністю від розплавленого металу через футеровку тигля ($P_{т.п}$). Умови надійної роботи системи наступні:

1. Механічних домішок у охолоджуючій воді повинно бути не більш 80 г/м^3 та величина карбонатної (тимчасової) жорсткості повинна бути не більш 7 г-екв/м^3 ;
2. Температура води, що відходить (нагрітої), повинна бути такою, щоб відвернути накипоутворення (рис.8): звичайно її приймають $35 \div 40^\circ\text{C}$, що відповідає температурі стінки індуктора $40 \div 50^\circ$;
3. Температура індуктора не повинна бути нижчою температури оточуючого повітря, тому що у противному випадку на індукторі буде конденсуватися волога з повітря, що приведе до пробію між витками;
4. Необхідний тиск води при вході до індуктора за умовами заводських водопровідних магістралей належить обмежити до 200 кПа. Якщо за розрахунком необхідний натиск води перевищує цю межу, систему

охолодження доводиться розбивати на секції і всі секції охолодження індуктора приєднувати до охолоджуючої магістралі паралельно;

5. Швидкість течії охолоджуючої води повинна бути визначеною: не менш 0,5 м/с для створення турбулентного руху води, який запобігає осадженню на стінках трубки індуктора механічних домішок і солей, які випадають із води (внаслідок зменшення їх розчинності при нагріві води), та не більш 1,5 м/с, щоб не збільшити втрати тиску більше допустимого (~ 200 кПа).

1.7.6 Футерівка

Вогнетривка футерівка індукційних тигельних печей, яка розташована усередині індуктора, складається з таких елементів: тигля, який утворює плавильний простір і визначає ємкість печі, форма якого повинна забезпечувати зручність ведення металургійного процесу, мінімальні теплові втрати, максимальний електричний к.к.д. та достатню механічну тривкість в умовах феростатичного тиску і електродинамічного впливу рідкого металу; кришки футерованої шамотним вогнетривом (на крупних печах - склепіння; подини, яка служить основою, на якій встановлюють тигель та індуктор; льоточної кераміки (носка), яка призначена для створення струменю рідкого металу при зливі його з тигля; коміру, який з'єднує тигель та льоточну кераміку.

У футерівку тигельних печей обов'язково встановлюють сигналізатор, який контролює стан футеровки.

Робота футерівки тигля характеризується важкими умовами: тепловий, корозійний та ерозійний вплив рідкого металу, хімічна корозія шлаку, статичний тиск стовпа рідкого металу (до $40\div 80$ кПа), механічні зусилля при завантаженні шихти та особливо при осаджуванні виникаючих у процесі плавки мостів.

Тому до властивостей вогнетривких матеріалів та до якості футерівки висувають особливі вимоги:

1. Вихідні вогнетривкі матеріали для футерівки повинні володіти хімічною інертністю, високою вогнетривкістю та термічною стійкістю, малою теплопровідністю та мінімальною електропровідністю.
2. Футерівку слід виготовляти з сухих або злегка зволжених порошкоподібних мас. У склад маси, крім вихідного вогнетривкого матеріалу який має оптимальний зерновий склад, вводять добавки мінералізатора та зв'язуючої речовини. Набивати футерівку необхідно до максимально можливої щільності ($2500\div 3500$ кг/м³). Контактну поверхню стінок тигля виконують гладкою, без порожнеч і раковин. Після спікання вона повинна бути злегка покрита глазур'ю. Стінки тигля у процесі експлуатації повинні спікатися пошарово, щоб протягом усієї кампанії служби тигля існував буферний, неспікшийся, порошкоподібний шар, що виключає, виникнення наскрізних (по всій товщині тигля) тріщин і проникання рідкого металу до витків водоохолоджуемого індуктора.
3. Тигель повинен бути стійким до виникаючих термічних напружень в умовах великого температурного градієнта (до $200\div 300^\circ\text{C}/\text{см}$).
4. Футерівка тигля повинна зберігати електроізоляційні властивості в

усьому діапазоні робочих температур (200÷1650°C).

5. Вогнетривка футеровка повинна витримувати хімічну і механічну корозії та ерозії при тривалому впливі розплавленого металу та шлаку.
6. Тигель повинен бути механічно тривким як при звичайних, так і при великих температурах.
7. Технологія виготовлення футерівки та догляд за нею повинні забезпечувати високу її стійкість та мінімальну кількість екзота ендегенних неметалевих включень у виплавленому металі, забезпечуючи стабільність металургійного процесу при виплавці металу високої якості.

Зараз у практиці виготовлення футерівки індукційних тигельних печей використовують такі методи:

1. Набивку по шаблону безпосередньо у печі, коли зварений з листової сталі шаблон за формою внутрішньої поверхні тигля встановлюють на подині точно по осі печі, порошкоподібні вогнетривкі маси засипають у прозір між індуктором та шаблоном і пошарово трамбують пневматичною або електричною трамбівкою.
2. Виготовлення футерівки позапічним методом, коли тиглі трамбують, пресують або формують у спеціальних розбірних прес-формах. Тиглі, які виготовлені позапічним способом, встановлюють в індуктор печі та засипають бічний простір порошкоподібними вогнетривкими матеріалами, що попереджує прорив рідкого металу до індуктора через наскрізні тріщини, які можуть утворюватися у спочатку обпалених тиглях. Зміну футерівки при такому методі можна здійснити швидше, що скорочує простої печей.
3. Виконання футеровки з фасонних вогнетривких виробів. Товщина виробів (кільця, блоки, секційні шпунтові вироби, стандартна цегла клиноподібної форми) повинна бути такою, щоб при кладці їх виникав простір (кільцевий прозір) розміром 25÷30 мм між зовнішньою стінкою кладки і витками індуктора для створення буферного шару з порошкоподібних матеріалів.
4. Пошарову наварку футерівки шляхом торкретування або плазмовим напилюванням контактних робочих шарів на виготовлену будь-яким методом футеровку (особливо корисно при гарячих ремонтах футерівки). Метод напилювання дозволяє виконати хімічно чисту та високовогнетривку (з матеріалів вищої вогнетривкості) контактну поверхню футерівки, в відповідності до вимог до сталей і сплавів, що виплавляються.

Для індукційних тигельних печей застосовують кислу, основну й нейтральну вогнетривку футерівку, склад якої дуже різноманітний. Це дозволяє для даного технологічного процесу плавки підібрати відповідні футерівочні матеріали, рецептуру вогнетривких мас і технологію виготовлення тигля в відповідності з раніше перерахованими вимогами.

Кислу футерівку виготовляють з кремнеземистих вогнетривких матеріалів (кварциту, кварцового піску, молотої динасової цегли) з вмістом окису кремнію не менш 93÷98%. В якості зв'язуючого (зміцнюючого) матеріалу застосовують сульфітно-целюлозний екстракт, а в якості мінералізатора додають 1÷1,5% борної

кислоти. Зерновий склад вогнетривкої маси наступний: 5% зерен $3 \div 2$ мм; 50% зерен $2 \div 0,5$ мм і 45% зерен $< 0,5$ мм.

Кисла футерівка витримує $80 \div 100$ плавов.

Основну футерівку виготовляють переважно з магнезитових вогнетривів попередньо спеченому або плавленому стані, тобто володіючих найбільшою постійністю об'єму. Для зменшення усадки при великих температурах ($1500 \div 1600^\circ\text{C}$) і забезпечення деякого росту при середніх температурах ($1150 \div 1400^\circ\text{C}$), що запобігає утворенню усадочних тріщин, застосовують такі мінералізатори, як хромову руду, кварцовий пісок або кварцити. В якості зв'язуючих матеріалів використовують глину (до 3% від маси магнезиту) з зволоженням її водним розчином рідкого скла або патоку (до 12%). Кращою вогнетривкою масою за зерновим складом вважають масу при вмісті 50% зерен $6 \div 0,5$ мм; 15% зерен $0,5 \div 0,18$ мм і 35% зерен $< 0,18$ мм.

Стійкість основної футерівки нижче стійкості кислої футерівки, причому основний недолік основної футерівки - утворення тріщин.

Нейтральна футерівка характеризується великим змістом амфотерних окислів ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{ZrO}_2, \text{CrO}_3$). Нейтральна футерівка у багатьох випадках володіє більш великими експлуатаційними показниками, ніж кисла або основна футерівки, і дає можливість виплавляти в індукційних тигельних печах жаротривкі сплави і тугоплавкі метали. У нинішній час нейтральну футерівку виготовляють з магнезито-хромітових вогнетривів, електрокорунду, двоокису цирконію і циркону (ортосилікат цирконію ZrSiO_4).

1.7.7 Механізм нахилу печі

Механізм нахилу печі призначений для зливу металу і виявляється одним з важливих вузлів конструкції будь-якої плавильної печі. Для того, щоб зменшити довжину струменю металу і не переміщати розливочний ківш в відповідності з переміщенням носка печі, вісь нахилу індукційної тигельної печі розташовують поблизу носка.

1.7.8 Механізм підйому і повороту склепіння

При наявності кришки (склепіння) індукційну тигельну піч устатковують механізмом підйому і повороту кришки (склепіння). Звично застосовують прості важільні або кулачкові механізми підйому, які дозволяють припіднімати кришку (склепіння) на $1 \div 2$ см, після чого її відводять в бік повороту кронштейну, на якому вона висить. Можна підіймати кришку невеликим гідравлічним циліндром.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

2.1. Визначення геометричних розмірів

Вихідні данні для розрахунку печі: призначення, режим роботи, продуктивність, властивості розплавляється метала, напруга і частота живлячого струму.

Корисна ємність тигля, т,

$$G = (T_1 + T_2) \Pi, \quad (2.1)$$

де T_1 і T_2 – тривалість плавки, а також завантаження та розливки печі, год;
 Π – продуктивність печі, т/год.

Об'єм рідкого металу в печі, м^3 ,

$$V_M = \frac{G}{\gamma_M}, \quad (2.2)$$

де γ_M - густина рідкого металу, т/м^3 .

Внутрішній діаметр тигля, т/м^3 ,

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_M}{B}}, \quad (2.3)$$

де B – коефіцієнт, який залежить від ємності печі: 1,5-2 до 1т; 1,35-1,5 для 1-3т і 1-1,35 для >3т.

Висота метала в тиглі, м,

$$h_M = B d_0. \quad (2.4)$$

Товщина стінки тигля, мм: $(0,25 \div 0,30) d_0$ до 0,5т; $(0,15 \div 0,25) d_0$ для 0,5÷5т і $(0,1 \div 0,15) d_0$ для >3т.

6. Товщина S_2 ізоляційного шару з азбесту між тиглем та індуктором, м: 0,005 до 3т; $0,005 \div 0,01$ для 3÷15т та $0,01 \div 0,015$ для >15т.

Внутрішній діаметр індуктора, м,

$$D_E = d_0 + 2(S_1 + S_2) \quad (2.5)$$

Корисна теплова потужність, що виділяються в садці, кВт,

$$P_{\text{пол}} = W_{\text{теор}} \Pi, \quad (2.6)$$

де $W_{\text{теор}}$ - теоретичний питомий розхід енергії, кВт·год/т, (таблиця 2)

Активна потужність печі, кВт,

$$P_a = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{терм}}} \quad (2.7)$$

де $\eta_{\text{терм}}$ - термічний ККД печі, рівний 0,7 ÷ 0,9.

Таблиця 2.2 - Теоретичний удільний розхід енергії на розплавлення та перегрів металу

Метал	Температура, °C	Густина, т/м³	Розхід енергії, кВт·год/т	
			Розплавлення та перегрів	Перегрів на 1 °C
Алюміній	20	2,7	200	0,298
	800	2,5		
Мідь	20	8,9	215	0,158
	1200	8,3		
Сталь та чавун	20	7,8	355	0,23
	800	7,8		
	1500	7,2		

Мінімальна частота живлячого струму, Гц,

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^6 \frac{Q_m}{\mu_m d_c^2}, \quad (2.8)$$

де Q_m – питомий електричний опір садки, Ом·м;

μ_m - відносна магнітна проникливість садки;

d_c - діаметр садки, м

(для рідкого металу $d_c = d_0$, для металолому

d_c - середній розмір куску металу).

Таблиця 2.3 - Глибина проникнення струму в деякі метали

Метал	t, °C	Q, Ом·м·10 ⁸	μ	Δ_e в мм при частоті тока, Гц			
				50	500	2500	10000
Мідь	20	2	1	10	3,2	1,4	0,7
	1200	21	1	33	10,3	4,6	2,3
Сталь та чавун	20	13-25	40	5	1,6	0,7	0,4
	800	110	1	75	2,3	10,5	5,2
	1500	125	1	80	2,5	11,2	5,6
Алюміній	20	3	1	12	3,9	1,7	0,9
	800	24	1	35	11,0	4,9	2,5

Висота індуктора, м,

$$h_i = (0,7 \div 1,3) h_m \quad (2.9)$$

Для печей підвищеної частоти висота індуктора більше висоти метала в тиглі, для печей промислової частоти вона менше висоти метала в тиглі.

Глибина проникнення струму в садку, м,

$$\Delta_e = 503 \sqrt{\frac{Q_H}{\mu_H f}} \quad (2.10)$$

де f - частота струму, що живить індуктор, Гц.

Напруженість магнітного поля у індукторі, А/м,

$$H = \frac{10^3}{k_s} \sqrt{\frac{P_a}{6.2 d_0 h_H \sqrt{Q_H \mu_H f} A_H}} \quad (2.11)$$

де k_s – коефіцієнт, який враховує самоіндукцію та взаємоіндукцію між індуктором і садкою та дорівнює 0,85-0,95;

A_m - поправний коефіцієнт активної потужності печі, який враховує кривизну металевої садки в тиглі та залежить від відношення діаметра садки до глибини проникнення струму в неї, d_0/Δ_e (рис. 2.1)

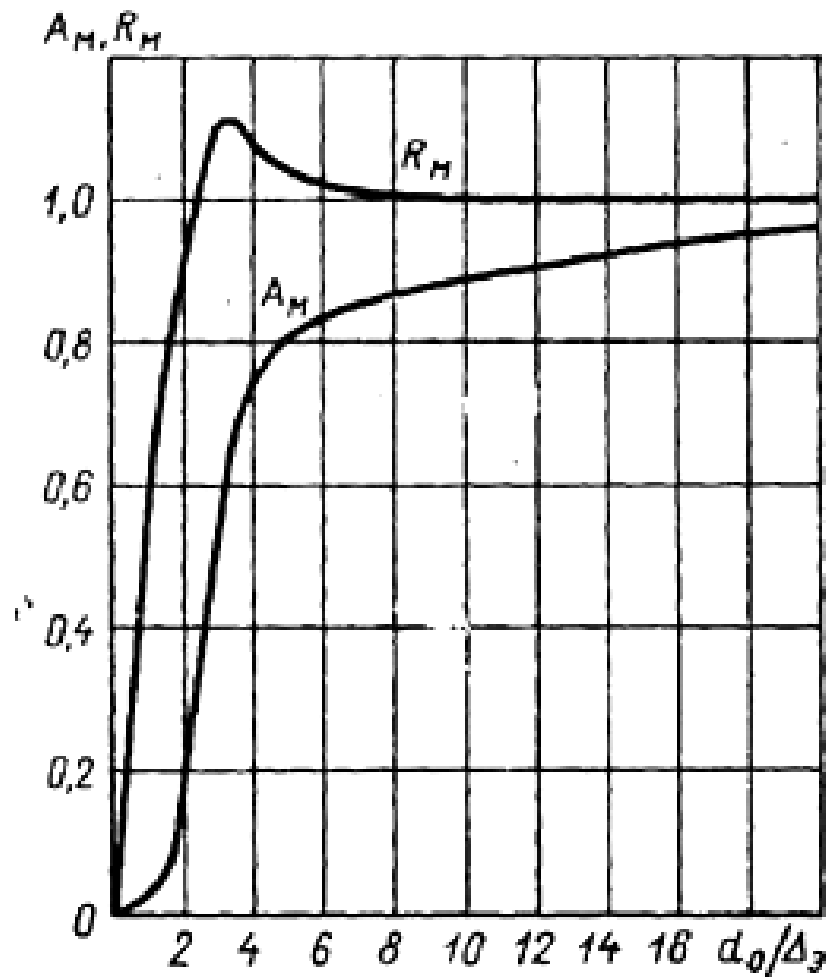


Рисунок 2.1 - Поправочний коефіцієнт активної та реактивної потужності для садки.

Реактивна потужність садки, квар,

$$P_{p.c} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_0 h_M \sqrt{Q_M \mu_M f} R_M k_s^2, \quad (2.12)$$

де R_M - поправочний коефіцієнт реактивної потужності (рис. 2.1)

Реактивна потужність в зазорі між садкою та індуктором, квар,

$$P_{p.z} = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0 h_M \left[\left(\frac{D_B}{d_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (2.13)$$

Товщина стінки індуктора, мм.

За умови мінімальних втрат активної потужності в індукторі

$$S_{тр} = 1,3 \cdot 10^3 \Delta_e. \quad (2.14)$$

Втрати активної потужності в індукторі, кВт,

$$P_{a,i} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 D_B h_i \sqrt{Q_i \mu_i f} \frac{A_i}{k_{3,i}}, \quad (2.15)$$

де Q_i - удільний електричний опір матеріалу індуктора, Ом·м;

μ_i - відносна магнітна проникливість матеріалу індуктора;

A_i - поправочний коефіцієнт активної потужності, який враховує кривизну індуктора; визначають по суцільним лініям для різних $\frac{D_B}{\Delta_{e,i}}$ (рис. 2.2);

$k_{3,i}$ - коефіцієнт заповнення індуктора, що дорівнює $0,7 \div 0,9$.

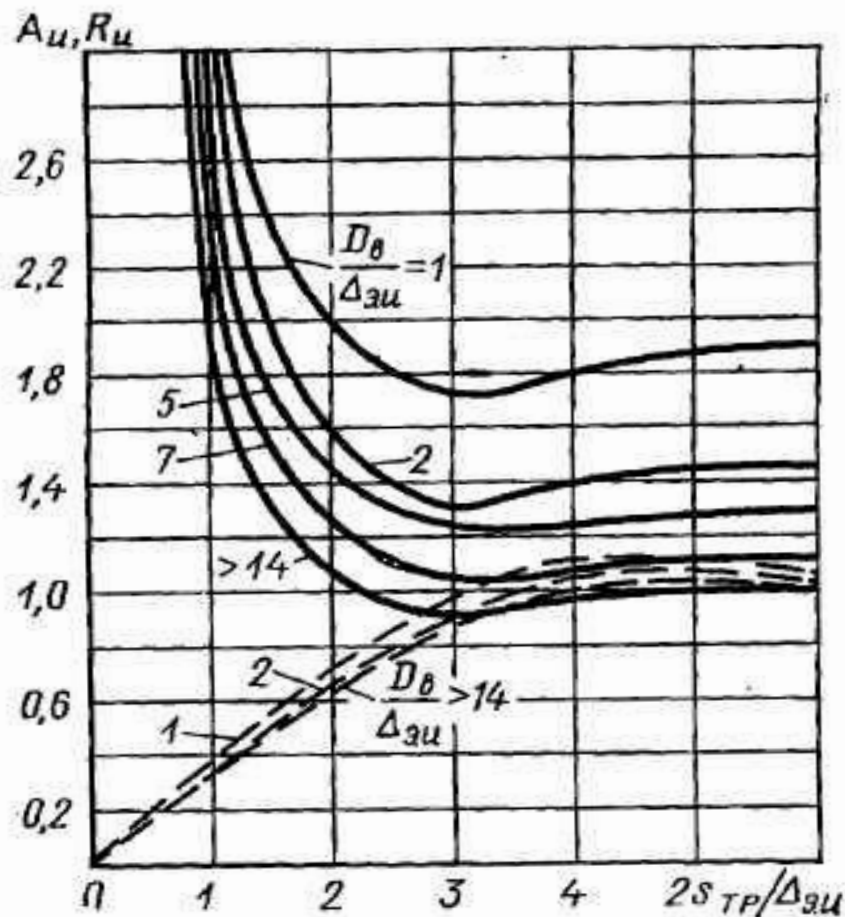


Рисунок 2.2 - Поправочний коефіцієнт активної потужності та реактивної потужності для індуктора

Реактивна потужність в індукторі, квар,

$$P_p = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 D_B h_i \sqrt{Q_i \mu_i f} \frac{R_i}{k_{3,i}}, \quad (2.16)$$

де R_i - поправочний коефіцієнт реактивної потужності, який враховує кривизну індуктора, визначають по штриховим лініям для різних $\frac{D_B}{\Delta_{e,i}}$ (рис. 2.2)

Загальна активна потужність, кВт,

$$P_{3,a} = P_a + P_{a,i} \quad (2.17)$$

Загальна реактивна потужність, квар,

$$P_{з.р} = P_{р.с} + P_{р.з} + P_{р.і} \quad (2.18)$$

Повна потужність системи індуктор – садка, кВ·А,

$$P_0 = \sqrt{P_{0.а}^2 + P_{0.р}^2} \quad (2.19)$$

Струм в індукторі, А

$$I = 10^3 \frac{P_0}{U_i}, \quad (2.20)$$

де U_i - напруга на індукторі, В.

Кількість витків в індукторі

$$W = \frac{H h_i}{J} \quad (2.21)$$

Крок витка індуктора

$$\tau = \frac{h_i}{W} \quad (2.22)$$

Висота трубки індуктора, м,

$$h_{тр} = \tau \cdot k_{з.і} \quad (2.23)$$

Товщина ізоляції між витками, м,

$$h_{ізол} = \tau - h_{тр} \quad (2.24)$$

Напруга струму між витками індуктора, В,

$$U_B = \frac{U_i}{W} \quad (2.25)$$

Напруга на 1см ізоляції між витками, В,

$$U_{1.0} = 10^{-2} \frac{U_B}{h_{ізол}} \quad (2.26)$$

допускається не більше 200 В на 1см.

Ширина трубки індуктора.

Розмір трубки у поперечному розрізі визначають з умови, при якій густина струму повинна бути не більше 20 А/мм^2 .

Дійсний кут $\cos\varphi$ печі

$$\cos\varphi = \frac{P_{0,a}}{P_0} \quad (2.27)$$

Ємність конденсаторної батареї, мкФ,

$$C = \frac{P_{0,p} 10^9}{2\pi f U_k^2}, \quad (2.28)$$

де U_k – напруга на конденсаторі, В.

Загальне січення магнітопроводів, см^2 ,

$$Q_{\text{мг}} = \frac{U_i}{4.44 f W B}, \quad (2.29)$$

де B – індукція в магнітопроводі, Вб/м², при частоті 50 Гц (0,6-1).

Січення одного магнітопроводу, см^2 ,

$$q_{\text{мг}} = 10^4 \frac{Q_{\text{мг}}}{N_{\text{мг}}}, \quad (2.30)$$

де $N_{\text{мг}}$ - кількість пакетів магнітопроводів навколо індуктора.

Таблиця 2.4 - Технічна характеристика машинних перетворювачів підвищеної частоти

Тип	Генератор			К. к. д. перетворювача, η_{np} , %
	частота струму, пер/с	потужність, кВт	напруга, В	
ВГО-1500-500	500	1500	1600/800	86
ОПЧ-320-1000	1000	320	800	88
ОПЧ-500-1000		500	1600/800	90
ВГО-1500-1000		1500	1600/800	90
ВПЧ-20-2400	2400	20	400/200	65
ВПЧ-30-2400		30	400/200	70
ВПЧ-50-2400		50	800/400/200	65
ВЕР-60-2400		60	800/400	75
ВЕР-100-2400		100	800/400	80
ОПЧ-250-2400		250	800	86
ОПЧ-500-2400		500	1600/800	90
ВГО-1500-2500	2575	1500	1500/750	88
ОПЧ-250-4000	4000	250	800	85
ОПЧ-500-4000	4000	500	1600/800	87
ВПЧ-12-8000	8000	12	200/100	70
ВПЧ-20-8000		20	400/200	65
ВПЧ-30-8000		30	400/200	70
ВПЧ-50-8000		50	800/400/200	65
ВЕР-60-8000		60	800/400	73
ВЕР-100-8000		100	800/400	79
ВГО-500-8000		500	750	77
ОПЧ-250-10000	10000	250	800	82

Таблиця 2.5 - Технічна характеристика електротермічних конденсаторів (ГОСТ 18689-73)

Тип	Конденсатори							
	з двома виводами				з чотирма виводами			
	напруга, кВ	частота, пер/с	потужність, кВА	ємкість, мкФ	напруга, кВ	частота, пер/с	потужність, кВА	ЄМКІСТЬ, мкФ
ЕСВ-0,8-0,5	0,8			99,50	0,8			99,50
ЕСВ-1-0,5	1,0	500	200	63,60	1,0	500	200	63,60
ЕСВ-1,6-0,5	1,6			24,90	1,6			24,90
ЕСВ-2-0,5	2,0			15,91	2,0			15,91
ЕСВ-0,8-1	0,8			62,20	0,8			62,20
ЕСВ-1-1	1,0	1000	250	39,80	1,0	1000	250	39,80
ЕСВ-1,6-1	1,6			15,55	1,6			15,55
ЕСВ-2-1	2,0			9,95	2,0			9,95
ЕСВ-0,5-2,4					0,5			79,60
ЕСВ-0,8-2,4	0,8	2400	300	31,20	0,8			31,20
ЕСВ-1-2,4	1,0	2400	300	19,90	1,0	2400	300	19,90
ЕСВ-1,6-2,4	1,6	2400	300	7,80	1,6			7,80
ЕСВ-2-2,4	2,0	2400	300	4,97	2,0			4,97
ЕСВ-0,5-4					0,5			55,70
ЕСВ-0,8-4	0,8	4000	350	21,80	0,8			21,80
ЕСВ-1-4	1,0	4000	350	13,90	1,0	10000	350	13,90
ЕСВ-1,6-4	1,6	4000	350	5,45	1,6			5,45
ЕСВ-2-4	2,0	4000	350	3,48	2,0			3,48
ЕСВ-0,5-10					0,5	10000	400	25,50
ЕСВ-0,8-10	0,8	10000	400	9,96	0,8	10000	400	9,96
ЕСВП-0,8-2,4					0,8	2400	300	31,20
ЕСВП-1-2,4					1,0	2400	300	19,90
ЕСВП-0,8-4					0,8	4000	350	21,80
ЕСВП-1-4					1,0	4000	350	13,90
ЕСВП-0,8-10					0,8	10000	400	9,96

Таблиця 2.6 - Енергетичний баланс та питома витрата електроенергії індукційних тигельних печей різної смкості

Показники	до 10 кг	до 100 кг	Ємкість печі											
			250 кг (для швидкоріжучої сталі)			250 кг (для вуглецевої сталі)			до 10000кг	1000кг	1400 кг			до 10000 кг
			τ _{ен}	τ _т	τ _{пл}	τ _{ен}	τ _т	τ _{пл}			τ _{ен}	τ _т	τ _{пл}	
Прибуток (%)														
Тепло від електроенергії	-	-	100	83,3	95,7	100	79,2	93,5	-	100	98,1	93,6	97,5	-
Тепло від екзотермічних реакцій	-	—	-	16,7	4,3	-	20,8	6,5	-	-	1,9	6,4	2,5	—
Витрати (%)														
Корисне тепло	-	-	54,1	34,9	47,6	43,6	20,6	36,6	-	62,7	54,0	3,0	47,6	-
Теплові втрати	-	-	14,0	29,0	19,3	20,0	32,0	23,0	-	6,0	21,0	57,0	25,7	-
Електричні втрати	-	-	31,9	36,1	ззл	36,4	47,4	40,4	-	31,3	25,0	40,0	26,7	-
у тому числі:														
у індукторі	-	-	6,4	7,7	6,5	8,2	10,1	8,7	-	4,2	10,7	11,6	11,0	-
у струмопроводі		-	1,4	1,2	1,3	1,8	1,1	1,5	-	1,1	1,3	1,0	1,2	-
у конденсаторній батареї	-	-	1,4	3,8	2,5	4,4	2,8	4,0	-	1,6	1,8	1,2	1,7	-
у перетворювачі частоти		-	22,7	23,4	22,8	22,0	33,4	26,2	-	24,4	12,2	26,2	12,8	
Характеристика роботи печі														
Тепловий к. к. д. печі	0,5-0,7	0,7-0,8	0,79	0,55	0,71	0,69	0,39	0,61	0,8-0,9	0,91	0,72	0,05	0,65	0,9-0,95
Електричний к. к. д. печі	0,4-0,6	0,1-0,7	0,92	0,89	0,92	0,89	0,84	0,87	0,7-0,8	0,94	0,88	0,85	0,87	0,80,85
Загальний к. к. д. печі	0,2-0,42	0,42-0,56	0,73	0,49	0,65	0,61	0,33	0,53	0,56-0,72	0,86	0,563	0,04	0,57	0,72-0,81
Електричний к. к. д. перетворювача	0,4-0,6	0,6-0,7	0,74	0,71	0,73	0,72	0,63	0,68	0,7-0,8	0,73	0,85	0,72	0,84	0,80.85
Загальний к. к. д. установки	0,08	0,25-0,4	0,54	0,35	0,48	0,44	0,21	0,37	0,39-0,60	0,63	0,54	0,03	0,48	0,58-0,70
Питомі витрати електроенерга, кВт·год/кг	-	-	-	-	0,685	-	-	0,895	-	0,800	-	-	0,750	-

ЛІТЕРАТУРА

1. Егоров А.В., Моржин А.Ф. Электрические печи (для производства сталей). М., «Металлургия», 19758.
2. Д.Я. Поволодцкий, В.Є. Рощин, М.А. Рысс и др.: под редакцией Поволоцкого Д.Я. Электрометаллургия стали и ферросплавов. М., Metallurgy, 1984.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи чёрной металлургии. М., Metallurgy, 1985.
4. А.Д. Свечанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др., под ред. Свечанского А.Д. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи и установки специального нагрева. М. Энергия, 1981.
5. Крамаров А.Д., Соколов А.Н. Электрометаллургия стали и ферросплавов. М. Metallurgy, 1976.
6. А.И. Строганов, М.А. Рысс. Производство стали и ферросплавов. М.Металлургия,1974.
7. Борнацкий И.И., Михневич В.Ф., Яргин С.А. Производство стали. М. Metallurgy, 1991.
8. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Печі та сушила ливарного виробництва. Підручник для технікумів. Машинобудування, 1978.

