

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Індукційні плавильні печі: види, технологічні особливості та
перспективи розвитку

Виконав: студент 4 курсу, групи б.1360-м
спеціальності 136 «Металургія»

(код і назва спеціальності)

освітньої програми

Металургія

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

В.О. Ардаб'єва

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри металургійних технологій,
екології та техногенної безпеки, доцент, к. т.
н. Воденнікова О.С.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент кафедри металургійних
технологій, екології та техногенної безпеки, с.н.с.,
к.т.н. Проценко В.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 136 «Металургія»

(номер і назва)

Спеціалізація _____

(номер і назва)

Освітня програма Металургія

(номер і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕБ

Юрій БЕЛОКОНЬ

« 12 » 02 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Ардаб'євій Валерії Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) Індукційні плавильні печі: види, технологічні особливості та перспективи розвитку

керівник роботи канд. техн. наук, доцент Воденнікова Оксана Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від 20 грудня 2023 року № 2215-с

2. Строк подання студентом роботи 16.06.2024р.

3. Викідні дані до роботи Науково-технічна література, статті у фахових виданнях, матеріали конференцій, патенти та ДСТУ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Реферат Вступ. Індукційні плавильні печі: різновиди, особливості процесу. Визначення основних параметрів індукційної плавильної печі. Огляд світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей. Вакуумні індукційні печі: види, особливості плавлення. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Титульний лист – 1. Схема індукційної тисельної печі – 1. Переваги індукційних печей перед дуговими сталеплавильними печами – 1. Технічна характеристика індукційної печі типу ІСТ – 1. Індукційні плавильні печі OTTO JUNKER – 1. Індукційні плавильні печі Inductotherm Europe Ltd – 1. Індукційні плавильні печі Inductotherm Corp (США) – 1. Індукційні плавильні печі на сідравліці (Китай) – 1.

Індукційні плавильні печі 5M INDUCTION SYSTEMS (Туреччина) – 1. Індукційні каналні печі – 1. Вакуумні індукційні плавильні печі – 1. Вакуумні індукційні печі – 1. Схеми індукційно-вакуумної плавки в печак камерного типу – 1. Схеми процесів вакуумно-індукційної дистиляції та вакуумно-індукційної дегазації – 1. Загальні висновки – 1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Індукційні плавильні печі: різновиди, особливості процесу	доцент О.С. <u>Воденнікова</u>		
Визначення основних параметрів індукційної плавильної печі	доцент О.С. <u>Воденнікова</u>		
Огляд світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей	доцент О.С. <u>Воденнікова</u>		
Вакуумні індукційні печі: види, особливості плавки	доцент О.С. <u>Воденнікова</u>		
Охорона праці та техногенна безпека	доцент О.С. <u>Воденнікова</u>		

7. Дата видачі завдання 12.02.2024 р.



КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Реферат. Вступ	12-18.02.2024	
2	Індукційні плавильні печі: різновиди, особливості процесу	18-25.02.2024	
3	Визначення основних параметрів індукційної плавильної печі	15-24.04.2024	
4	Огляд світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей	29-06.05.2024	
5	Вакуумні індукційні печі: види, особливості плавки	06-12.05.2024	
6	Охорона праці та техногенна безпека	13-19.05.2024	
7	Загальні висновки. Перелік джерел посилання	20.05.2024	

Студент _____ (підпис) Валерія АРДАБ'ЄВА (підпис та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ (підпис) Оксана ВОДЕННИКОВА (підпис та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) Юрій БЄЛОКОНЬ (підпис та прізвище)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 65 с., 26 рис., 7 табл., 20 джерел посилення.

ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, ВАКУУМНО-ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, КАНАЛЬНА ПІЧ, ПЛАВИЛЬНА ПІЧ, ТИГЕЛЬНА ПІЧ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Індукційні плавильні печі: види, технологічні особливості та перспективи розвитку.

Мета роботи – огляд сучасних видів індукційних плавильних печей, пошук нових технологічних можливостей підвищення їх продуктивності та якості металу, що виплавляється.

У розділі 1 розглянуто основні різновиди індукційних печей, описано принцип роботи індукційної печі.

У розділі 2 приведено розрахунок геометричних параметрів індукційної печі та розрахунок електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі.

У розділі 3 розглянуто інформації щодо світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей.

У розділі 4 представлено основні види вакуумних індукційних печей, освітлено особливості плавки в них.

У розділі 5 проаналізовано потенційно-небезпечні та шкідливі фактори електросталеплавильного виробництва.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ІНДУКЦІЙНІ ПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ: РІЗНОВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ.....	7
1.1 Різновиди та устрій індукційних печей	7
1.2 Переваги та недоліки індукційних печей.....	13
1.3 Принцип роботи індукційної печі.....	14
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ.....	18
2.1 Розрахунок геометричних параметрів індукційної печі.....	18
2.2 Розрахунок електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі.....	28
3 ОГЛЯД СВІТОВИХ ЛІДЕРІВ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ІНДУКЦІЙНИХ ПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ.....	34
4 ВАКУУМНІ ІНДУКЦІЙНІ ПЕЧІ: ВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВКИ.	44
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	58
5.1 Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих факторів електросталеплавильного виробництва.....	58
5.2 Охорона праці та техногенна безпека металургійного підприємства	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	64

ВСТУП

У сучасному світі велика частка металу, виплавленого з руди або вторинних відходів, виготовляється за допомогою плавильних печей, які використовують електричний струм у якості джерела енергії. Відомо, що недоліками дугових сталеплавильних печей (ДСП) є більший обсяг пилу і втрати на окислення, високий рівень шуму, вартість електродів, що постійно зростає, і перешкоди в лініях електропередач. Саме тому індукційна плавка, не використовуючи електроди, є більш екологічною, причому вони меншого розміру, тому на перспективі збільшення їх потужності та відповідно продуктивності.

Застосування індукційних нагрівальних печей дозволяє автоматизувати процеси плавки, отримувати високо леговані сталі, забезпечувати хороші умови праці для обслуговуючого персоналу. Індукційні печі використовують при плавці металів принципово інший метод нагріву. Завдяки цьому, удосконалилася і технологія плавки, розширилися можливості переплавки металів з брухту.

Мета роботи – огляд сучасних видів індукційних плавильних печей, пошук нових технологічних можливостей підвищення їх продуктивності та якості металу, що виплавляється.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні теоретичні та прикладні завдання:

- розглянути сучасні різновиди індукційних плавильних печей;
- розглянути сучасні різновиди вакуумно-індукційних плавильних печей;
- ознайомитися зі світовими лідерами у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей;
- привести розрахунок геометричних параметрів індукційної печі;
- проаналізувати умови праці при виплавці сталі в індукційній плавильній печі.

1 ІНДУКЦІЙНІ ПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ: РІЗНОВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Різновиди та устрій індукційних печей

На сьогодні індукційні печі (рис. 1.1) знайшли широке застосування при виплавці сталей в цехах дрібного лиття. Також в індукційних печах доцільно виплавляти чавун та кольорові метали (мідь, алюміній та інші). Схема індукційної тигельної печі типу ІСТ-1 приведена на рис. 1.2 та 1.3.



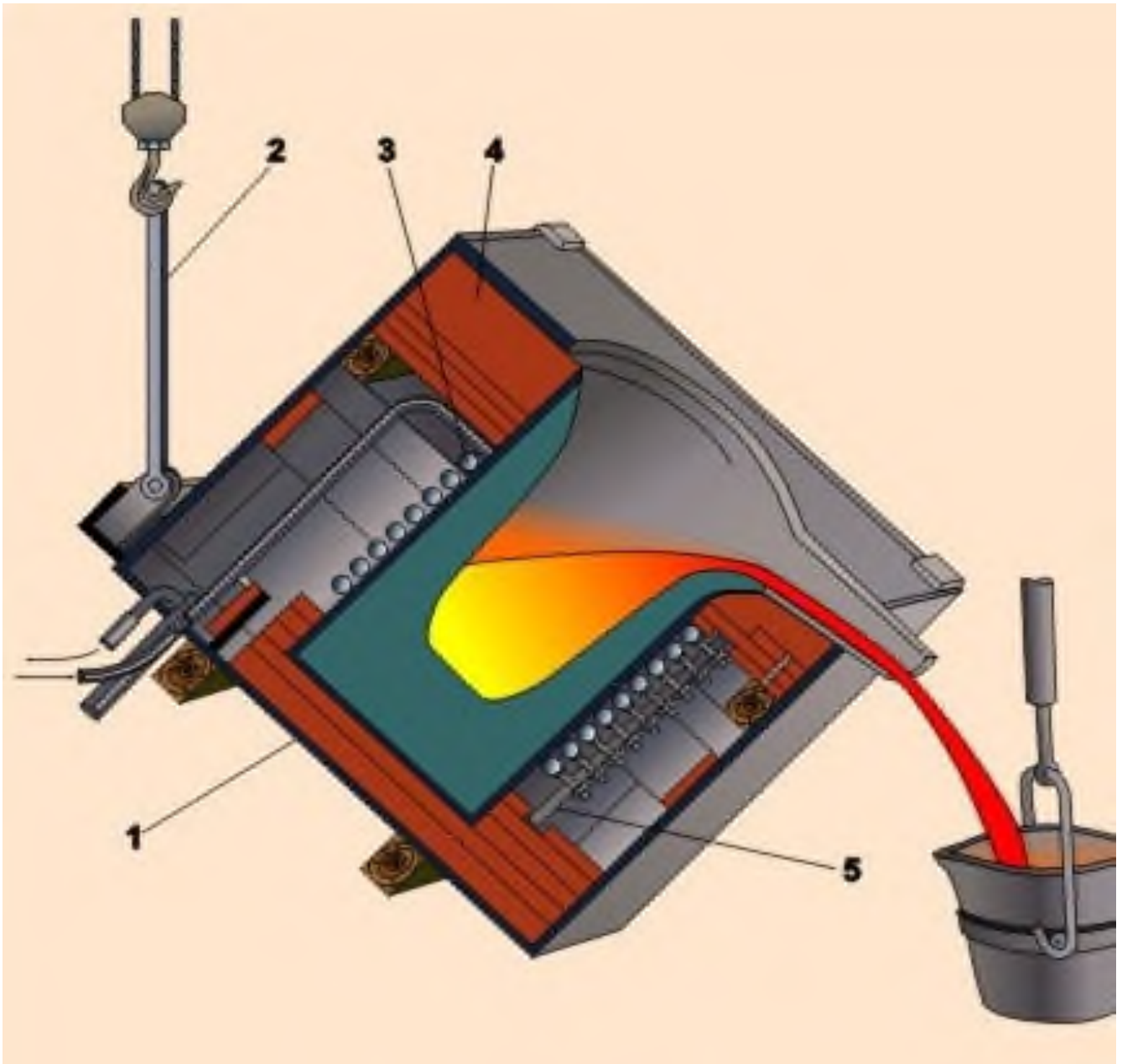
Рисунок 1.1 - Індукційна піч в умовах промисловості

Робочі температури індукційних печей наступні:

– 750 °С – для виплавки алюмінію;

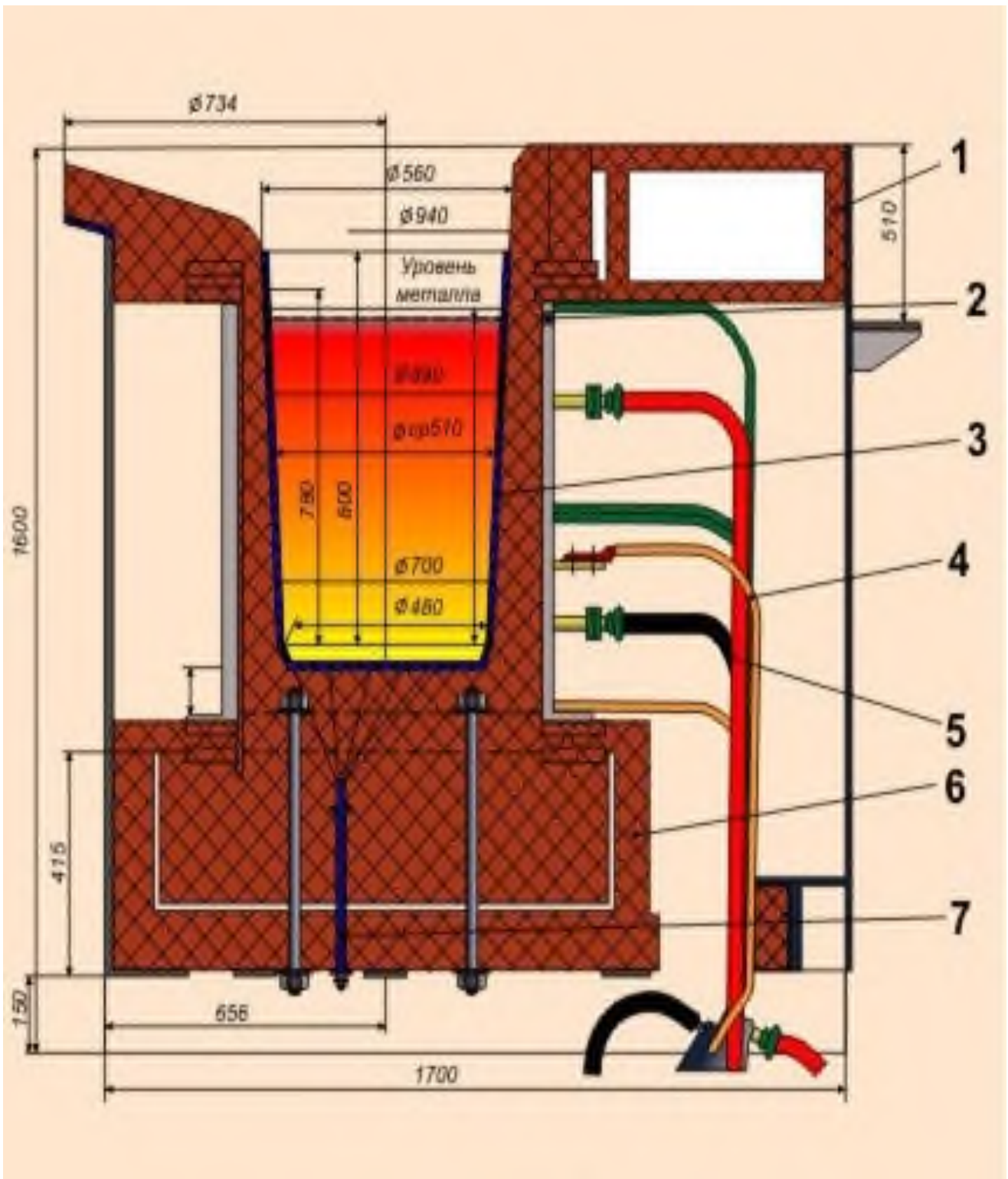
- 1200 °С – для виплавки міді;
- 200–1400 °С – для виплавки чавуну;
- 1600 °С – для виплавки сталі.

За конструкцією плавильні печі поділяються на індукційні тигельні печі та індукційні каналні печі. Канальні печі мають сердечник, тигельні виконуються з сердечником або без нього.



- 1 - каркас печі; 2 - механізм перекидання; 3 - водоохолоджуваний індуктор;
4 - футерівка печі (тигель); 5 - струмопідведена шина

Рисунок 1.2 - Схема індукційної тигельної печі типу ІСТ-1



1 - каркас печи; 2 - индуктор; 3 - шаблон; 4 - підключення ших генератору; 5 - струмопідведені кабеля; 6 - футерівка; 7 - електрод сигналізатора стану футерівки

Рисунок 1.3 - Схема індукційної тигельної печі типу ICT-1 в розрізі

Розрізняють відкриті печі (плавка на повітрі), вакуумні (плавка у вакуумі)

і компресійні (плавка під надлишковим тиском). По організації процесу в часі розрізняють печі періодичної, напівбезперервної і безперервної дії. По конструкції плавильного тигля розрізняють печі з керамічним (футерованим) тиглем, із провідним металевим тиглем, із провідної графітовим або шамотнографітовим тиглем і з холодним тиглем (водоохолоджувальним тиглем).

Слід виділити наступні різновиди індукційних печей за показником частоти: високочастотні (100–200 кГц), середньої частоти (500–1000 Гц), промислової частоти (50 Гц).

Індукційні печі промислової частоти отримують живлення через понижувальний трансформатор, що дає вторинну напругу в межах 100–1000 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.

Технічна характеристика індукційних печей типу ІСТ приведена в табл. 1.1.

В Україні найчастіше використовують індукційні тигельні печі наступної ємності: 0,06; 0,16; 0,4; 1,0; 2,5; 6; 10; 16; 25 т.

Конструкція індукційної плавильної печі (рис. 1.2) складається з наступних основних елементів:

- каркас печі з поворотним механізмом;
- бічні стійки;
- плавильний індуктор з вогнетривкою футерівкою.

Каркас складається із стійок, виготовлених з ізоляційних матеріалів, що скріплюють латунними куточками і болтами. До каркаса індукційної печі кріпляться стійки індуктора, нижня і верхня кераміка. При зливі металу нахил плавильного індуктора з вогнетривкою футерівкою здійснюється за допомогою

Таблиця 1.1 - Технічна характеристика індукційних печей типу ІСТ

№ п/п	Тип печі	Ємність, т	Потужність перетворювача, кВт	Швидкість розплавлення і перегрівання металу, т/год.	Витрата води на охолодження, м ³ /год.	Питома витрата електроенергії, кВт·год./т	Тип перетворювача
1	ІСТ-0,16/0,12	0,16	120	0,24	5,0	650	ТПЧ-120-2,4
2	ІСТ-0,16/0,25	0,16	250	0,35	5,2	630	ТПЧ-250-1,0
3	ІСТ-0,25/0,25	0,25	250	0,37	5,5	650	ТПЧ-250-1,0
4	ІСТ-0,25/0,32	0,25	320	0,38	5,5	630	ТПЧ-320-1,0
5	ІСТ-0,4/0,32	0,4	320	0,50	5,7	630	ТПЧ-320-1,0
6	ІСТ-0,4/0,5	0,4	500	0,78	11,0	620	ТПЧ-500-1,0
7	ІСТ-0,8/0,63	0,8	630	0,85	12,0	620	ТПЧ-630-1,0
8	ІСТ-1,0/0,8	1,0	800	1,2	14,0	610	ТПЧ-800-1,0
9	ІСТ-2,0/1,0	2,0	1000	1,6	20,0	600	ТПЧ-1000-1,0
10	ІСТ-2,5/1,6	2,5	1600	2,7	24,0	580	ТПЧ-1600-0,5
11	ІСТ-6,0/3,6	6,0	3600	6,5	40,0	550	ТПЧ-3600-0,5
12	ІСТ-10,0/5,5	10,0	5500	10	50,0	550	ТПЧ-5500-0,5

тельфера. Індуктор виконується у вигляді багатовиткової спіралі з профільованої мідної трубки, по стінках трубки тече струм, а в порожнині трубки - вода, що охолоджує індуктор.

Змінний струм високої частоти підводиться через вимикач до індуктора від генератора. У ланцюг паралельно з індуктором включено дві групи конденсаторів. Одна з них підключена постійно, інша підключається періодично, що дозволяє підключати ємкість, необхідну для створення резонансу у будь-який момент плавки.

Футерівку безсердечникових індукційних печей (рис. 1.4) виготовляють з кислих та основних вогнетривких матеріалів. Умови роботи тигля індукційної печі дуже важкі, оскільки товщина стінки тигля повинна бути мінімальною, щоб зменшити величину розсіювання магнітного потоку. Крім того, вона не повинна проводити електричний струм, мати хорошу вогнетривкість, термічну стійкість і шлакостійкість, а також достатньою механічну міцність.

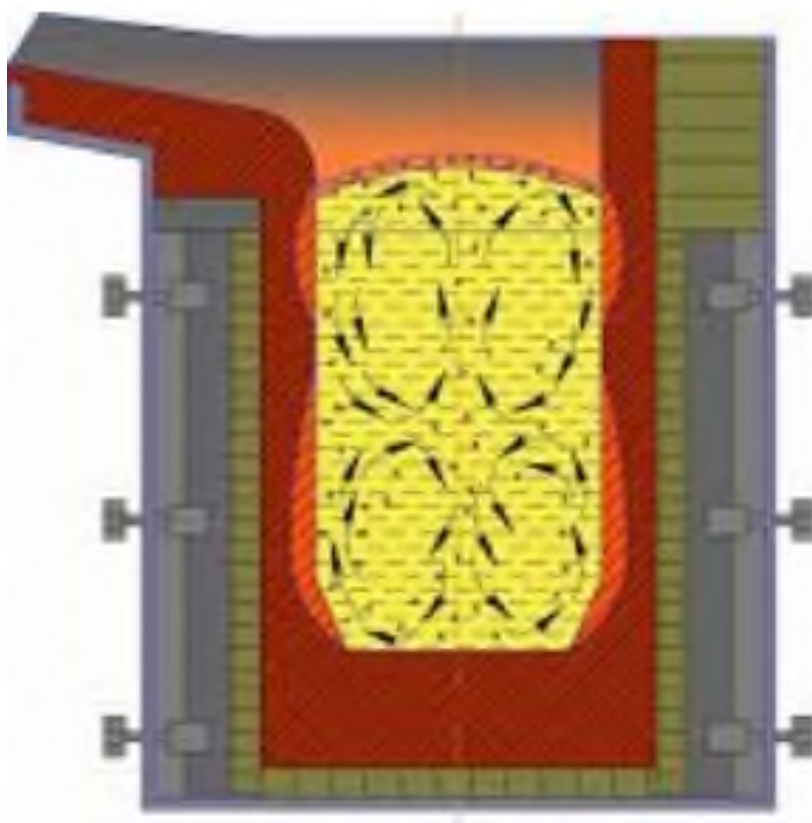


Рисунок 1.4 - Футерівка індукційної печі

Футеровка індукційних печей може бути виконана з кислих або основних матеріалів. Кисла футеровка виконується з кварциту, що містить не менше 95 % SiO_2 . У вигляді сполучника використовується 1,5- 2,5 % борної кислоти та 2,0- 4,0 % водного розчину рідкого скла. Основну футеровку виготовляють з магнезитових, вапняних, доломітових та інших вогнетривких матеріалів. У якості сполучника використовується борна кислота і вогнетривка глина.

1.2 Переваги та недоліки індукційних печей

Індукційні печі мають такі переваги, порівняно з ДСП:

- відсутність високотемпературних дуг, що зменшує поглинання водню й азоту та вигорання металу й легувальних елементів під час плавлення;
- невеликі габаритні розміри печей, що дає змогу розміщувати їх у закритих камерах і вести плавку та розливку у вакуумі або атмосфері інертного газу;
- інтенсивне перемішування розплаву, що сприяє рівномірному розподілу температури й хімічних елементів за об'ємом ванни.

Серед недоліків індукційної печі слід виділити наступні:

- низька температура шлаків;
- мала стійкість основної футерівки;
- невеликий ресурс роботи тигля;
- висока вартість обладнання.

Індукційні тигельні печі відрізняються від вакуумно-індукційних печей тим, що:

- у них немає вакуумної камери, плавлять вони в набивному тиглі відкритим способом - у середовищі повітряної атмосфери;
- індукційні тигельні печі розвивають температуру до 1800 °С;
- на індуктори індукційних тигельних печей подається напруга середньої частоти 800 –1000 В;

- індукційні тигельні печі не застосовуються для плавки надчистих тугоплавких сплавів заліза, нікелю, кобальту, кольорових металів.

1.3 Принцип роботи індукційної печі

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, викликана 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 рис. 1.5.

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.

Робота індукційних печей побудована за принципом виділення тепла металом при проходженні через нього електричного струму. Таким чином, нагрів відбувається не за рахунок теплових хвиль, що досягають металу, а за рахунок перетворення металевої маси в самостійне джерело виділення тепла. Для створення електромагнітного поля в печі використовується індуктор. У зв'язку з цим застосований принцип плавки позначається як індукційний нагрів. Індуктор входить в конструкцію плавильного агрегату.

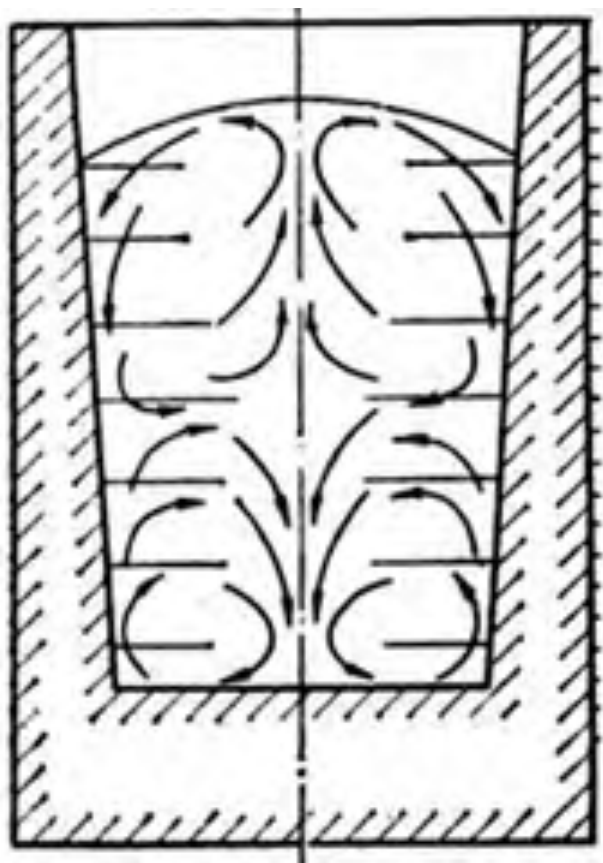


Рисунок 1.5 – Електродинамічна циркуляція металу в тиглі індукційної печі

Обов'язкова умова ефективної роботи печі - продумана система охолодження. До печі необхідно одночасно підвести і електропостачання для

нагріву металів, і воду для охолодження самого індуктора. При використанні індукційних печей значно підвищується зручність і якість плавки металів. Під впливом електромагнітного потоку в розплавленій масі металу посилюється циркуляція. Це сприяє підвищенню однорідності, отриманого в результаті плавки, металу. Крім того, плавильні печі, що використовують принцип індукційного нагріву, дають на виході метал з більш високими показниками і чистоти, і однорідності. Підвищення якості металу доповнюється зниженням собівартості всього процесу плавки. Досягається це за рахунок економії електроенергії, що витрачається на весь процес переплавки металів. Високий коефіцієнт корисної дії роботи печей подібного типу - ще одна додаткова умова, що приводить до зниження виробничих витрат. Нині в промисловості частіше використовуються індукційні печі високої частоти. Однак, середньочастотні печі також мають свої переваги. Вони дозволяють знизити витрати електроенергії майже в два рази. Індукційні печі середнього нагріву відрізняються стисненим тимчасовим циклом плавки (від 40 до 45 хв.). Це досягається за рахунок того, що значно підвищена межа допустимої потужності в таких печах. При використанні печей цього типу розширюються можливості вдосконалити технологію плавки металів. Нині на підприємствах використовується близько 23 % індукційних печей, а 76 % припадають на газові вагранки. Широкомасштабне впровадження на виробництвах обладнання для індукційної плавки дозволить значно підвищити ефективність всього процесу і його продуктивність відіб'ється на якості одержуваного металу. Індукційний метод нагріву і плавки сплавів, пройшовши більш, ніж столітній, шлях розвитку, зарекомендував себе як найбільш ефективний спосіб безконтактного підведення тепла в електропровідне середовище. Індукційна плавка набула виключно широкого поширення як за кількістю діючих установок, так і за різноманітністю технологічних застосувань в найрізноманітніших областях техніки. За масою розплаву вони розрізняються від декількох грамів в установках високочастотної плавки до 250 т чавуну в каналному міксері.

За методами індукційної плавки, залежно від розв'язуваних завдань,

установки розрізняються за своїми фізичними основами, принциповою технологічною схемою і конструкції обладнання. Їх можна розділити на дві основні групи:

- плавка металів в футерованій ванні (реалізуються в індукційних тигельних (ІТП) і каналних (КП) печах);
- плавка без зіткнення розплаву з футеровкою (використовуються в печах левітаційної плавки в зваженому стані металу, в печах безтигельної зонної плавки, а також в печах з холодним тиглем).

В процесі плавки сплаву в ІТП найбільш повно проявляються переваги і ефективність індукційного методу плавки: внутрішній розігрів шихти, розподіл виділеної енергії, здебільшого периферії садки, інтенсивне перемішування металу, високий ККД і відносно мала витрата електроенергії на тону виплавленого металу.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

2.1 Розрахунок геометричних параметрів індукційної печі

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

Корисна ємність тигля, т,

$$G = (T_1 + T_2)П, \quad (2.1)$$

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

Об'єм рідкого металу в печі, $м^3$,

$$V_{ж} = \frac{G}{\gamma_{ж}}, \quad (2.2)$$

де $\gamma_{ж}$ - густина рідкого металу, $т/м^3$.

Внутрішній діаметр тигля, $т/м^3$,

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

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 металу в тиглі, м,

$$h_{ж} = B d_0. \quad (2.4)$$

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

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

Внутрішній діаметр індуктора, м,

$$D_{ж} = d_0 + 2(S_1 + S_2) \quad (2.5)$$

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/м ³	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,

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

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 _г 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,

$$h_2 = (0,7 + 1,3)h_{20} \quad (2.9)$$

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

Глибина проникнення струму в садку, м,

$$\Delta_g = 503 \sqrt{\frac{Q_g}{\rho_g f}} \quad (2.10)$$

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

Напруженість магнітного поля у індукторі, А/м,

$$H = \frac{10^3}{k_2} \sqrt{\frac{P_g}{6,28 k_2 h_{20} Q_g \rho_g f \Delta_g}} \quad (2.11)$$

де k_2 - коефіцієнт, який враховує самоіндукцію та взаємоіндукцію між індуктором і садкою та дорівнює 0,85-0,95;

Δ_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_g (рис. 2.1)

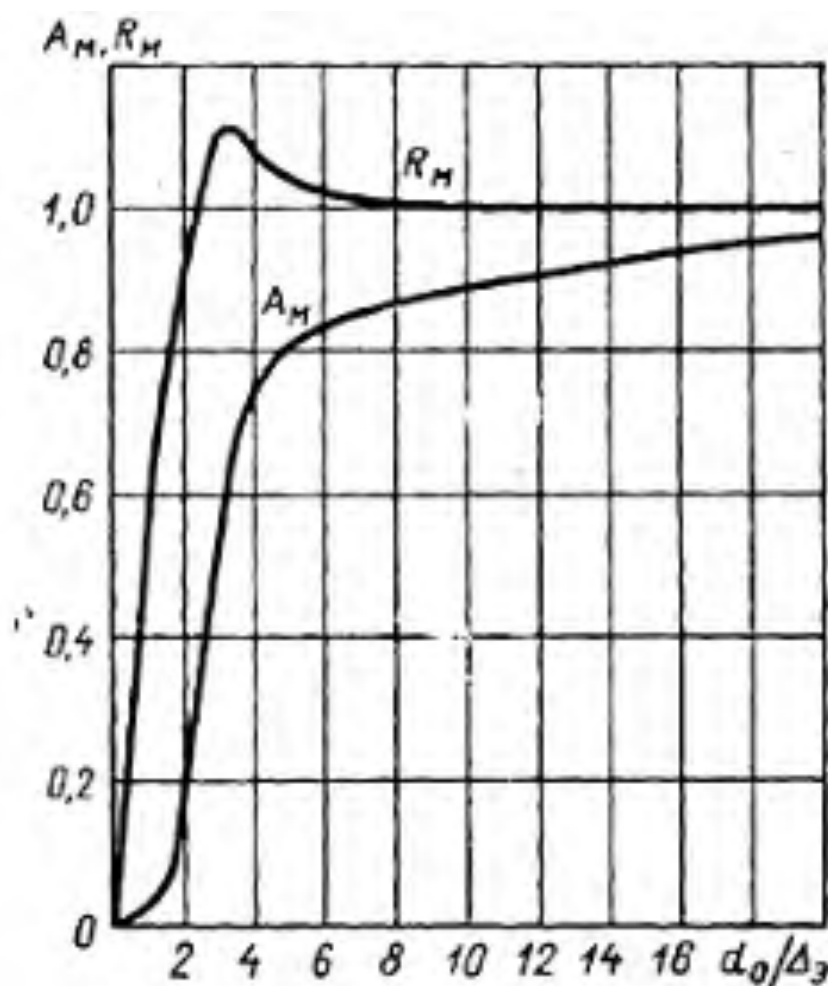


Рисунок 2.1 - Поправочний коефіцієнт активної та реактивної потужності для садки.

Реактивна потужність садки, квар,

$$P_{pc} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 d_0 h_m \sqrt{Q_m \mu_m} f R_M k_s^2, \quad (2.12)$$

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

Реактивна потужність в зазорі між садкою та індуктором, квар,

$$P_{pz} = 6,2 \cdot 10^{-9} H^2 f d_0 h_m \left[\left(\frac{D_3}{d_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (2.13)$$

Товщина стінки індуктора, мм.

За умови мінімальних втрат активної потужності в індукторі

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

Втрати активної потужності в індукторі, кВт,

$$P_{a1} = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 D_B h_i \sqrt{Q_i \mu_i f} \frac{A_i}{k_{a1}} \quad (2.15)$$

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 $\frac{D_B}{\Delta_{3u}}$ (рис. 2.2);

k_{a1} - коефіцієнт заповнення індуктора, що дорівнює 0,7+0,9.

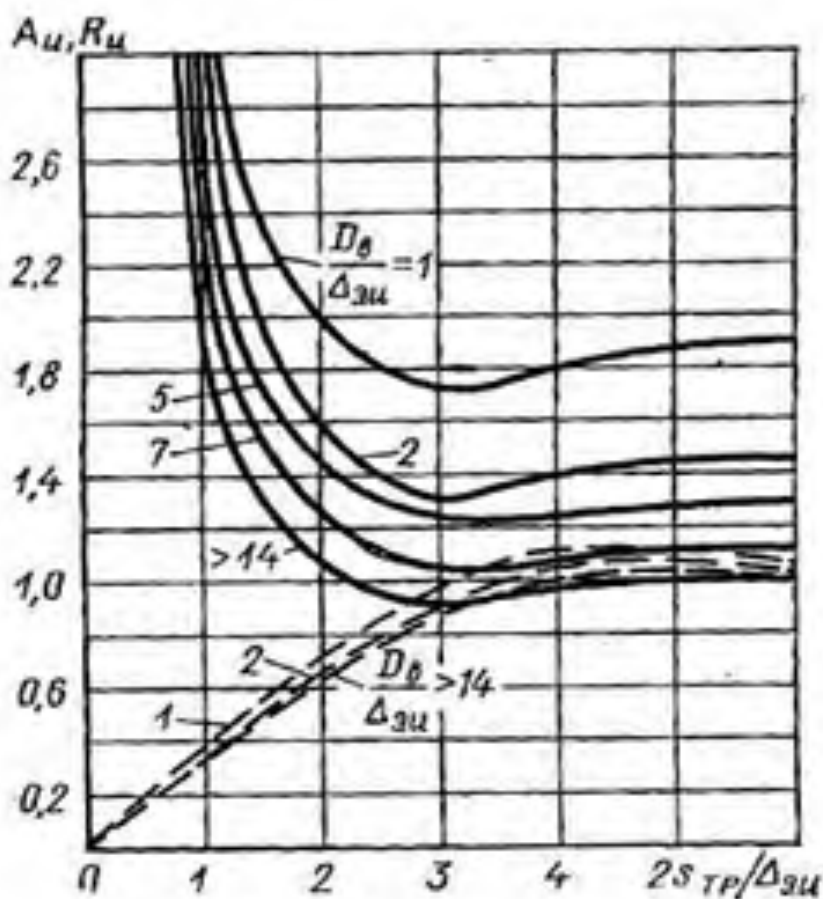


Рисунок 2.2 - Поправочний коефіцієнт активної потужності та реактивної потужності для індуктора

Реактивна потужність в індукторі, квар,

$$P_p = 6,2 \cdot 10^{-6} H^2 D_B h_i \sqrt{Q_i \mu_i f} \frac{R_i}{k_{a1}} \quad (2.16)$$

де R_i - поправочний коефіцієнт реактивної потужності, який враховує кривизну індуктора, визначають по штриховим лініям для різних $\frac{D_B}{\Delta_{3u}}$ (рис. 2.2)

Загальна активна потужність, кВт,

$$P_{a2} = P_a + P_{a1} \quad (2.17)$$

Загальна реактивна потужність, квар,

$$P_{\Sigma p} = P_{p.c} + P_{p.z} + P_{p.l} \quad (2.18)$$

Повна потужність системи індуктор – садка, кВ·А,

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

Струм в індукторі, А

$$I = 10^3 \frac{P_0}{U_1} \quad (2.20)$$

де U_1 - напруга на індукторі, В.

Кількість витків в індукторі

$$W = \frac{Mk_1}{J} \quad (2.21)$$

Крок витка індуктора

$$\tau = \frac{h_1}{W} \quad (2.22)$$

Висота трубки індуктора, м,

$$h_{тр} = \tau \cdot k_{\Delta 1} \quad (2.23)$$

Товщина ізоляції між витками, м,

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

Напруга струму між витками індуктора, В,

$$U_* = \frac{U_1}{W} \quad (2.25)$$

Напруга на 1см ізоляції між витками, В,

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

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 A/mm^2 .

Дійсний кут $\cos\varphi$ печі

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{заг}}}{P_0} \quad (2.27)$$

Ємність конденсаторної батареї, мкФ,

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

де U_k – напруга на конденсаторі, В.

Загальне січення магнітопроводів, см^2 ,

$$Q_{\text{мг}} = \frac{U_1}{4.44 f W B}, \quad (2.29)$$

де B – індукція в магнітопроводі, Вб/м^2 , 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 перетворювачі підвищеної частоти

Тип	Генератор			К. к. д. перетворювача, $\eta_{\text{пер}}$, %
	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
ВЕП-60-2400		60	800/400	75
ВЕП-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
ВЕП-60-8000		60	800/400	73
ВЕП-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	ємність, 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	Ємність печі											
			250 кг (для швидкорізної сталі)			250 кг (для вуглецевої сталі)			до 1000кг	1000кг	1400 кг			до 10000 кг
			T _{вх}	T _г	T _{вд}	T _{вх}	T _г	T _{вд}			T _{вх}	T _г	T _{вд}	
Прибуток (%)														
Тепло від електроенергії	-	-	100	83,3	95,7	100	79,2	93,5	-	100	98,1	93,6	97,5	-
Тепло від екоаермічних 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	22,8	35,4	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	0,663	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
Питома витрати електроенерг, кВт год/кг	-	-	-	-	0,685	-	-	0,895	-	0,800	-	-	0,750	-

2.2 Розрахунок електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі

Розглянемо методи розрахунку електромагнітних параметрів печі типу ІТП-4,5, що застосовується для виплавки легованої холодостійкої сталі 35ХМЛ. Зазвичай нормалізацію цієї сталі проводять при температурі 860–880 °С з наступним відпуском при температурах 600–650 °С для отримання твердості матеріалу в межах НВ 163–225. У відпаленому стані структура сталі 35ХМЛ є ферито-перлітною з деяким переважанням фериту.

В якості вихідних даних розрахунку враховували:

- властивості сталі 35ХМЛ;
- розміри шматків шихти;
- питомі електроопори шихти;
- вихідну температуру завантажуваної шихти, що завантажується;
- температуру плавлення і температуру розливання;
- ентальпію, теплоємність і приховану теплоту плавлення сплаву;
- параметри мережі живлення та інші.

Активна потужність P_2 , передана в завантаження (садку) індукційної тигельної печі визначається за формулою:

$$P_2 = P_{\text{кор}} + P_{\text{т}}, \text{ Вт.} \quad (2.31)$$

Сумарні теплові втрати $\Delta P_{\text{т}}$ становлять 5–35 % корисної потужності печі $P_{\text{кор}}$, де менша цифра відноситься до індукційних тигельних печей більшої ємності. Термічний коефіцієнт корисної дії ($\eta_{\text{т}}$) індукційної тигельної печі зазвичай становить 75–95 %.

Активна потужність печі $P_{\text{п}}$ орієнтовно визначається за формулою:

$$P_{\text{п}} = P_2 / \eta_{\text{е}}, \text{ Вт,} \quad (2.32)$$

де $\eta_{\text{е}}$ – електричний ККД індуктора індукційної тигельної печі.

Значення η_e може бути 75–95 %. Значення ККД тим вище, чим більший питомий опір металу або сплаву, що розплавляється. Термічний ККД індукційної тигельної печі знаходимо за формулою:

$$\eta_T = P_{\text{кор}}/P_2, \text{ Вт}, \quad (2.33)$$

Потужність джерела живлення $P_{\text{дж}}$ повинна бути на 5–10 % більшою за активну потужності $P_{\text{п}}$. Це пов'язано з тим, що джерело живлення має покривати втрати $\Delta P_{\text{т.кв}}$ струмопідводі і в конденсаторах. Потужність джерела живлення з урахуванням втрат в струмопідводі і в конденсаторній батареї визначається за формулою:

$$P_{\text{дж}} = P_{\text{п}} + P_{\text{т.к.}} \quad (2.34)$$

Приймаємо потужність втрат $\Delta P_{\text{т.к}} = 141,23$ кВт (9,36 % від активної потужності печі). Розрахуємо частоту джерела живлення і виберемо джерело живлення індукційної тигельної печі. Враховуючи, що при нагріванні сталі змінюються її питомий опір і магнітна проникність, за вихідне значення магнітної проникності приймаємо 16, що пояснюється застосуванням при індукційному нагріванні вельми сильних магнітних полів.

Вибираємо частоту і потужність джерела живлення з урахуванням розмірів кускової шихти $d_{\text{ш}} = 0,03\text{--}0,07$ м. Одержану залежність частоти від розмірів кускової шихти можна представити рівнянням поліному третього ступеня з перевіркою величини достовірності апроксимації R , яке вказане на рис. 2.1. Залежність показує, що для нагріву кускової шихти з середнім розміром близько 5 см, необхідна частота генератора не менше 1000 Гц.

З підвищенням частоти струму f від 300 до 1000 Гц повна потужність S системи індуктор-метал зростає від 17890 до 30800 кВт·А, а сила струму I в індукторі підвищується від 11930 до 20530 А відповідно (рис. 2.3).

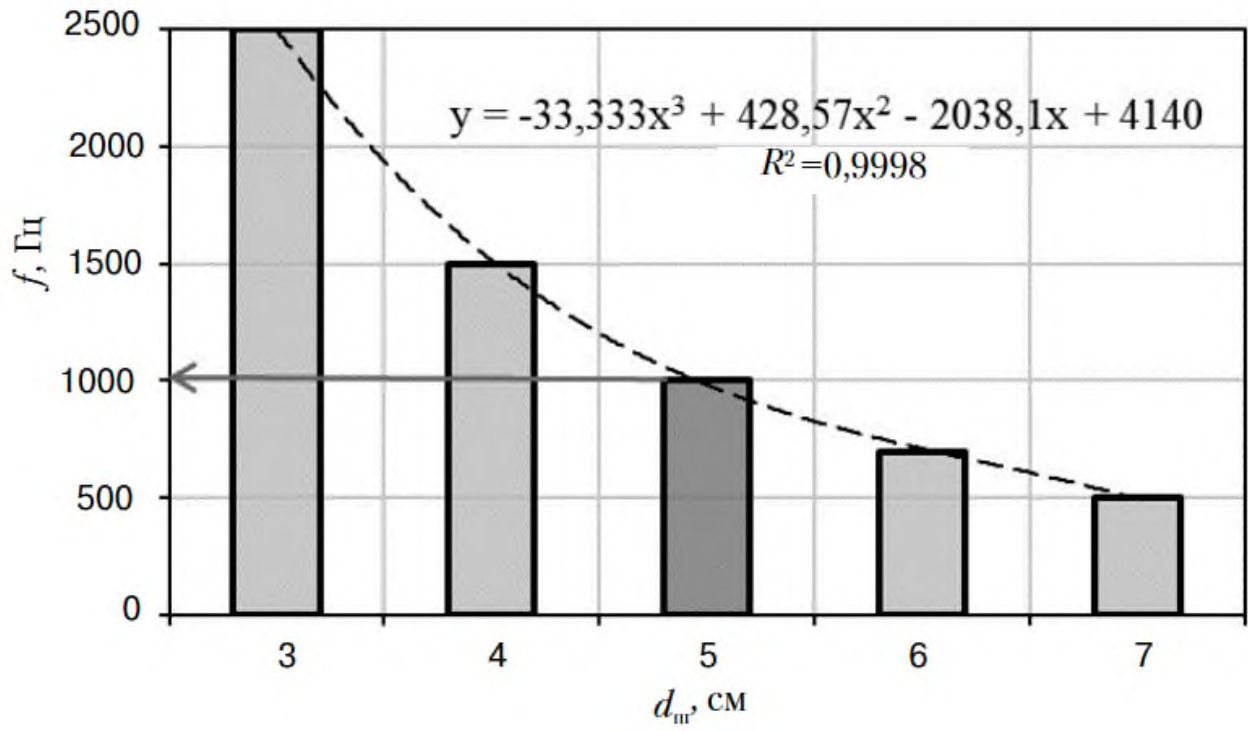


Рисунок 2.1 – Визначення зміни частоти (f) генератора від розмірів кускової шихти ($d_{ш}$)

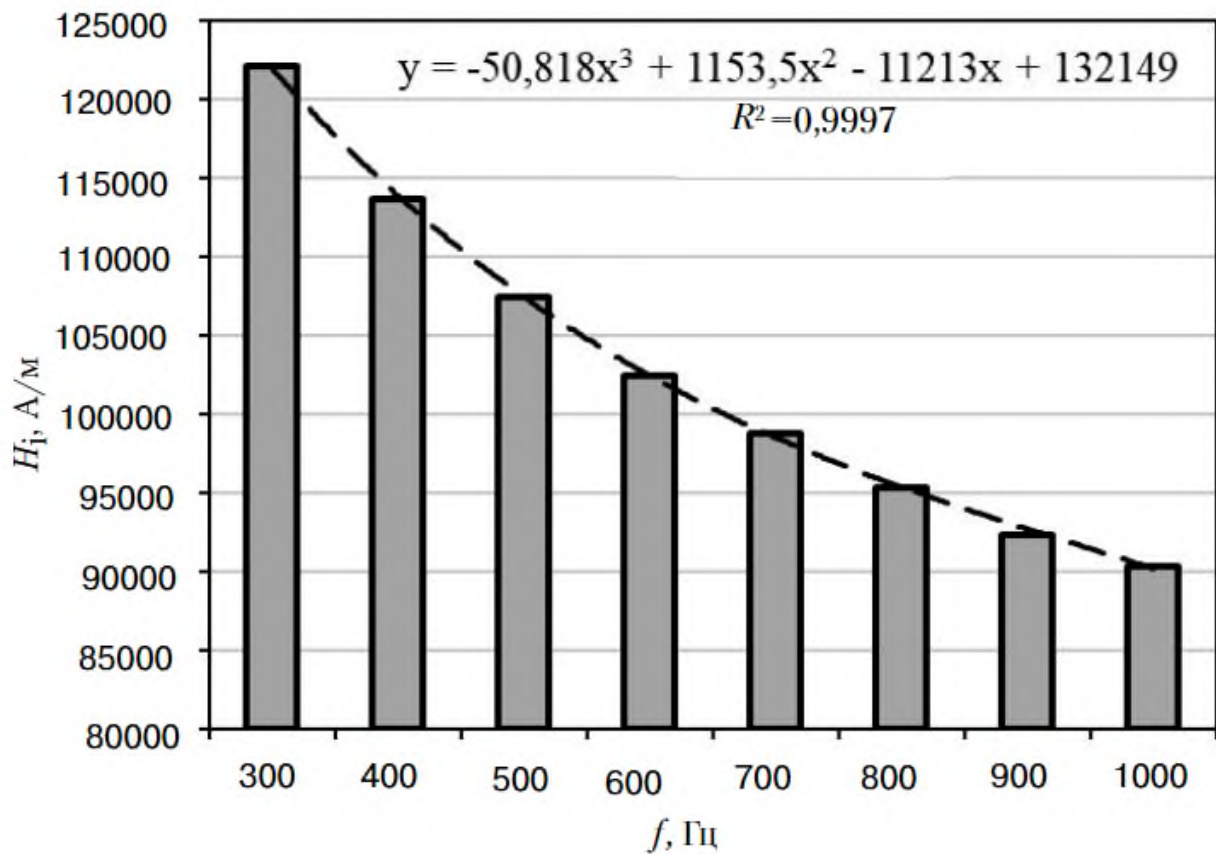
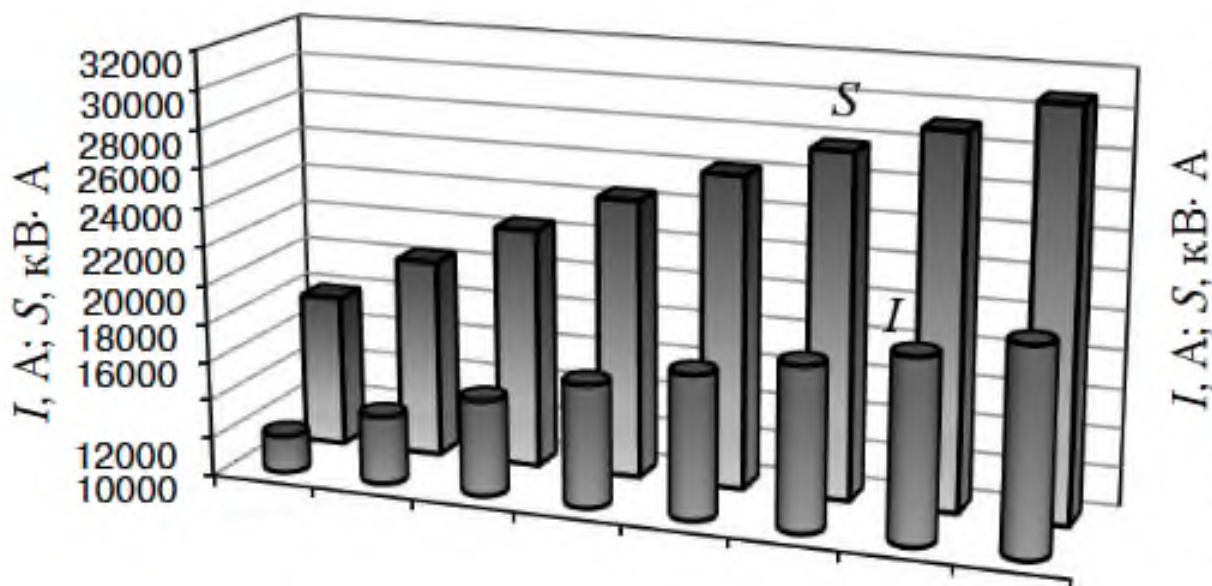
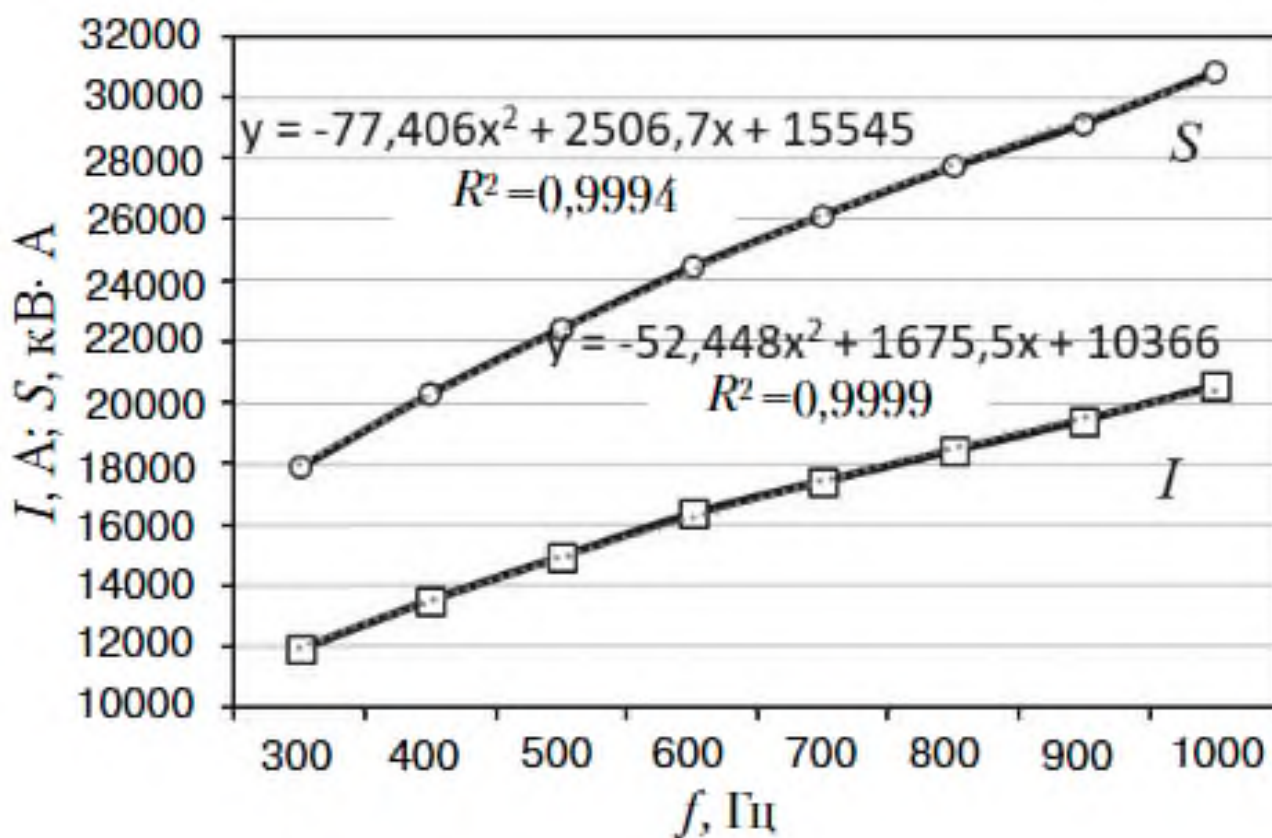


Рисунок 2.2 – Визначення настилу струму (H_i) від частоти (f) генератора



а



б

а – гістограми зміни S і I; б – отримані рівняння залежностей зміни S(f) та I(f)

Рисунок 2.3 – Зміни повної потужності (S) системи «індуктор-метал» і сили струму (I) в індукторі від частоти струму (f)

Число витків індуктора від частоти генератора змінюється за рівнянням поліному третього ступеня (рис. 2.4). Причому, одержані залежності можна використовувати як номограми для визначення необхідних показників шихти, індуктора або частоти установки, що може мати практичне значення на виробництві для прискорення і поліпшення якості процесу виплавки потрібного сплаву.

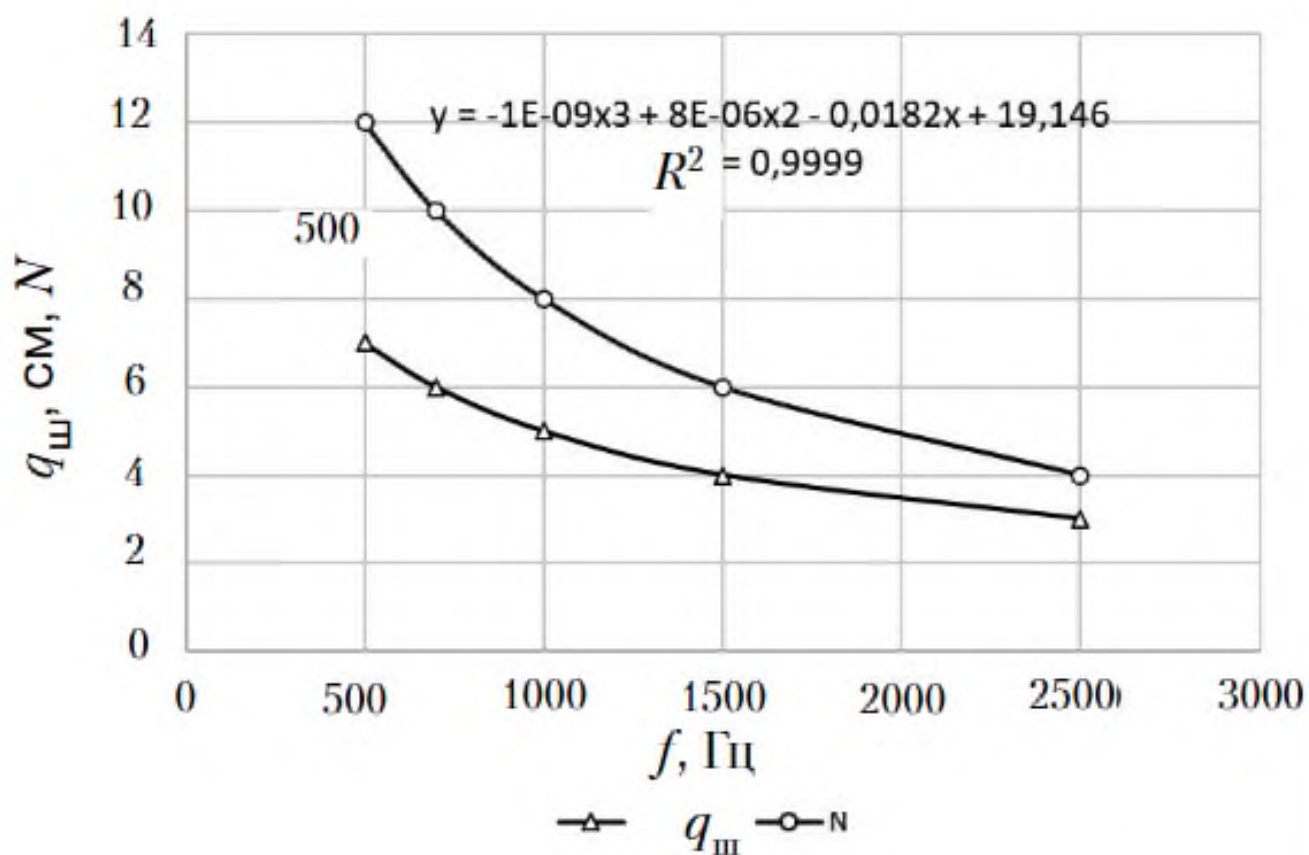


Рисунок 2.4 – Залежність розмірів кускової шихти ($d_{ш}$) і числа витків індуктора (N) від частоти (f)

Таким чином, отримано рівняння залежностей настилу струму, потужності системи «індуктор-метал», сили струму від частоти методом апроксимації поліномом другого і третього ступеней в інтервалі частот генератора від 300 до 1000 Гц з перевіркою адекватності моделі за коефіцієнтом кореляції. Отримані залежності можна використовувати як номограми для визначення необхідних електромагнітних параметрів печі, показників шихти

сталі марки 35ХМЛ, індуктора або частоти установки, що може мати практичне значення на виробництві для прискорення і поліпшення якості процесу виплавки потрібного сплаву.

3 ОГЛЯД СВІТОВИХ ЛІДЕРІВ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ІНДУКЦІЙНИХ ПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Одними зі світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей є ОТТО JUNKER (Німеччина), Inductotherm Europe Ltd. (Англія), Fomet Srl. (Італія), Calamari SpA (Італія), Zakłady Urządzeń Przemysłowych ZAM Kęty Sp. z o.o. (Польща), Inductotherm Corp (США), Flagma (Китай) та інші.

Компанія ОТТО JUNKER (рис. 3.1) виробляє печі середньої частоти для плавки:

- сірого чавуну та сталі (ємність тиглю: від 500 до 25.000 кг; потужність, макс.: від 500 до 20000 кВт; продуктивність, макс.: від 950 до 40.000 кг/год.);
- важких металів (ємність тигля: від 600 до 30.000 кг; потужність, макс.: від 400 до 6000 кВт; продуктивність, макс.: від 1.000 до 15.400 кг/год.);
- легких металів (ємність тигля: від 200 до 9.000 кг; потужність, макс.: від 150 до 4500 кВт; продуктивність, макс.: від 300 до 8.800 кг/год.);
- каналні індукційні печі.

Inductotherm Europe Ltd. (рис. 3.2) виробляє:

- індукційні печі в сталевому міцному корпусі (ємність від 0,35 до 80 т);
- індукційні печі зі сталеву рамою (ємність від 4 до 60 т);
- невеликі індукційні печі у сталевому корпусі (ємність від 0,025 до 3 т);
- підйомно-поворотні індукційні печі (ємність від 50 до 350 кг для мідних сплавів; від 20 до 100 кг для алюмінієвих сплавів).

Inductotherm Corp, дочірною компанією якої є Inductotherm Europe Ltd., виробляє печі (рис. 3.3 та 3.4) з важким сталевим корпусом та піч зі сталевим каркасом. Кожна піч Inductotherm розрахована на структурну міцність за допомогою спеціального комп'ютерного програмного забезпечення. Використовуючи інформацію про конкретну програму, інженери Inductotherm будуть використовувати цю інформацію, щоб передбачити, як піч буде працювати, перш ніж вона буде запущена у виробництво.



1 – піч; 2 - витяжний ковпак; 3 – система зважування; 4 – захист ями; 5 – гідравлічна силова установка; 6 – панель керування оператора; 7 – перетворювач частоти (DUOMELT); 8 – модуль конденсаторів; 9 – трансформатор; 10 – система водяного охолодження; 11 – повітряний охолоджувач; 12 – завантажувальний пристрій; 13 – система знепилювання; 14 – аварійна накопичувальна яма

Рисунок 3.1 – Індукційна плавильна піч OTTO JUNKER (Німеччина)



Рисунок 3.2 – Індукційна плавильна піч Inductotherm Europe Ltd. (Англія)

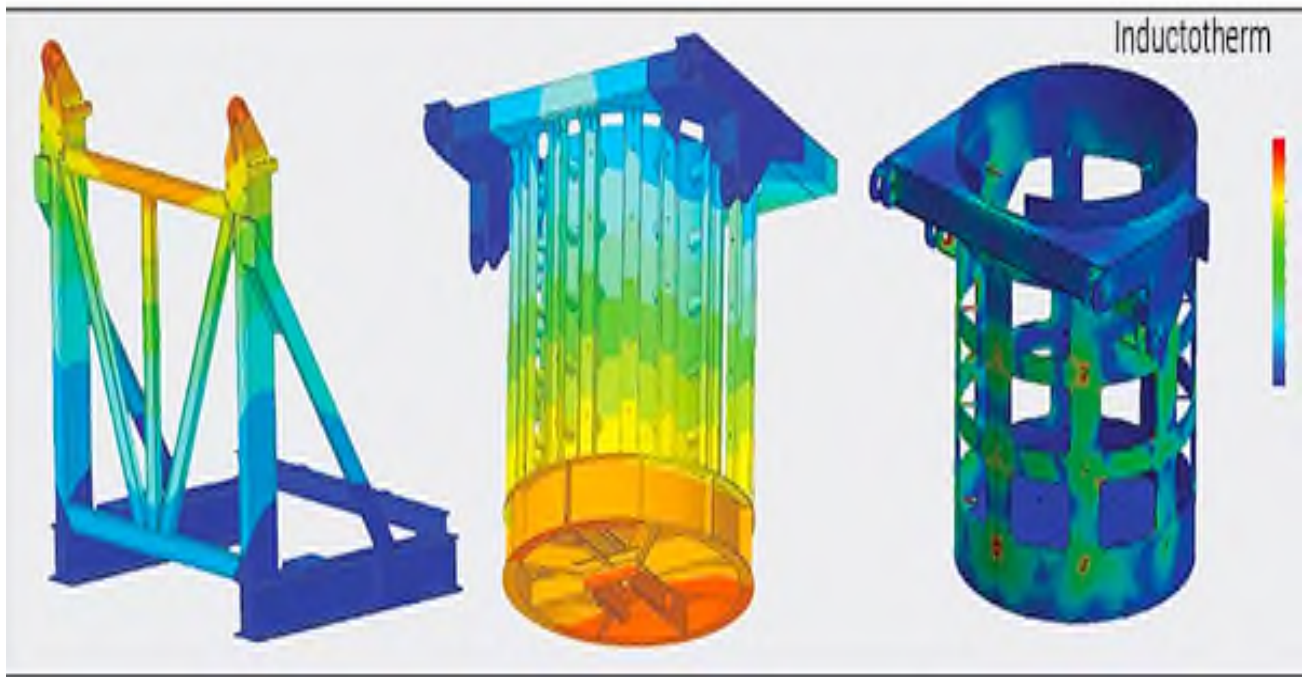


Рисунок 3.3 – Комп'ютерне проектування печі Inductotherm Corp (США)

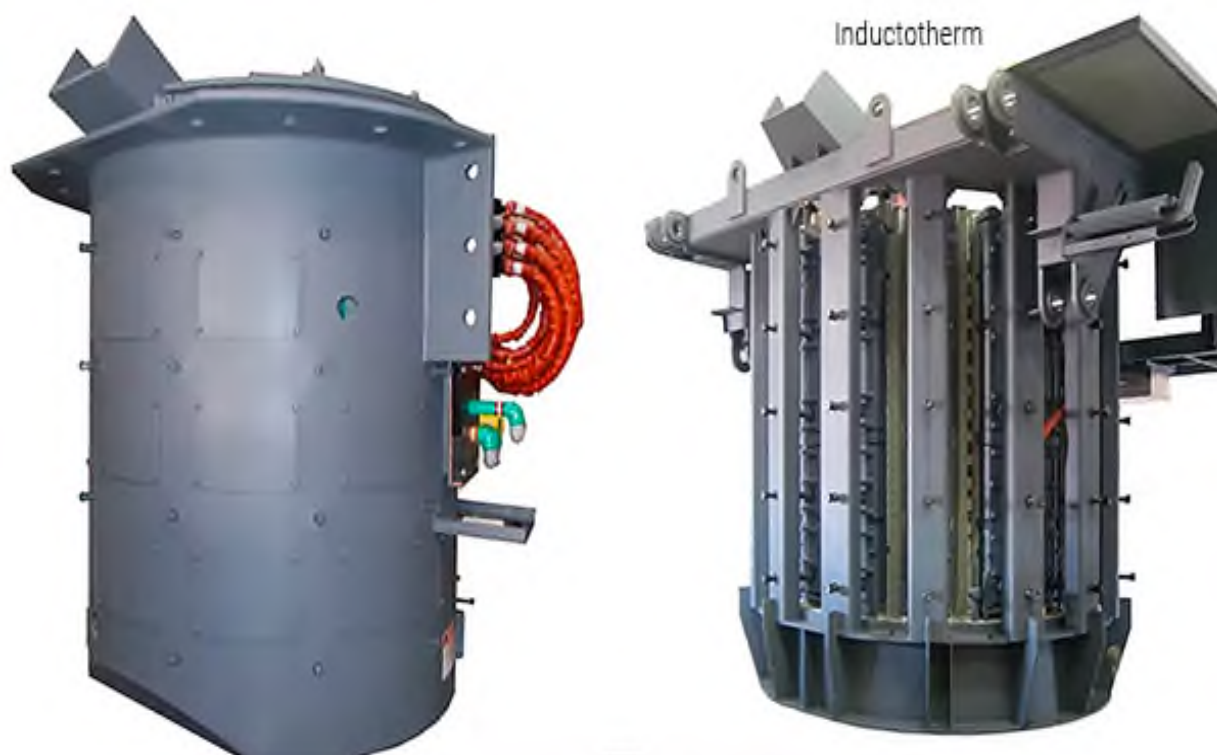


Рисунок 3.4 – Піч з важким сталевим корпусом та піч зі сталевим каркасом компанії Inductotherm Corp

Flagma (рис. 3.5) виробляє печі індукційні плавильні на гідравліці типу GW-2T-1200KW/1S. В основному їх застосовують для виплавки сталі, міді та алюмінію.

Їх ємність складає 1 т. Кількість тиглів дорівнює 2 штуки. Номінальна потужність 1200 кВт. Номінальна температура 1650 °С.

Індукційні тигельні печі 5M INDUCTION SYSTEMS (рис. 3.6) виробляють потужністю від 1 до 12000 кВт, при цьому ємністю тигля від 1 до 25000 кг.

Індукційна канална піч зображена на рис. 3.7.



Рисунок 3.5 – Індукційні плавильні печі на гідравліці типу печі GW-2T-1200KW/1S (Китай)



Рисунок 3.6 – Індукційна тигельна піч 5M INDUCTION SYSTEMS (Туреччина)





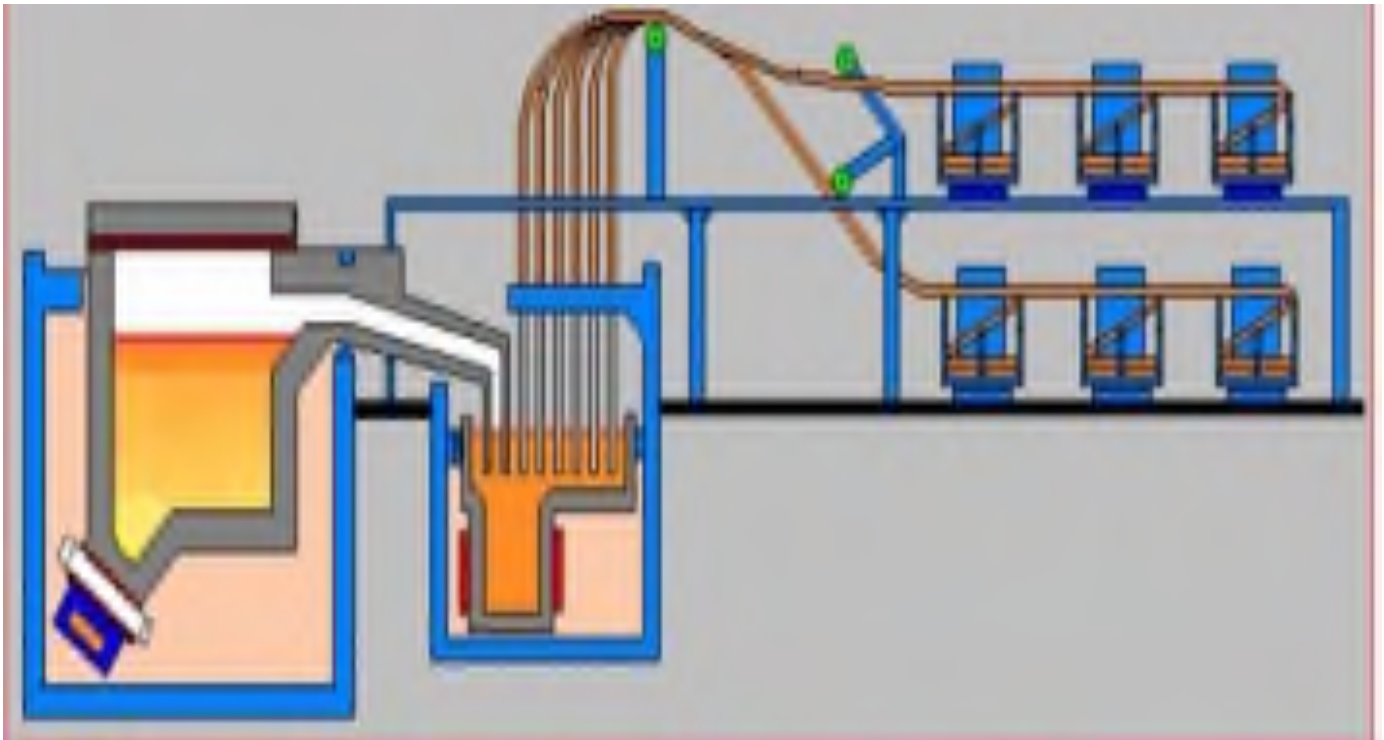


Рисунок 2.7 – Індукційна канална піч

4 ВАКУУМНІ ІНДУКЦІЙНІ ПЕЧІ: ВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ПЛАВКИ

Плавка у вакуумних індукційних печах дозволяє отримувати сталь і сплави з малим вмістом газів, неметалічних включень і домішок кольорових металів, легувати сплав будь-якими елементами, у тому числі такими, що володіють високою спорідненістю до кисню без їхніх втрат на окислювання.

Переваги вакуумної індукційної плавки обумовлені наявністю вакууму, що забезпечує рафінування від ряду домішок і розкислення вуглецем, а також відсутністю контакту металу з окисною атмосферою. В таких печах виплавляють сталь і сплави, що містять знижені кількості азоту, домішок кольорових металів, кисню й неметалевих включень, майже не містять водню. Відсутність контакту з киснем атмосфери дозволяє виплавляти сталі й сплави, що містять елементи, що легко окислюються, без їхнього вигару.

Недоліком вакуумних індукційних печей є те, що при тривалій витримці в результаті реагування з окислами футерівки метал забруднюється киснем і неметалічними вміканнями, а також відновлюваними з футерівки елементами (кремнієм, алюмінієм та інші).

Індукційні вакуумні печі відрізняються великою розмаїтістю конструкцій і параметрів. За призначенням вакуумні індукційні печі підрозділяються на три групи:

- лабораторні печі;
- печі для виробництва зливків;
- печі для фасонного лиття.

За конструкцією вакуумні індукційні печі підрозділяються на:

- печі з індуктором, розташованим в середині вакуумної камери;
- печі з індуктором, винесеним за межі вакуумного простору.

За характером виконання вакуумної камери (корпуса печі) підрозділяються на:

- печі з вертикальною віссю камери;

- печі з горизонтальною віссю камери;
- печі з відкатною камерою.

За організацією процесу плавки підрозділяються на:

- печі періодичної дії;
- печі напівбезперервної дії.

Печі напівбезперервної дії мають ряд переваг у порівнянні з печами періодичної дії:

- відпадає необхідність відкачки печі перед початком кожної плавки, що підвищує продуктивність установки;
- виключаються втрати часу на остигання виливниць або форм перед витяганням їх з камери;
- зменшується окислювання металу і його забруднення через напуск у піч атмосферного повітря;
- поліпшуються умови роботи футерівки тигля, тому що немає тривалих і різких коливань температури під час охолодження печі.

Всі індукційні вакуумні печі включають до складу наступні основні елементи:

- індуктор;
- плавильний тигель;
- вакуумну камеру;
- форму (виливницю).

У високотемпературних вакуумних індукційних печах (рис. 4.1) нагрівання матеріалу в тиглі до необхідної температури відбувається за рахунок теплопередачі. Графіт використовується для можливості отримання високої температури в тиглі через його термічну стійкість. Основне застосування цієї серії печей - спікання карбиду кремнію. Температура спікання до 2500 °С.

Вакуумна індукційна піч з спікання з нижнім завантаженням (рис. 4.2) застосовується для високотемпературного спікання різних матеріалів у вакуумі чи атмосфері інертних газів. Оброблювані матеріали - сплави на основі W-Cu, сплави для постійних магнітів на основі Ni-Co, Nd-Fe-B, композиційні



Рисунок 4.1 – Високотемпературна вакуумна індукційна піч



Рисунок 4.2 – Вакуумна індукційна піч з спікання з нижнім завантаженням

вуглецеві матеріали, вироби з карбїду кремнію, вольфраму, молїбдену. Максимальна температура спікання до 2550 °С.

Вакуумні індукційні плавильні печі періодичної дії (рис. 4.3) використовується для виробництва спеціальних сплавів та сплавів на основі нікелю, прецизійних сплавів, сплавів Nd-Fe-B, хїмічно активних металів, жаромїцних сплавів, сплавів акумуляторів водню, магнітних матеріалів, для досліджень та виробництва кольорових металів та їх сплавів. Можливі варіанти конструкцій з вертикальним та горизонтальним завантаженням. Установки складаються з : вакуумної камери, плавильної системи, пристрої передачі ливарних форм, вакуумної системи, трансформатора, системи автоматичного керування, оглядового вікна багатопозиційного, системи охолодження води, платформи оператора та інші. Із застосуванням сучасних вимірювальних приладів, термопар, датчиків вакууму, систем автоматичного підстроювання частоти, систем управління на базі логїчних контролерів стає можливим забезпечити безпечну роботу обладнання, подаючи звукову та світлову сигналізацію при перегріві та падінні вакууму, коливаннях напруги та запобігаючи помилкам оператора активними блокуваннями. У складі вакуумної системи застосовуються ефективні малошумні вакуумні насоси з низьким споживанням енергії та високою продуктивністю.

Індуктор вакуумної індукційної плавильної печі періодичної дії виготовляється з матеріалу, що пройшов спеціальну обробку з високими характеристиками міцності, низькою реактивною потужністю. та високою енергоефективністю. Шляхом застосування крокових двигунів стає можливим робити розлив у кілька різних форм за один цикл.

Цї вакуумні індукційні печі плавильні прості в управлінні, виконані у вигляді моноблочної конструкції. Завантаження/вивантаження ливарних форм здійснюється збоку через камеру завантаження під вакуумом, є можливість підігріву форм. У процесі плавки можна брати проби металу на хїмічний аналіз, проводити легування, продувати розплав аргоном знизу і киснем зверху, проводити вакуумну дегазацію і очищення розплаву.



Рисунок 4.3 – Вакуумна індукційна піч періодичної дії

Вакуумні індукційні плавильні печі безперервної розливки (рис. 4.4) мають вертикальне компонування.



Рисунок 4.4 – Вакуумна індукційна піч безперервної розливки

Конструктивно ці вакуумні печі складаються з наступних компонентів: камери вакуумної плавки, камери охолодження, системи вимірювання температури розплаву, завантажувального пристрою, вакуумної системи, трансформатора, системи автоматичного керування, системи плавлення, системи охолодження, платформи оператора та інші. Плавильна камера, завантажувальна камера та холодильна камера розділені між собою вакуумними затворами, які дозволяють без розриву вакууму забезпечувати завантаження форм у плавильну камеру, проводити легування розплаву та здійснювати вивантаження зливоків. Це дає можливість безперервної роботи та підвищує продуктивність. У той же час, у цих вакуумних індукційних плавильних печах можна проводити розлив розплаву відразу в кілька форм за один цикл. Завантажувальна камера та система вимірювання температури адаптовані до можливості повністю автоматизувати роботу. Дані установки призначені в основному для точного лиття матеріалів та сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту, жароміцних та жаростійких сплавів, магнітних матеріалів та інші.

Вакуумні індукційні печі з графітовим тиглем (рис. 4.5) працюють на основі нагрівання виробів струмами високої частоти в умовах вакууму або інертного газу. Струми, що протікають у багатовитковому індукторі, генерують навколо нього змінне магнітне поле.

Змінне магнітне поле, у свою чергу, генерує вихрові струми у графітовому тиглі. Нагрівання матеріалу в тиглі до необхідної температури відбувається за рахунок теплопередачі. Графіт використовується для можливості отримання високої температури в тиглі через його термічну стійкість.

Особливості вакуумних індукційних печей з графітовим тиглем :

– високий рівень автоматизації. Процес може бути повністю автоматизований з відображенням робочих елементів печі на дисплеї і поточних параметрів процесу обробки. Вакуумна індукційна піч з графітовим тиглем оснащується логічним контролером, що програмується, а також має



Рисунок 4.5 – Вакуумна індукційна піч з графітовим тиглем

засоби людино-машинного інтерфейсу;

- безпека роботи обладнання, подача звукової та світлової сигналізації при перегріві, виході з ладу датчиків та термопар, контроль підвищення тиску в печі та вакуумі, температури та витрати води;

- для підвищення ефективності роботи печі виготовляються із внутрішньою чи зовнішньою незалежною системою охолодження;

- сучасні прилади контролю температури, вакуумних датчиків та компонентів вакуумної системи забезпечують надійність роботи всього обладнання.

Вакуумна індукційна піч для відливу ювелірних виробів SPB-MVC150 (рис. 4.6) – це ефективна компактна стаціонарна програмована вакуумна індукційна машина циклічної дії, призначена для експлуатації в умовах невеликих майстерень зі сфери виробництва ювелірних виробів та стоматологічних протезів.

Модель є основним обладнанням з комплексу, який також включаються ваги, міксер, піч для сушіння і камера очищення. Функція виробу тут є основною, і полягає безпосередньо у вилівку у формах геометрично складних ювелірних виробів (кільця, сережки, кулони). Конструктивно виріб поєднує двокамерну систему з похилим механізмом (операція заливки матриці досягається шляхом повороту камери пристрою плавлення на 90°). Цей етап циклу виконується автоматично за готовністю розплаву. Окислення виробу перешкоджає те, що операція плавлення виконується у вакуумі та під тиском газу (аргон). Ця технологія дозволяє досягти високої щільності та консистенції товару, практично повністю виключає пористість, запобігає усадці. Наявність вбудованого вакуумного насоса дозволяє заощаджувати простір. Для прискореного досягнення температури плавлення діє індукційний генератор потужністю 4,5 кВт.

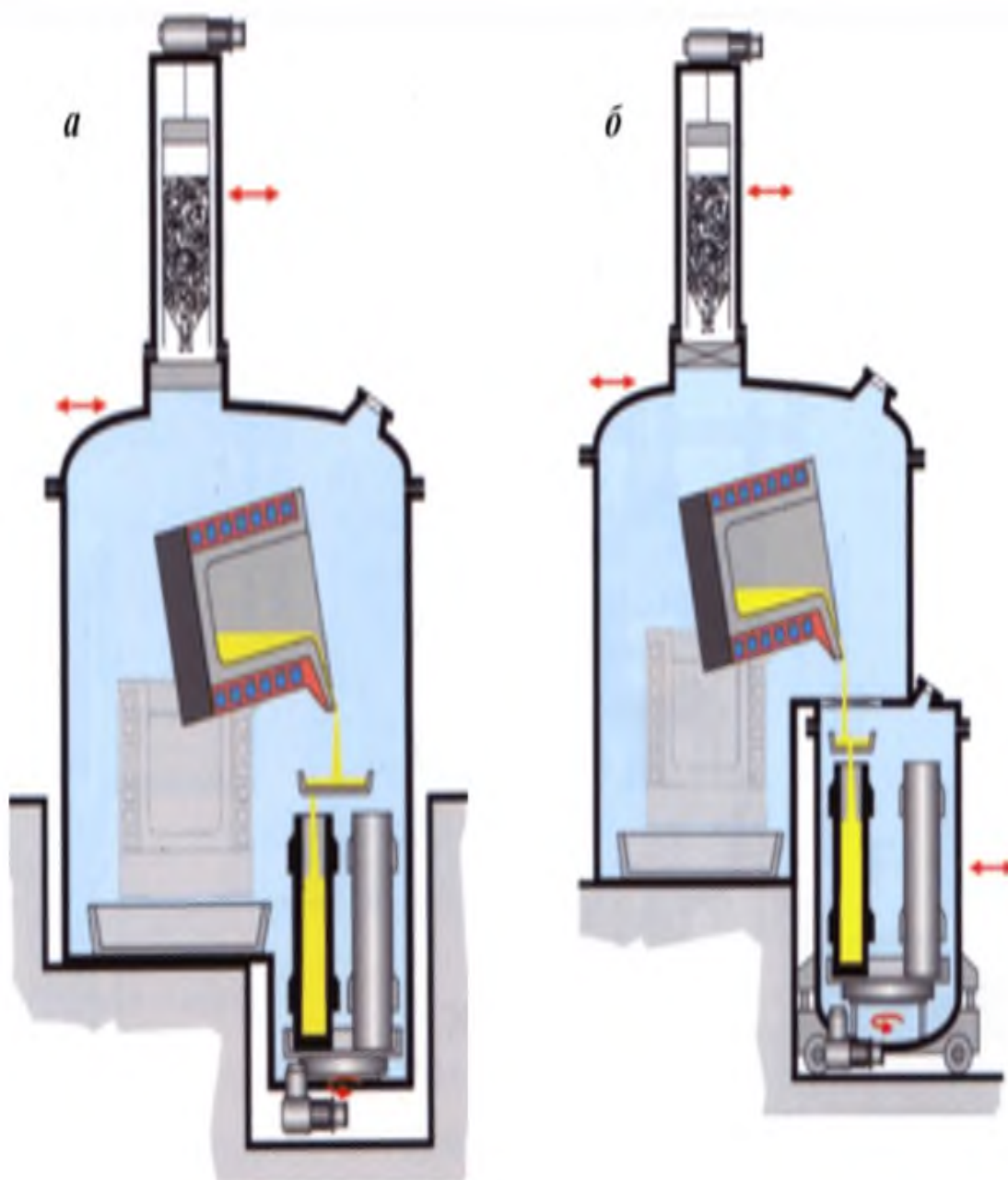
Індукційна вакуумна плавка в печах камерного типу представлена на рис. 4.7.

Вакуумно-індукційна дистиляція та вакуумно-індукційна дистиляція

представлені на рис. 4.8.

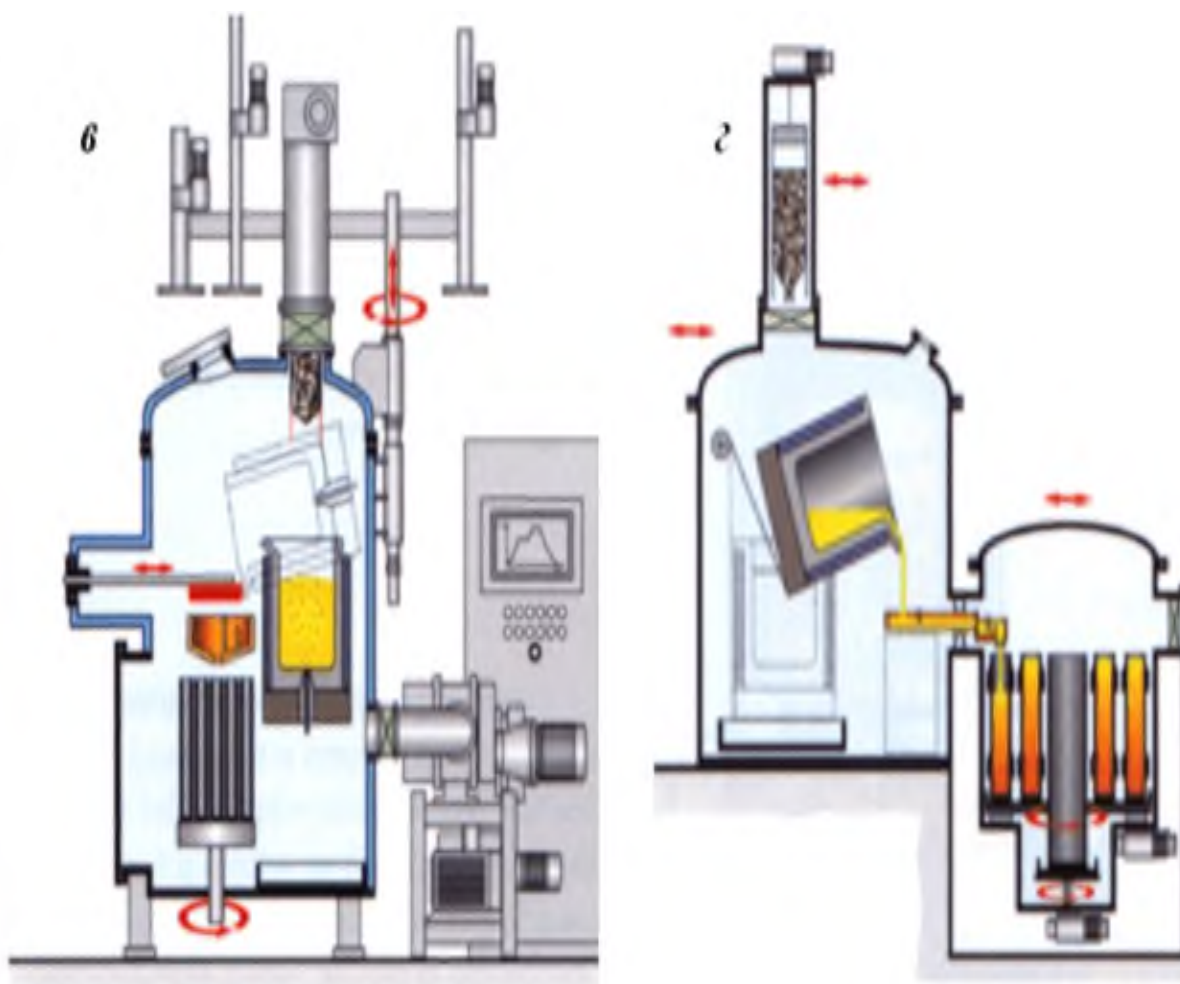


Рисунок 4.6 – Вакуумна індукційна піч для відливу ювелірних виробів SPB-MVC150



а – однокамерна (VIM). Типове завантаження 0,5–15 т; система одиночної камери з вертикальною плавильною камерою; б – з пересувною камерою (VIM-MS movable mold chamber). Типове завантаження 0,5–15 т; двокамерна система з окремою пересувною камерою-шлюзом для виливниць

Рисунок 4.7 а – Індукційна вакуумна плавка в печах камерного типу



в – з донною продувкою (VIM-BP bottom purging). Піч з метою обробки розплаву газами оснащена попередньо підігрітим тандішем і тиглем для донної продувки газом; г – з лотковою системою (VIM-LS launder system). Двокамерна система з однією камерою і поворотним столом для коротких і довгих зливків. Змінний лоток, що підігрівається, для розливки розплаву

Рисунок 4.7 б – Індукційна вакуумна плавка в печах камерного типу

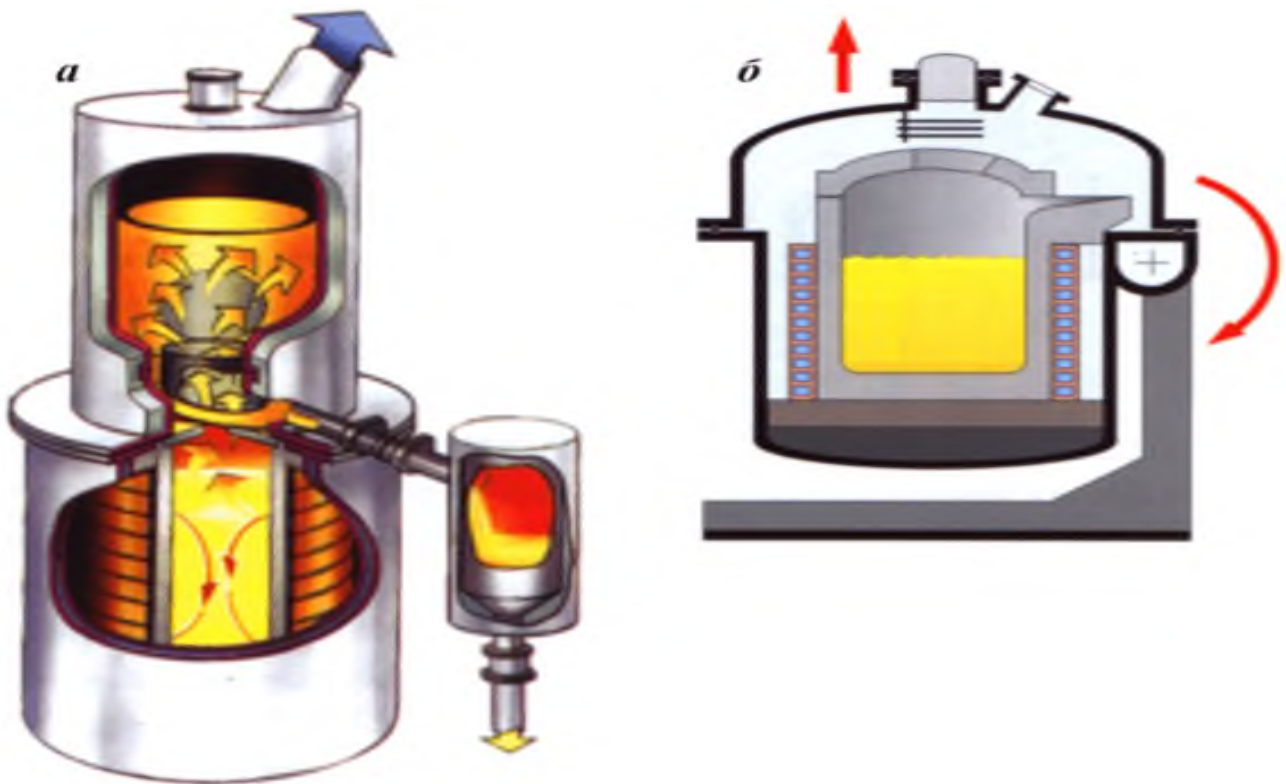


Рисунок 4.8 – Вакуумно-індукційна дистиляція (а) та вакуумно-індукційна дестилляція (б)

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

5.1 Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих факторів електросталеплавильного виробництва

До небезпечних факторів при експлуатації електросталеплавильних печей (дугових сталеплавильних, індукційних та інших) відносяться:

- поразка електричним струмом,
- викиди рідкого металу і
- викиди шлаків та інші.

Шкідливими виробничими факторами при експлуатації електросталеплавильних печей (дугових сталеплавильних, індукційних та інших) є :

- підвищена запиленість,
- загазованість (до $120 \text{ мг/м}^3 \text{ CO}$),
- підвищений рівень шуму (до 120 дБ),
- підвищена температура повітря (до 30°C) внаслідок значних виділень тепла (до $1000 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{год}$),
- ультразвук (використовують при обробці розплаву сталі, виплавленого в електропечі).

Данні інтенсивності теплового потоку біля робочих місць приведені в табл. 5.1.

Електросталеплавильні печі є великими споживачами електроенергії і джерелами електромагнітних випромінювань. Відомо, що питома витрата електроенергії індукційних печей української металургійної галузі становить $542 \text{ кВт} \cdot \text{год./т}$ сталі, а в порівнянні з закордоном – від 390 до $450 \text{ кВт} \cdot \text{год./т}$ сталі. Тому задача зниження витрати електроспоживання залишається на перспективу.

Основними екологічними вадами є шкідливий вплив магнітних полів на організм людини. У печей підвищеної частоти цей вплив вищий, ніж печей

середньої частоти. Основною складовою пилю при плавці в індукційних печах є оксиди заліза (60 %), решта – оксиди кремнію, магнію, цинку, алюмінію у різному співвідношенні залежно від хімічного складу металу та шлаку. Частки пилю, що виділяються при плавці чавуну в індукційних печах, мають дисперсність 5–100 мкм (мікрометрів). Кількість газів та пилю в 5–6 разів менша, ніж при плавці в дугових сталеплавильних печах.

Пожежна небезпека виробництва визначається наявністю в агрегатах горючих газів, застосуванням кисню, наявністю кабельного господарства, масляних трансформаторів, застосуванням горючих рідин.

Таблиця 5.1 – Інтенсивності теплового потоку біля робочих місць електроплавильних печей

Робоча операція	Ємкість печі, т	Опромінення, кВт/м ²
Огляд подини і заправка печі перед завантаженням лому	<10	1,05–11,2
	10–25	1,04–4,9
	40	2,1–7,0
	100 ¹	2,8–14
	100 ²	0,35–3,5
	200 ¹	1,05–7,0
	200 ²	0,35–3,5
Підсіпка порогів, завантаження добавок, спостереження за плавкою після завантаження лому	<10	0,7–4,2
	10–25	0,35–5,6
	40	1,4–9,8
	100 ¹	0,7–10,5
	100 ²	0,01–3,5
	200 ¹	0,35–5,6
	200 ²	0,01–1,05
Продувка киснем, вимір температури і взяття проби	10–25 ³	1,4–7
	10–25 ⁴	6,3–9,1
	40 ³	1,4–7,0
	40 ⁴	7,0–10,5
	100 ³	0,35–7,0
	100 ⁴	6,3–12,6
	200 ³	0,18–5,6
	200 ⁴	6,3–12,6

Робоча операція	Ємкість печі, т	Опромінення, кВт/м ²
Скачування шлаку	40 ⁵	2,1–7,0
	40 ⁶	7,7–12,6
	100 ⁵	0,7–7,7
	100 ⁶	3,5–14,0
	200 ⁵	2,1–7,0
	200 ⁶	3,5–14,0
Оброблення і закладення сталевипускного отвору	<10	0,35–1,4
	10–25	0,35–3,5
	40	0,18–3,5
	100	0,35–7,0
	200	0,35–5,6
Спостереження за випуском сталі	<10	1,05–3,5
	10–25	1,05–4,9
	40	0,35–2,1
	100	0,35–6,3
	200	0,35–4,2
Вимір температури сталі в ковші	<10	0,7–3,5
	10–25	0,7–7,0
	40	5,6–7,0
	100	4,2–7,0
	200	2,8–7,0

Велику пожежну небезпеку представляють екзотермічні суміші, які використовуються при виплавці якісних сталей. До газонебезпечних відносяться роботи, що виконуються в місцях із загазованою атмосферою, і роботи, при виконанні яких можливе виділення отруйних або вибухонебезпечних газів, які викликають отруєння працівників або руйнівні вибухи, а також пожежі.

5.2 Охорона праці та техногенна безпека металургійного підприємства

Техногенна безпека характеризує стан захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Забезпечення техногенної безпеки є особливою (специфічною) функцією захисту населення і територій від

надзвичайних ситуацій.

Прогнозування, попередження і ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій є актуальною проблемою для металургійного виробництва. У разі аварії на металургійному виробництві виявляється дія, як правило, цілого комплексу чинників, оскільки кожний з них ініціює виникнення безлічі інших, нових і небезпечних ситуацій.

Для збереження техногенної безпеки в умовах металургійного виробництва фахівцям пропонуються такі заходи:

виявлення всіх чинників ризику техногенного характеру, включаючи виявлення небезпеки продукції, що випускається, технологічних процесів, операцій, виробничих об'єктів і об'єктів життєзабезпечення населення на даній території;

· встановлення міри небезпеки об'єктів на основі комплексних методів оцінки з обліком пожежної та вибухової безпеки, електробезпеки, надійності ємностей і судин, що знаходяться під тиском і т.д., а також реальними гідрогеологічними, територіальними і кліматичними умовами, виявлення найбільш небезпечних вузлів і об'єктів, здатних в екстремальних умовах викликати ланцюгову реакцію і найбільш руйнівні наслідки;

– розробка профілактичних заходів з метою стійкої й безаварійної роботи підприємств і збереження екологічної рівноваги, в тому числі:

– розробка прогнозу наслідків катастроф, розмірів утрат і збитку у всіх виявах цієї проблеми;

– розробка технічних і організаційних способів зниження збитків людським, матеріальним і природним ресурсам уразі їх виникнення;

– розробка термінових заходів по захисту від можливих диверсій, включаючи напади й загрози тероризму, особливо на ядерних і хімічних підприємствах, а також об'єктах життєзабезпечення населення;

– розробка заходів по ліквідації наслідків і відновленню нормального режиму роботи підприємств і адміністративно-територіальних освіт загалом;

– розробка методів і способів техногенного характеру щодо попередження аварій, які супроводжуються загибеллю людей, виходом із ладу обладнання, забрудненням навколишнього середовища шкідливими викидами та інші.

З точки зору охорони праці та техногенної безпеки умови праці в електросталеплавильному цеху металургійного підприємства повинні відповідати наступним нормативним документам:

– ДСТУ prEN 12937-2002. Безпечність машин. Технічні правила та вимоги до підйимально-транспортних засобів (prEN 12937:1997, IDT);

– ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою;

– НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні;

– ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги;

– ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення;

– ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги;

– ДСТУ Б EN 15242:2015. Вентиляція будівель. Розрахункові методи визначення витрат повітря на вентиляцію будівель з урахуванням інфільтрації (EN 15242:2007, IDT);

– ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; прийнятий з 01.12.1999 р. №42. Київ, 12 с.;

– та інші.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Поряд із меншими капітальними вкладеннями, зниженим рівнем викидів та зручністю для нестабільних електричних мереж, використання індукційних печей (в порівнянні з дуговими сталеплавильними печами) для виплавки сталі забезпечує кращий контроль температури та менші втрати металу. Індукційна плавка не використовує електроди та більш екологічна.

2. Одними зі світових лідерів у галузі розробки та виробництва індукційних плавильних печей є OTTO JUNKER (Німеччина), Fomet Srl. (Італія), Calamari SpA (Італія), Zakłady Urządzeń Przemysłowych ZAM Kęty Sp. z o.o. (Польща), Inductotherm Corp (США), Flagma (Китай) та інші.

3. Основною тенденцією розвитку індукційних тигельних печей є зростання як одиничної, так і сумарної ємності парку печей, пов'язаний, з потребою у великих кількостях високоякісного металу. Крім того, при збільшенні ємності підвищується ККД печі та знижуються питомі витрати на її виготовлення та експлуатацію.

4. Тигельні печі дедалі частіше стали використовувати у комплексі з іншими плавильними агрегатами (вагранками, дуговими сталеплавильними печами). У цих випадках метал, попередньо розплавлений у зазначених печах, надходить до індукційної печі для рафінування та доведення до заданого хімічного складу.

5. Індукційні каналні печі застосовуються як плавильні або роздаткові агрегати переважно для плавки кольорових сплавів. Вони можуть працювати самостійно, з періодичною розливкою розплавленого металу або сплаву, або у складі плавильно-роздавальних комплексів. Часто застосовуються в дуплекс-процесах у парі з вагранкою, індукційною тигельною піччю, дуговою сталеплавильною піччю як роздавальний агрегат або міксер. Використання в дуплекс-процесах каналних печей великих ємностей дозволяє економічно працювати при зміні потреби в рідкому металі, а також проводити заливку окремих виливків великої маси та ідеально усереднювати хімічний склад металу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сігарьов М. К., Стороженко С. А. Виробництво виливків із кольорових металів : методичні вказівки для самостійної роботи. Розділ „Печі для плавлення кольорових сплавів” . Для студентів напряму 6.050402”Ливарне виробництво”. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014 30 с.
2. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с. ISBN 978-966-8462-69-6
3. Індукційні печі. URL: <https://kema.at.ua/book7.html> (дата звернення: 08.06.2024)
4. Плавка сталі в індукційних печах. URL: <https://iua.waykun.com/articles/plavka-stali-v-indukciynih-pechah.php> (дата звернення: 08.06.2024).
5. Індукційне плавлення. URL: <https://uk.dw-inductionheater.com/product/induction-melting-metal>(дата звернення: 08.06.2024).
6. Індукційна піч із сталеві сталі. URL: <https://uk.dw-inductionheater.com/product/iron-steel-melting-induction-furnace> (дата звернення: 08.06.2024)
7. Костик К. О., Терентьев Д. П. Особливості розрахунку електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі при виплавці сталі. *Процеси лиття*. 2021. № 2. С. 45–52.
8. Козлов Г. О., Тополов В. Л. Індукційні печі : навч. посіб. для студентів ВНЗ. Нікополь : НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
9. Дементій Л. В., Юсіна Г. Л.. Охорона праці : рекомендації до виконання розділу в дипломному проєкті бакалавра для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2013. 164 с.
10. Техногенна безпека. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/TM045661> (дата звернення: 08.06.2024)
10. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні ;

прийнятий з 30.12.2014 р. ; чинний від 07.04.2023. № 1417.

11. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги ; затверджено та наказом Мінрегіоном України від 31.10.2016 р №237 та введений в дію з 01.06.2017 р. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35с.

12. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення ; прийнятий з 03.10.2018 р. ; чинний від 01.05.2019. № 264.

13. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги ; прийнятий з 08.12.1994 р. ; чинний від 01.01.1996. № 310.

14. ДСТУ Б EN 15242:2015. Вентиляція будівель. Розрахункові методи визначення витрат повітря на вентиляцію будівель з урахуванням інфільтрації (EN 15242:2007, IDT) ; прийнятий з 30.12.2015 р. ; чинний від 01.10.2016. № 358.

15. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; прийнятий з 01.12.1999 р. №42. Київ, 12 с.

16. Наказ № 569 від 19.03.2021 Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки та здоров'я на роботі в металургійній промисловості. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0606-21#Text> (дата звернення: 01.03.2024)

17. Забезпечення техногенної безпеки на підприємстві. URL: <https://pro-op.com.ua/article/933-pravila-tehnogenno-bezpeki> (дата звернення: 01.12.2023).

18. ДСТУ prEN 12937-2002. Безпечність машин. Технічні правила та вимоги до підйимально-транспортних засобів ; прийнятий з 12.06.2002 р. ; чинний від 01.07.2003. № 357.

19. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою ; прийнятий з 15.06.2016 р. ; чинний від 01.01.2017. № 158.

20. Грибан В. Г., Казначеев Д. Г., Бойко О. І. Безпека життєдіяльності та охорона праці у схемах : навч. посіб. Дніпро : ДДУВС, 2019. 228 с.