МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повна найменування вищого навчального закладу)
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
(назва факультету)
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЕКОЛОГІЇ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота/ проєкт

перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
(рівень вищої освіти)

на тему *«Електросталеплавильні печі: види, технічні особливості та перспективи розвитку»*

Виконав: студент *4* курсу, групи *6.1363-м-з-с2*

спеціальності *136 «Металургія»*
(код і назва спеціальності)

освітньо-професійна програма *«Металургія»*
(назва освітньої програми)

Пилипенко Сніжана Вікторівна
(ініціали та прізвіще)

Керівник *доцент, канд. техн. наук, доцент Воденнікова О.С.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *доцент, канд. техн. наук, доцент Нестеренко Т.М.*

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

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*
другий (магістерський) рівень)

Спеціальність *136 «Металургія»*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *Металургія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
в.о. завідувача кафедри
МТЕТБ
Ю.О. Бєлоконь
“__” _____2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

Пилипенко Сніжані Вікторівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) *«Електросталеплавильні печі: види, технічні особливості та перспективи розвитку»*

керівник роботи (проєкту) *Воденнікова Оксана Сергіївна, канд. техн. наук, доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *“23” 12 2025 р. № 1831-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *12.05.2026р.*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Науково-технічна література, ДСТУ, патенти.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Електроплавильні печі: види та специфіка технологічного процесу виплавки сталі. «Зелена металургія» як напрям підвищення ефективності та екологічності електросталеплавильного виробництва. Огляд особливостей технології виплавки сталі в електропечах. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Титульний лист – 1. Реферат – 0. Вступ – 1. Розділ 1 – 7. Розділ 2 – 3. Розділ 3 – 2. Розділ 4 – 0. Загальні висновки – 2.*

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Електроплавильні печі: види та специфіка технологічного процесу виплавки сталі	*Воденнікова О.С., доцент*	
«Зелена металургія» як напрям підвищення ефективності та екологічності електросталеплавильного виробництва	*Воденнікова О.С., доцент*	
Огляд особливостей технології виплавки сталі в електропечах	*Воденнікова О.С., доцент*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Воденнікова О.С., доцент*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*	

7. Дата видачі завдання *24.12.2025р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	*Реферат. Зміст. Вступ.*		
2	*Електроплавильні печі: види та специфіка технологічного процесу виплавки сталі*		
3	*«Зелена металургія» як напрям підвищення ефективності та екологічності електросталеплавильного виробництва*		
4	*Огляд особливостей технології виплавки сталі в електропечах*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		
6	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання*		
7	*Графічна частина*		

Студент _____ *Сніжана ПИЛИПЕНКО*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ *Оксана ВОДЕННІКОВА*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 85 с., 19 рис., 3 табл., 47 джерел посилання.

ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ, ДУГОВА ПІЧ, ВАКУУМНО-ДУГОВА ПІЧ, ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, ВАКУУМНО-ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, КОНСТРУКЦІЯ ПЕЧІ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ СТАЛІ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Електросталеплавильні печі: види, технічні особливості та перспективи розвитку.

Мета роботи – дослідження основних видів електросталеплавильних печей, їх конструктивних і технологічних особливостей, принципів роботи та технічних характеристик, а також визначення сучасних тенденцій і перспектив розвитку електросталеплавильного виробництва в умовах енергоефективності, екологізації та впровадження інноваційних технологій у металургійній галузі.

У розділі 1 розглянуто види електроплавильних печей, зокрема індукційні та вакуумо-індукційні печі, дугові сталеплавильні печі, вакуумно-дугові печі, а також їх конструктивні особливості, принцип роботи, технологічні процеси плавлення сталі та промислове застосування.

У розділі 2 розглянуто екологічні проблеми електросталеплавильного виробництва, впровадження технологій «зеленої металургії» в Україні та за кордоном, сучасні інноваційні рішення для екологізації процесів, а також використання вторинної сировини і принципів циркулярної економіки.

У розділі 3 розглянуто технологію виплавки сталі в електропечах, характеристику продукції та схему роботи електросталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь», а також виконано розрахунок потреби в обладнанні та визначено кількість і ємність печей.

У розділі 4 розглянуто питання охорони праці та техногенної безпеки в умовах електросталеплавильного виробництва.

ЗМІСТ

ВСТУП……..…….. 7

1 ЕЛЕКТРОПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ: ВИДИ ТА СПЕЦИФІКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПЛАВКИ СТАЛІ……... 9

1.1 Різновиди індукційних плавильних печей та специфіка процесу плавлення……..…..…. 9

1.1.1 Різновиди та устрій індукційних печей ……..…….. 9

1.1.2 Переваги та недоліки індукційних печей…….. 13

1.1.3 Принцип роботи індукційної печі……... 14

1.1.4 Особливості процесу плавлення металів в індукційних печах……. 16

1.1.5 Марки сталей та промислове використання індукційних плавильних печей……... 17

1.2 Види та функціональні можливості вакуумних індукційних печей у металургії……..... 19

1.3 Різновиди дугових сталеплавильних печей та специфіка процесу плавлення……... 26

1.3.1 Різновиди та устрій дугових сталеплавильних печей…….. 26

1.3.2 Переваги та недоліки дугових сталеплавильних печей……. 28

1.3.3 Принцип роботи дугових сталеплавильних печей……..... 29

1.3.4 Особливості процесу плавлення металів в дугових сталеплавильних печей……... 31

1.3.5 Марки сталей та промислове використання дугових сталеплавильних печей……... 32

1.4 Види та функціональні можливості вакуумно-дугових печей у металургії……... 35

1.5 Перспективні конструкції електросталеплавильних печей…… 39

2 «ЗЕЛЕНА МЕТАЛУРГІЯ» ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ

ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА……..…… 44
2.1 Декарбонізація промисловості…….. 44
2.2 Екологічні проблеми електросталеплавильного виробництва……. 46
2.2.1 Сучасний стан та впровадження технологій «зеленої металургії» в електросталеплавильному виробництві України…… 46
2.2.2 Сучасний стан та впровадження технологій «зеленої металургії» в електросталеплавильному виробництві зарубіжних країн……. 48
2.3 Технології та інновації для екологізації електросталеплавильних процесів…… 51
2.4 Використання вторинної сировини та принципи циркулярної економіки…….. 52
3 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В ЕЛЕКТРОПЕЧАХ…….. 54
3.1 Характеристика продукції та технологічних способів виплавки сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»……. 54
3.2 Технологічна схема роботи електросталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь»…….. 56
3.3 Розрахунок потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху……. 58
3.4 Визначення кількості та ємності печей в електросталеплавильному цеху 68
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……..…. 71
4.1 Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих факторів електросталеплавильного виробництва……..……. 71
4.2 Охорона праці та техногенна безпека металургійного підприємства…... 74
4.3 Нормативні документи з охорона праці в металургійній галузі…….. 76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……..... 81

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку металургійної промисловості особливого значення набуває вдосконалення технологій виробництва сталі, спрямоване на підвищення якості металопродукції, зниження енерговитрат та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Одним із найважливіших напрямів розвитку металургії є електросталеплавильне виробництво, яке забезпечує високу ефективність процесів плавлення, можливість точного регулювання хімічного складу сталі та широке використання вторинної сировини. У сучасних умовах глобальної декарбонізації промисловості особливої актуальності набуває концепція «зеленої металургії», що передбачає скорочення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності виробництва та впровадження екологічно безпечних технологій.

Електросталеплавильні печі є основними агрегатами сучасного електрометалургійного виробництва та мають суттєві переваги порівняно з традиційними киснево-конвертерними технологіями, оскільки дозволяють значно зменшити викиди вуглекислого газу завдяки використанню електроенергії та металобрухту як основної сировини. Серед найбільш поширених типів електросталеплавильних печей виділяють дугові сталеплавильні печі та індукційні печі, які відрізняються конструкцією, принципом дії, технічними характеристиками та сферою використання. Постійне вдосконалення конструкцій печей, автоматизація технологічних процесів, цифровізація виробництва, впровадження енергоощадного обладнання та сучасних систем очищення газів сприяють підвищенню продуктивності, зменшенню витрат електроенергії та покращенню екологічних показників металургійного виробництва.

Особливо перспективним напрямом розвитку «зеленої металургії» є використання електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел, а також упровадження технологій прямого відновлення заліза із застосуванням водню, що створює передумови для формування кліматично нейтрального

виробництва сталі. У зв’язку з цим електросталеплавильне виробництво розглядається як один із найбільш перспективних напрямів модернізації металургійної галузі та переходу до низьковуглецевої економіки.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю дослідження основних видів електросталеплавильних печей, їх конструктивних і технологічних особливостей, аналізу принципів роботи та технічних характеристик, а також визначення сучасних тенденцій і перспектив розвитку електросталеплавильного виробництва в умовах підвищення енергоефективності, екологічної безпеки та впровадження інноваційних технологій у металургійній галузі.

Мета роботи – дослідження основних видів електросталеплавильних печей, їх конструктивних і технологічних особливостей, принципів роботи та технічних характеристик, а також визначення сучасних тенденцій і перспектив розвитку електросталеплавильного виробництва в умовах енергоефективності, екологізації та впровадження інноваційних технологій у металургійній галузі.

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

– проаналізувати сучасний стан електросталеплавильного виробництва;

– розглянути класифікацію та основні види електросталеплавильних печей;

– дослідити конструктивні особливості та принципи роботи дугових сталеплавильних печей, індукційних печей та інших типів електросталеплавильних печей;

– охарактеризувати основні технологічні параметри та технічні характеристики електросталеплавильних агрегатів;

– визначити переваги та недоліки різних типів електросталеплавильних печей;

– – проаналізувати питання енергоефективності та екологічності електросталеплавильньного виррбництва;

– визначити перспективи розвитку електросталеплавильного виробництва у металургійній галузі.

1 ЕЛЕКТРОПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ: ВИДИ ТА СПЕЦИФІКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПЛАВКИ СТАЛІ

1.1 Різновиди індукційних плавильних печей та специфіка процесу плавлення

1.1.1 Різновиди та устрій індукційних печей

На сучасних металургійних підприємствах індукційні плавильні печі (рис. 1.1) широко використовують для виплавки сталі у цехах дрібного та середнього лиття. Крім сталей, у таких агрегатах ефективно переплавляють чавун, а також кольорові метали й сплави, зокрема мідь, алюміній та інші матеріали. Індукційні печі забезпечують високу якість розплаву, рівномірність нагрівання та можливість точного контролю технологічного процесу.



Рисунок 1.1 - Індукційна піч в умовах промисловості

Температурний режим роботи індукційних печей залежить від виду металу, що переплавляється. Для алюмінієвих сплавів температура становить близько 750 °C, для міді – приблизно 1200 °C, для чавуну – у межах 1200–1400 °C, а для сталі – до 1600 °C.

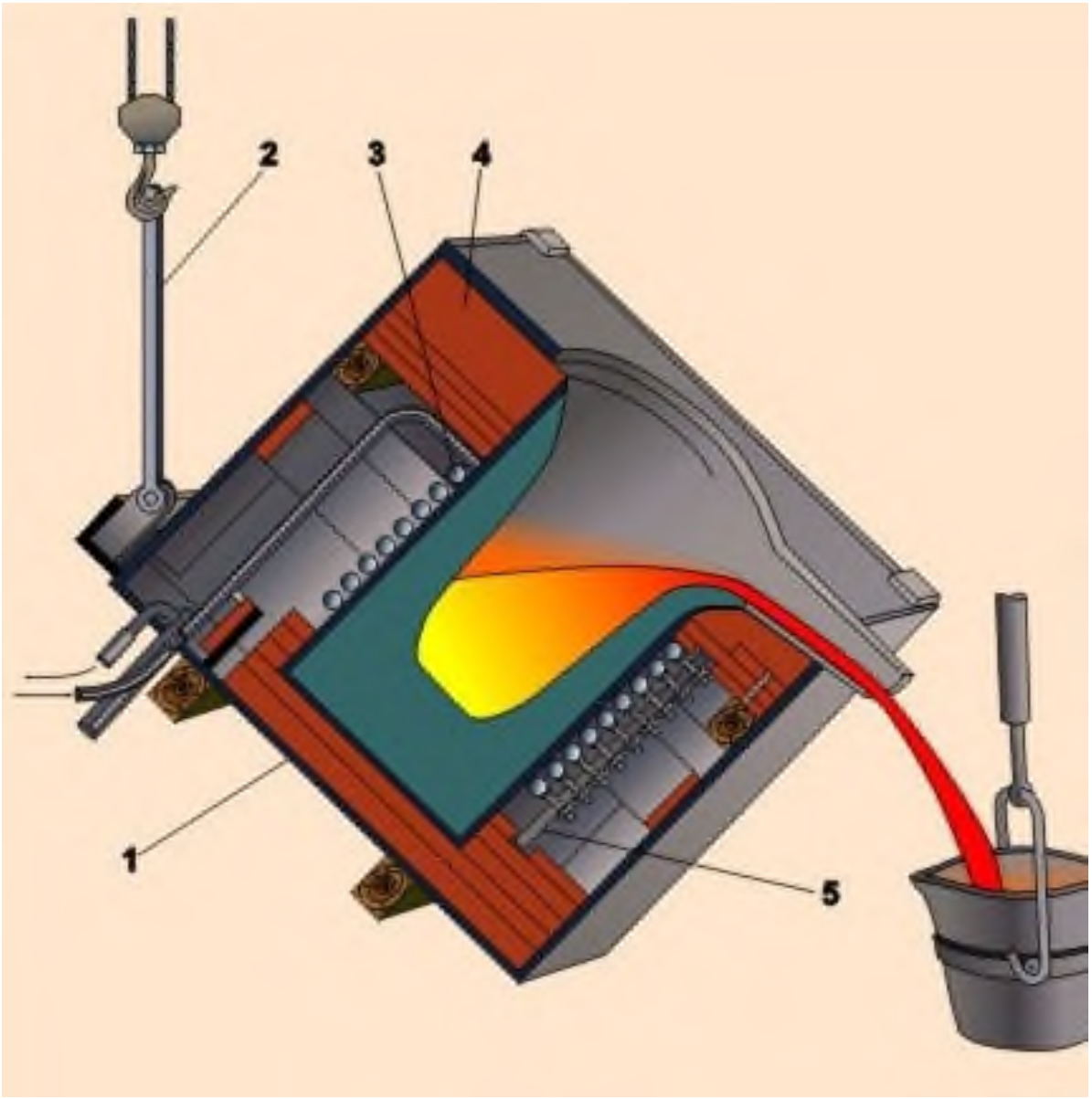
За конструктивним виконанням індукційні плавильні агрегати поділяють на тигельні та канальні. Канальні печі мають магнітний сердечник, тоді як тигельні можуть виготовлятися як із сердечником, так і без нього. Залежно від умов ведення плавки розрізняють відкриті печі, у яких процес відбувається в атмосферному середовищі, вакуумні – для плавлення у вакуумі, а також компресійні, що працюють під надлишковим тиском.

Схематичне зображення індукційної тигельної печі типу ІСТ-1 наведено на рис. 1.2 та 1.3.

За режимом роботи індукційні печі бувають періодичної, напівбезперервної та безперервної дії. Відмінності існують і в конструкції тигля. У промисловості застосовують печі з керамічним футерованим тиглем, металевим провідним тиглем, графітовим або шамотно-графітовим тиглем, а також установки з водоохолоджувальним «холодним» тиглем.

Важливим критерієм класифікації індукційних печей є робоча частота струму. Залежно від цього виділяють високочастотні печі (100–200 кГц), середньочастотні (500–1000 Гц) та печі промислової частоти 50 Гц. Печі промислової частоти працюють від понижувального трансформатора з вторинною напругою 100–1000 В. Вони характеризуються порівняно невеликим споживанням електроенергії, простотою експлуатації та компактністю. Такі агрегати найчастіше використовують для плавлення чавуну та сталі без тривалої витримки металу в рідкому стані.

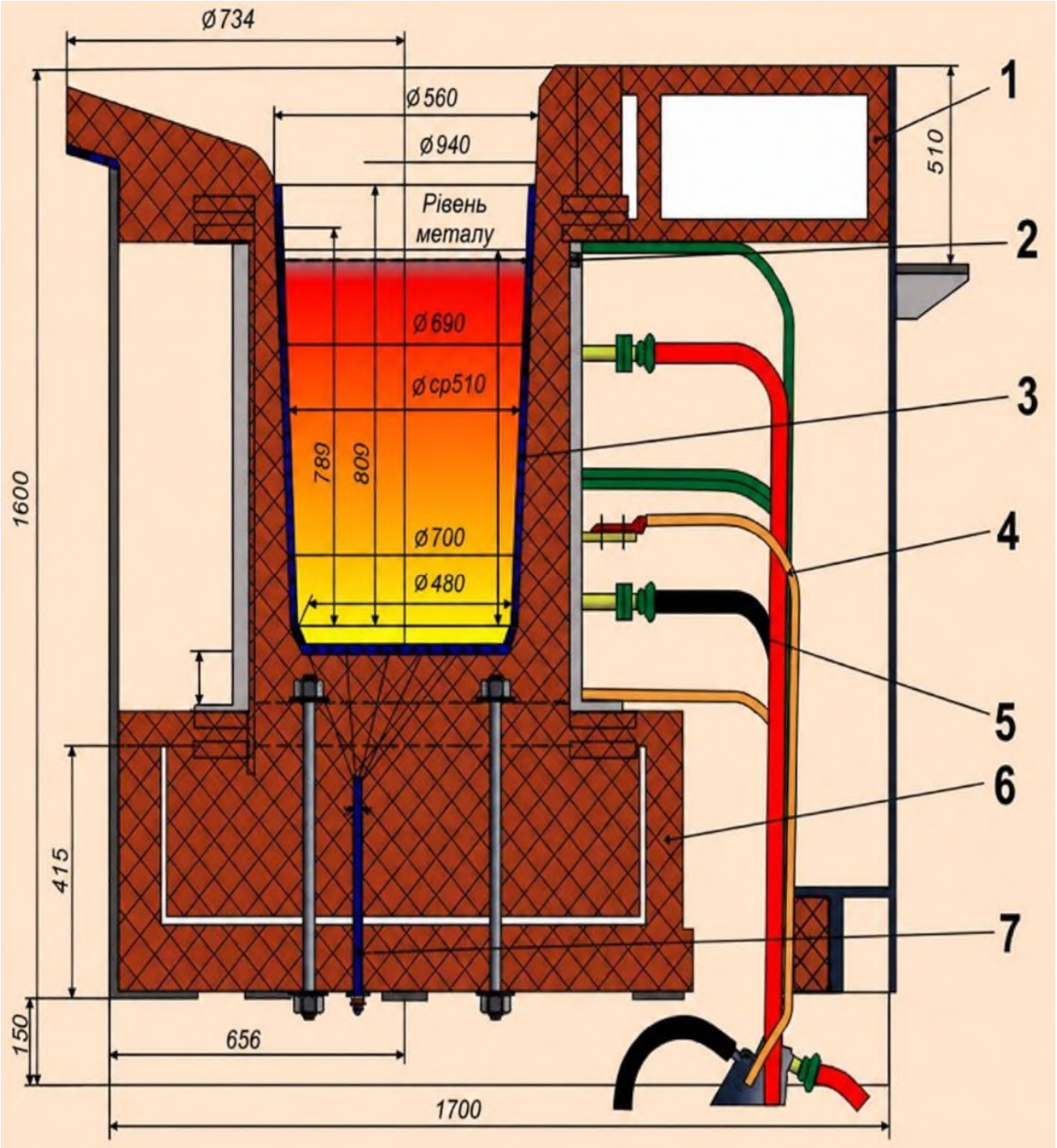
Середня питома витрата електроенергії в індукційних печах становить приблизно 550 кВт·год/т при виплавці чавуну та близько 730 кВт·год/т при виплавці сталі. Сучасні установки можуть мати місткість до 60 т. В Україні найбільш поширеними є індукційні тигельні печі ємністю 0,06; 0,16; 0,4; 1,0; 2,5; 6; 10; 16 та 25 т.



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

Основними елементами конструкції індукційної печі є каркас із механізмом нахилу, бічні стійки, індуктор та футерований тигель. Каркас виготовляють з ізоляційних матеріалів, а для забезпечення міцності застосовують металеві куточки та болтові з’єднання. Індуктор являє собою багатовиткову спіраль із мідної трубки спеціального профілю. Усередині трубки циркулює вода, яка забезпечує ефективне охолодження системи.



1 - каркас печі; 2 - індуктор; 3 - шаблон; 4 - підключення ших генератору; 5 - струмопідведені кабаля; 6 - футерівка; 7 - електрод сигналізатора стану футерівки

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

Живлення індуктора здійснюється змінним струмом високої або середньої частоти від генератора через систему вимикачів та конденсаторних

батарей. Конденсатори необхідні для компенсації індуктивного опору та створення резонансного режиму роботи печі. Частина конденсаторів працює постійно, інша підключається залежно від етапу плавки.

Футерівка індукційних печей виготовляється з кислих або основних вогнетривких матеріалів. Для кислої футерівки використовують кварцит із високим вмістом SiO_2, а як зв'язувальні компоненти - борну кислоту та рідке скло. Основні футерівки формують із магнезитових, доломітових або вапняних матеріалів із додаванням вогнетривкої глини. До футерівки висуваються підвищені вимоги щодо термостійкості, механічної міцності, шлакостійкості та електроізоляційних властивостей.

1.1.2 Переваги та недоліки індукційних печей

Порівняно з дуговими сталеплавильними печами індукційні агрегати мають низку важливих переваг. Насамперед відсутність електричної дуги знижує вигорання металу та легувальних елементів, а також обмежує насичення розплаву газами, зокрема воднем і азотом. Завдяки компактним розмірам індукційні печі можна розміщувати у герметичних камерах, що дозволяє проводити плавку у вакуумі або в середовищі інертних газів. Крім того, індукційний спосіб нагрівання забезпечує більш стабільний температурний режим і зменшує втрати тепла під час плавки. Це сприяє підвищенню енергоефективності виробництва та зниженню собівартості металопродукції. Важливою перевагою є також зменшення рівня шуму та шкідливих викидів у виробничому приміщенні, що покращує умови праці персоналу.

Ще однією перевагою є інтенсивне електромагнітне перемішування металу, яке забезпечує рівномірний розподіл температури та хімічного складу у всьому об'ємі розплаву. Це позитивно впливає на якість металу та стабільність технологічного процесу. Завдяки постійній циркуляції розплаву прискорюється розчинення легувальних елементів та зменшується ймовірність утворення

локальних неоднорідностей. Індукційні печі також дозволяють отримувати метал із низьким вмістом неметалевих включень. Це особливо важливо при виробництві високоякісних сталей та спеціальних сплавів. Крім того, автоматизація роботи сучасних індукційних установок дозволяє точніше контролювати параметри плавки та підвищувати продуктивність обладнання.

Разом із перевагами індукційні печі мають і певні недоліки. До них належать порівняно невисока температура шлаку, обмежений термін служби футерівки, особливо основної, а також значна вартість обладнання. Крім того, тигель має відносно невеликий ресурс роботи та потребує регулярного ремонту або заміни. Недоліком є також висока чутливість обладнання до перепадів напруги та якості електроживлення. Для стабільної роботи печі необхідне ефективне водяне охолодження індуктора та інших елементів конструкції. Порушення режиму охолодження може призвести до перегріву обладнання та аварійних ситуацій.

Індукційні тигельні печі відрізняються від вакуумно-індукційних установок тим, що працюють у відкритій атмосфері та не мають герметичної вакуумної камери. Температура нагріву в них може досягати 1800 °С, а живлення індукторів здійснюється напругою середньої частоти 800–1000 В. Такі печі зазвичай не використовують для отримання надчистих тугоплавких сплавів на основі заліза, нікелю чи кобальту. Водночас вони широко застосовуються у ливарному виробництві для виплавки чавуну, конструкційних і легованих сталей, а також кольорових металів. Простота конструкції та відносно висока продуктивність роблять індукційні тигельні печі ефективними для серійного виробництва металопродукції. Завдяки поєднанню високої якості металу та економічності процесу індукційні печі залишаються одним із найперспективніших видів плавильного обладнання сучасної металургії.

1.1.3 Принцип роботи індукційної печі

Принцип дії індукційної печі базується на нагріванні металу вихровими

струмами, які виникають під впливом змінного електромагнітного поля. Металеву шихту розміщують у тиглі всередині індуктора, через який проходить змінний струм. У результаті навколо індуктора створюється змінне магнітне поле, що індукує у металі вихрові струми Фуко. Саме ці струми забезпечують нагрівання та подальше плавлення металу.

Для зменшення реактивних втрат у коло індуктора включають конденсаторні батареї, які компенсують індуктивний опір системи. При підвищенні частоти струму необхідна ємність конденсаторів зменшується.

Однією з характерних особливостей індукційних печей є електродинамічна циркуляція рідкого металу. Вона виникає внаслідок взаємодії магнітних полів індуктора та струмів, наведених у розплаві. Таке перемішування прискорює плавлення шихти, вирівнює температуру та забезпечує однорідність хімічного складу металу. Водночас надмірна циркуляція може призводити до утворення опуклої поверхні металу та відтікання шлаку до стінок тигля.

Для індукційних печей характерний також так званий «поверхневий ефект», за якого максимальна густина струму спостерігається біля стінок тигля. Саме у цьому шарі виділяється найбільша кількість теплоти, що забезпечує інтенсивне плавлення шихти. Глибина проникнення струму залежить від частоти: зі збільшенням частоти товщина активного шару зменшується.

Ефективна робота індукційної печі неможлива без системи водяного охолодження, оскільки індуктор під час роботи зазнає значного теплового навантаження. Одночасне підведення електроенергії та охолоджувальної води забезпечує стабільність і безпечність технологічного процесу.

Завдяки індукційному нагріву вдається отримати метал із високим ступенем чистоти та однорідності. Крім покращення якості продукції, використання індукційних печей сприяє зниженню енерговитрат і собівартості плавки через високий коефіцієнт корисної дії обладнання. У сучасній промисловості найбільш поширеними є високочастотні установки, однак середньочастотні печі також активно застосовуються завдяки зниженому

споживанню електроенергії та короткому циклу плавки, який зазвичай становить 40–45 хвилин.

Сьогодні індукційний спосіб плавлення вважається одним із найефективніших методів безконтактного нагрівання електропровідних матеріалів. Такі установки використовують у найрізноманітніших галузях промисловості – від невеликих лабораторних печей до великих агрегатів місткістю сотні тонн. Залежно від технологічних особливостей процесу індукційні установки поділяють на печі з футерованою ванною та установки безконтактної плавки, до яких належать печі левітаційного типу, установки зонної плавки та печі з холодним тиглем.

У процесі роботи індукційних тигельних печей найбільш повно реалізуються переваги індукційного нагріву: внутрішній розігрів шихти, рівномірний розподіл теплової енергії, інтенсивне перемішування розплаву, високий коефіцієнт корисної дії та відносно невелика питома витрата електроенергії на одну тонну металу.

1.1.4 Особливості процесу плавлення металів в індукційних печах

Процес плавлення в індукційній печі характеризується використанням електромагнітної індукції для нагрівання металевої шихти. Під дією змінного магнітного поля у металі виникають вихрові струми, внаслідок чого електрична енергія перетворюється на теплову. Це забезпечує плавлення металу без прямого контакту з нагрівальними елементами.

Особливістю такого способу плавки є утворення тепла безпосередньо в об’ємі металу. Завдяки цьому процес відбувається швидко, а температура у ванні підтримується більш рівномірно. Водночас зменшуються теплові втрати та підвищується ефективність використання електроенергії.

Під час плавлення у рідкому металі виникають циркуляційні потоки, які сприяють перемішуванню розплаву. Це покращує розчинення легувальних компонентів, забезпечує однорідність хімічного складу та стабільність

властивостей металу. Така особливість особливо важлива при виробництві легованих сталей і спеціальних сплавів.

В індукційних печах значно зменшується контакт металу з продуктами згоряння та атмосферними газами. У результаті знижується ймовірність окиснення розплаву та втрат легувальних елементів. Це дозволяє отримувати метал із підвищеними показниками чистоти та якості.

Характерною рисою процесу є також концентрація струмів поблизу поверхні металу, що пов’язано з проявом поверхневого ефекту. Найбільше тепла виділяється у периферійних шарах розплаву, а глибина проникнення струму залежить від робочої частоти установки.

Для нормальної роботи печі необхідне постійне охолодження індуктора та струмопідвідних елементів. З цією метою застосовується система водяного охолодження, яка запобігає перегріванню обладнання та забезпечує його довговічність.

Сучасні індукційні печі оснащуються автоматизованими системами керування, що дозволяють контролювати температуру, потужність та тривалість плавки. Завдяки цьому забезпечується стабільність технологічного процесу, підвищується продуктивність обладнання та покращується якість готової металопродукції.

1.1.5 Марки сталей та промислове використання індукційних плавильних печей

В індукційних печах можна виплавляти широкий спектр сталей і сплавів залежно від конструкції агрегату, типу футерівки та режиму плавки. Найчастіше в індукційних тигельних печах виплавляють конструкційні вуглецеві сталі марок Ст3, Ст5, 20, 35, 45, а також леговані сталі 40Х, 30ХГСА, 20Х13, 12Х18Н10Т та інші. Крім того, такі печі використовують для виплавки інструментальних сталей марок У8, У10, Х12МФ, підшипникових сталей ШХ15, жароміцних сталей і сплавів 12Х18Н9Т, 20Х23Н18, нержавіючих сталей

08Х18Н10 та 12Х18Н10Т, а також різних марок чавуну й кольорових сплавів. Завдяки можливості точного регулювання температурного режиму та хімічного складу розплаву індукційний спосіб плавлення забезпечує високу якість металу й мінімальні втрати легувальних елементів.

В Україні індукційні печі використовуються переважно на металургійних, машинобудівних і ливарних підприємствах. Одним із найбільших підприємств спеціальної металургії є ПрАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя), де в сталеплавильному виробництві застосовуються індукційні печі для виплавки спеціальних марок сталі та сплавів. На підприємстві експлуатується індукційна піч ємністю 10 т поряд із дуговими сталеплавильними печами місткістю від 10 до 60 т.

На ливарних і машинобудівних підприємствах України найбільшого поширення набули індукційні тигельні печі типів ІСТ та ІТПЕ. Печі серії ІСТ випускаються місткістю від 0,06 до 10 т та застосовуються для плавлення сталі, чавуну і кольорових металів. Печі серії ІТПЕ є модернізованими індукційними тигельними агрегатами, які використовуються для виплавки чорних і кольорових металів. В Україні поширені установки ІТПЕ ємністю 160 кг, 250 кг, 400 кг і 650 кг із потужністю від 160 до 500 кВт.

Індукційні тигельні печі середньої та високої частоти використовуються також на окремих виробничих дільницях ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (м. Кривий Ріг) для переплаву металу та проведення спеціальних плавок. На підприємствах ливарного профілю найчастіше застосовують печі невеликої та середньої місткості - від 0,16 до 6 т, що забезпечують виробництво фасонного литва, легованих сталей і чавунів.

На окремих ливарних виробництвах групи «Інтерпайп» (м. Дніпро) індукційні тигельні печі використовуються для фасонного лиття та переплаву металу; зазвичай це печі малої та середньої місткості (0,5–6 т), що працюють на середній частоті.

Крім того, індукційні установки різної потужності (від лабораторних до промислових 100–1000 кг і більше) застосовуються на спеціалізованих

ливарних підприємствах, таких як ТОВ «Термоліт» (м. Дніпро) і ТОВ «Новатек» (м. Мелітополь (тимчасове окуповане)), які виготовляють і експлуатують індукційні тигельні печі типів ІСТ та ІТПЕ для виплавки чорних і кольорових металів.

На підприємстві «Мотор Січ» (м. Запоріжжя) індукційні плавильні печі використовуються, але не як основне сталеплавильне обладнання, а в допоміжних і спеціальних ливарних та ремонтних підрозділах. Зокрема на «Мотор Січ» застосовуються індукційні тигельні печі малої та середньої ємності (орієнтовно від ~50 кг до 1–2 т), установки середньої та високої частоти для плавки кольорових сплавів і спеціальних сталей, печі для точного лиття деталей авіаційного та машинобудівного призначення.

Сучасна тенденція розвитку металургійної галузі України полягає у поступовому збільшенні використання індукційних печей завдяки їх високій енергоефективності, можливості автоматизації та відносно низькому рівню екологічного навантаження. Саме тому індукційне плавлення розглядається як один із перспективних напрямів розвитку «зеленої металургії» та переходу до маловуглецевого виробництва сталі.

1.2 Види та функціональні можливості вакуумних індукційних печей у металургії

Плавка у вакуумних індукційних печах дає змогу отримувати сталі та сплави з мінімальним вмістом газів, неметалічних включень і домішок кольорових металів. Такий технологічний процес дозволяє здійснювати легування будь-якими елементами, у тому числі тими, що мають високу спорідненість до кисню, без втрат через окиснення.

Переваги вакуумної індукційної плавки зумовлені наявністю розрідженого середовища, яке сприяє рафінуванню металу від небажаних домішок і забезпечує ефективне розкислення за рахунок вуглецю. Відсутність контакту розплаву з повітрям дозволяє суттєво знизити вміст кисню, азоту,

водню, а також домішок кольорових металів і неметалевих включень. Завдяки цьому можна виплавляти сталі та сплави з високою чистотою та покращеними експлуатаційними властивостями, включаючи елементи, що легко окиснюються.

Водночас вакуумні індукційні печі мають певні недоліки. Під час тривалого перебування розплаву в тиглі можливе його забруднення киснем і неметалічними включеннями внаслідок взаємодії з футерівкою, а також надходження у метал відновлених із вогнетривів елементів, таких як кремній або алюміній.

Вакуумні індукційні печі характеризуються значною різноманітністю конструкцій і технологічних параметрів. За функціональним призначенням їх поділяють на три основні групи:

– лабораторні установки;

– печі для отримання зливків;

– агрегати для фасонного лиття.

За конструктивними особливостями виділяють печі:

– з індуктором, розташованим усередині вакуумної камери;

– з індуктором, винесеним за межі вакуумного простору.

За виконанням вакуумної камери вони можуть мати:

– вертикальне компонування;

– горизонтальне компонування;

– відкатну конструкцію камери.

За режимом роботи розрізняють:

– печі періодичної дії;

– печі напівбезперервного процесу.

Останні мають низку переваг, зокрема підвищену продуктивність за рахунок відсутності необхідності повторного вакуумування перед кожною плавкою, скорочення простоїв на охолодження, зменшення окиснення металу при завантаженні та покращення умов експлуатації футерівки через стабільні теплові режими.

У високотемпературних вакуумних індукційних печах (рис. 1.4) нагрів матеріалу в тиглі до заданої температури здійснюється переважно за рахунок інтенсивної теплопередачі. Для забезпечення роботи при екстремально високих температурах використовується графіт, який відзначається високою термічною стійкістю та здатністю витримувати значні теплові навантаження. Основною сферою застосування таких установок є спікання карбіду кремнію, при цьому технологічна температура може досягати 2500 °С.



Рисунок 1.4 – Високотемпературна вакуумна індукційна піч

Вакуумна індукційна піч із нижнім завантаженням (рис. 1.5) призначена для проведення високотемпературного спікання різноманітних матеріалів у вакуумному середовищі або в атмосфері інертних газів. У таких установках

обробляють сплави системи W–Cu, магнітні матеріали на основі Ni–Co та Nd–Fe–B, а також композиційні матеріали, вуглецеві вироби, а також деталі з карбіду кремнію, вольфраму і молібдену. Максимальна температура процесу спікання може сягати 2550 °C.



Рисунок 1.5 – Вакуумна індукційна піч з спікання з нижнім завантаженням

До складу вакуумних індукційних печей входять основні елементи: індуктор, тигель, вакуумна камера та форма для розливання металу.

У високотемпературних вакуумних індукційних установках нагрів матеріалу здійснюється переважно за рахунок теплопередачі. Використання графітових елементів дозволяє досягати дуже високих температур завдяки їх термостійкості; такі установки застосовують, зокрема, для спікання карбіду кремнію при температурах до 2500 °C.

Вакуумні індукційні плавильні печі періодичної дії (рис. 1.6) застосовують для виплавки спеціальних і прецизійних сплавів, нікелевих та жароміцних матеріалів, сплавів Nd-Fe-B, хімічно активних металів, магнітних матеріалів, воднеакумулюючих сплавів, а також кольорових металів і їх сплавів у промисловому та дослідницькому виробництві. Конструктивно печі можуть виконуватись із вертикальним або горизонтальним завантаженням.



Рисунок 1.6 – Вакуумна індукційна піч періодичної дії

До складу установки входять вакуумна камера, плавильна система, механізм переміщення ливарних форм, вакуумна система, трансформатор, система автоматизованого керування, багатопозиційне оглядове вікно, система водяного охолодження, платформа оператора та інші допоміжні вузли. Використання сучасних вимірювальних приладів, термопар, датчиків вакууму, систем автоматичного підстроювання частоти та керування на основі логічних контролерів забезпечує безпечну й стабільну роботу обладнання. При

виникненні перегріву, зниженні вакууму або коливаннях напруги система подає світлові та звукові сигнали, а також запобігає помилкам оператора завдяки автоматичним блокуванням. У вакуумній системі використовуються високопродуктивні малошумні насоси з низьким енергоспоживанням.

Індуктор печі виготовляють із спеціально оброблених матеріалів, які характеризуються високою міцністю, низькою реактивною потужністю та підвищеною енергоефективністю. Використання крокових двигунів дає можливість виконувати розлив металу одночасно у декілька форм протягом одного циклу плавки.

Вакуумні індукційні плавильні печі безперервної розливки (рис. 1.7) виконуються з вертикальним компонуванням. До основних елементів таких установок належать камера вакуумної плавки, камера охолодження, система контролю температури розплаву, завантажувальний механізм, вакуумна система, трансформатор, система автоматизованого керування, плавильна система, система охолодження, платформа оператора та інші допоміжні вузли.

Плавильна, завантажувальна та холодильна камери відокремлені вакуумними затворами, що дозволяє виконувати завантаження форм, легування розплаву та вивантаження готових зливків без порушення вакууму. Завдяки цьому забезпечується безперервність технологічного процесу та підвищується продуктивність обладнання. Крім того, конструкція печей дає змогу здійснювати одночасний розлив металу у декілька форм протягом одного циклу плавки.

Завантажувальна камера та система контролю температури пристосовані для повної автоматизації процесу роботи. Такі вакуумні індукційні печі переважно використовують для високоточного лиття сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту, а також жароміцних, жаростійких і магнітних матеріалів та інших спеціальних сплавів.

Безперервні вакуумні індукційні установки мають вертикальну компоновку і забезпечують підвищену продуктивність завдяки розділенню на окремі камери плавки, охолодження та завантаження, які з’єднані вакуумними

затворами. Це дозволяє здійснювати безперервний цикл роботи та автоматизувати процес.



Рисунок 1.7 – Вакуумна індукційна піч безперервної розливки

Такі установки застосовуються для точного лиття сплавів на основі заліза, нікелю та кобальту, жароміцних і магнітних матеріалів.

Вакуумні індукційні печі з графітовим тиглем працюють на основі високочастотного нагріву в умовах вакууму або інертного газу. Графітовий тигель забезпечує стійкість до високих температур і рівномірність нагріву. До особливостей таких установок належать високий рівень автоматизації, наявність системи контролю параметрів, підвищена безпека роботи та ефективне охолодження.

Окремо виділяються компактні вакуумні індукційні установки для ювелірного виробництва, які використовуються для точного лиття складних виробів. Вони поєднують вакуумне середовище та індукційний нагрів, що дозволяє отримувати щільні відливки з мінімальною пористістю та високою якістю поверхні.

1.3 Різновиди дугових сталеплавильних печей та специфіка процесу плавлення

1.3.1 Різновиди та устрій дугових сталеплавильних печей

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) (рис. 1.8 та рис. 1.9) є основним видом електросталеплавильного обладнання, у якому нагрів і плавлення металу здійснюється за рахунок тепла електричної дуги між електродами та шихтою.

Основні різновиди ДСП:

1. Печі змінного струму – трифазні печі з трьома графітовими електродами, найпоширеніші у промисловості.

2. Печі постійного струму – з одним нижнім електродом, характеризуються стабільнішою дугою та меншим витратами електродів.

3. Ливарні дугові печі малої місткості (0,5–10 т) – використовуються для фасонного лиття.

4. Середні та великі ДСП (25–150 т і більше) – для масового виробництва

сталі.



Рисунок 1.8 – Дугова сталеплавильна піч в умовах металургійного виробництва

5. Вакуумно-дугові печі (ВДП) – для отримання надчистих і спеціальних сплавів.

6. Печі з електрошлаковим переплавом (ЕШП) – суміжні установки для рафінування металу.

Основні елементи конструкції дугових сталеплавильних печей:

– сталевий корпус з вогнетривкою футеровкою;

– знімний дах з отворами для електродів;

– графітові електроди;

– електродотримачі та механізми регулювання дуги;

– подина (робоча ванна);

– механізм нахилу печі для зливання металу;

– трансформатор та система електроживлення;

– система водяного охолодження.

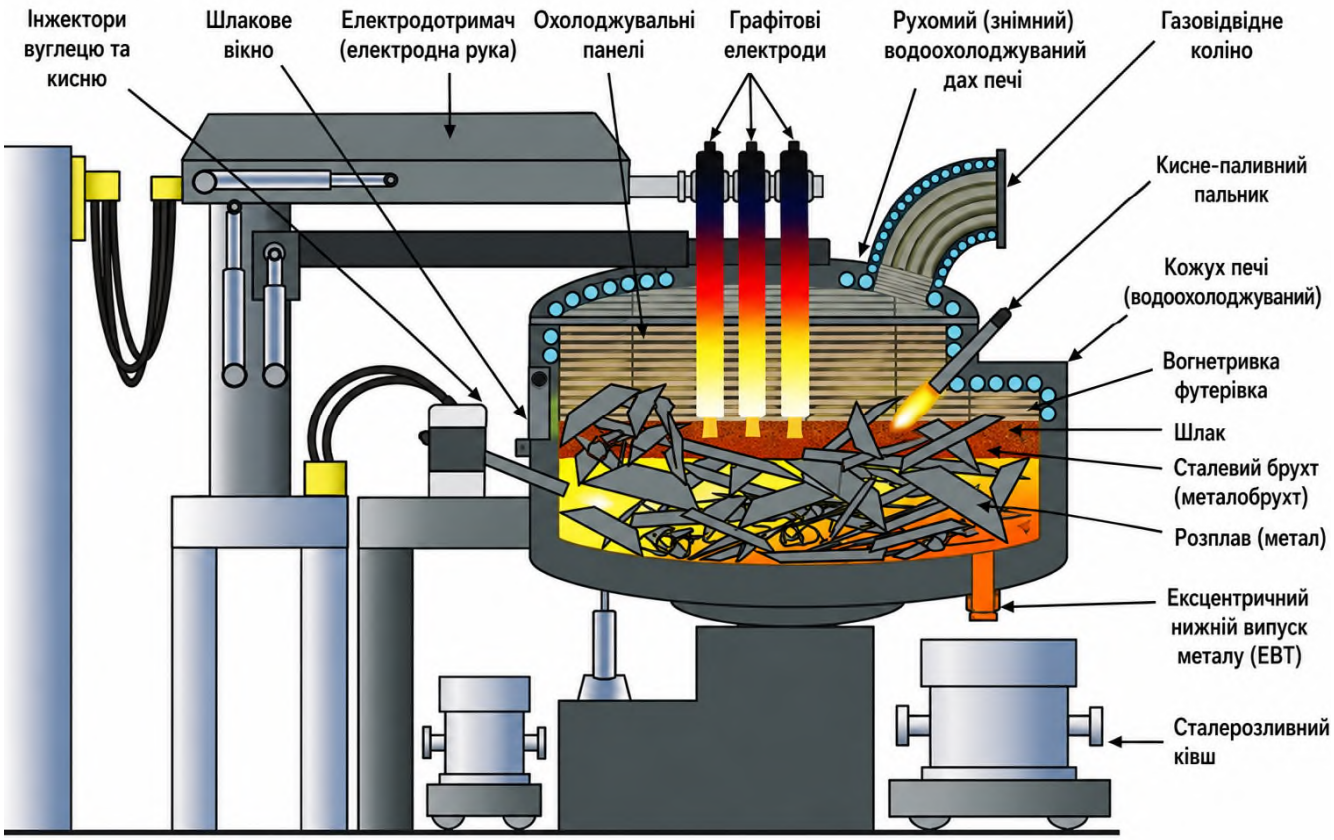


Рисунок 1.9 – Схема дугової сталеплавильної печі

1.3.2 Переваги та недоліки дугових сталеплавильних печей

Переваги дугових сталеплавильних печей:

1. Висока якість сталі

ДСП забезпечують отримання сталі з точно контрольованим хімічним складом, низьким вмістом сірки, фосфору та неметалевих включень.

2. Гнучкість у сировині

Можливість використання різноманітної шихти: металобрухту, губчастого заліза (DRI), чавуну та їх сумішей.

3. Швидке регулювання процесу

Легке керування температурою та енергетичним режимом завдяки

електричній дузі.

4. Висока продуктивність

Сучасні ДСП мають короткий плавильний цикл і можуть працювати у безперервному режимі.

5. Екологічна перевага

Менші викиди CO_2 при використанні металобрухту як основної сировини.

6. Компактність установки

Не потребують складної доменно-коксової інфраструктури.

Недоліки дугових сталеплавильних печей:

1. Високе енергоспоживання

Основним недоліком є значні витрати електроенергії.

2. Залежність від стабільного електропостачання

Перебої в енергосистемі суттєво впливають на процес плавки.

3. Шум та електромагнітний вплив

Робота електричної дуги супроводжується шумом і електромагнітними завадами.

4. Високе навантаження на електромережу

Потрібні потужні трансформатори та спеціальна інфраструктура.

5. Обмеження за якістю брухту

Наявність забруднень у шихті може погіршувати якість сталі та збільшувати витрати на рафінування.

1.3.3 Принцип роботи дугових сталеплавильних печей

Принцип роботи дугових сталеплавильних печей (ДСП) базується на використанні електричної дуги як джерела високотемпературного нагріву для плавлення металевої шихти та подальшого отримання сталі заданого складу. Електрична енергія перетворюється в теплову безпосередньо в робочому просторі печі, що забезпечує високі температури (до 3500–4000 °C у зоні дуги).

ДСП складається з трьох графітованих електродів, які вводяться в

робочий простір печі та утворюють електричну дугу між собою і металевою шихтою. Піч має футеровану вогнетривку ванну, яка витримує високі температури та хімічний вплив шлаку.

Етапи роботи дугової сталеплавильної печі:

1. Завантаження шихти

У піч завантажують металобрухт, губчасте залізо (DRI), чавун або їх суміш. Завантаження може здійснюватися зверху (через завалочний отвір) або корзинами.

2. Запалювання електричної дуги

Після подачі електричного струму між графітовими електродами та металом утворюється електрична дуга. Вона має надвисоку температуру і є основним джерелом тепла.

3. Плавлення шихти

Під дією тепла дуги відбувається:

– плавлення металу зверху вниз,

– утворення металевої ванни,

– часткове випаровування домішок.

У цей період електроди поступово регулюють висоту для стабілізації дуги.

4. Формування шлаку

До печі додають флюси (вапно, доломіт), які утворюють шлак. Шлак в свою чергу поглинає сірку та фосфор, захищає метал від окиснення, сприяє очищенню сталі.

5. Рафінування металу

У цій стадії проводять:

– окиснення домішок (C, Si, Mn, P),

– продувку киснем (у сучасних ДСП),

– легування (додавання Cr, Ni, Mo тощо).

Це дозволяє отримати сталь із заданими властивостями.

6. Доведення температури та складу

Метал доводять до необхідної температури розливання (зазвичай 1600–1650 °C). Виконується точне коригування хімічного складу.

7. Випуск сталі

Готову сталь зливають через льотковий отвір у сталерозливний ківш для подальшої обробки (поза піччю: LF, вакуумування тощо).

1.3.4 Особливості процесу плавлення металів в дугових сталеплавильних печей

Процес плавлення металів у дугових сталеплавильних печах (ДСП) має ряд специфічних особливостей, які відрізняють його від інших металургійних агрегатів (доменних печей, конвертерів тощо). Ці особливості зумовлені використанням електричної дуги як основного джерела тепла, а також характером взаємодії металевої шихти, шлаку та газової фази.

Основними особливостями процесу плавлення металів в дугових сталеплавильних печей є:

1. Локалізований високотемпературний нагрів

Основною особливістю є надвисока температура в зоні електричної дуги (до 3500–4000 °C), яка забезпечує:

– швидке плавлення металобрухту,

– інтенсивне перегрівання локальних зон ванни,

– нерівномірний розподіл температури в печі.

Це потребує постійного регулювання положення електродів для стабілізації процесу.

2. Пошарове плавлення шихти

Металевий брухт плавиться не одночасно, а поступово: верхні шари нагріваються та оплавляються першими, нижні шари плавляться після осідання матеріалу. У результаті формується так звана «плаваюча шихта», що впливає на енергоспоживання та тривалість плавки.

3. Інтенсивне шлакоутворення

У процесі плавлення активно формується шлак, який захищає метал від окиснення, поглинає домішки (S, P), бере участь у рафінувальних реакціях. Склад і в’язкість шлаку суттєво впливають на якість сталі та швидкість плавлення.

4. Висока роль кисневої продувки

У сучасних ДСП часто застосовується подача кисню, яка прискорює окиснення вуглецю та домішок, підвищує тепловиділення за рахунок екзотермічних реакцій, скорочує тривалість плавки. Це дозволяє зменшити частку електроенергії у тепловому балансі.

5. Динамічний характер процесу

Плавлення в ДСП є нестабільним і змінним процесом, що характеризується коливаннями електричного навантаження, зміною довжини дуги, періодичним обвалом шихти в рідку ванну. Це потребує автоматизованих систем керування електродами та потужністю.

6. Висока залежність від якості шихти

Якість металобрухту безпосередньо впливає на енергоспоживання, тривалість плавки, вміст домішок у готовій сталі. Наявність іржі, неметалевих включень та легуючих домішок у брухті ускладнює процес рафінування.

7. Інтенсивні фізико-хімічні реакції

У ванні ДСП відбуваються окиснення вуглецю, кремнію, марганцю, відновлення оксидів, дифузійні процеси між металом і шлаком. Це забезпечує очищення сталі та формування заданого складу.

1.3.5 Марки сталей та промислове використання дугових сталеплавильних печей

У дугових сталеплавильних печах виплавляють широкий спектр сталей, що відрізняються за хімічним складом, структурою та призначенням. Завдяки високій точності регулювання температурного режиму та можливості глибокого рафінування металу, ДСП дозволяють отримувати сталі з високими

вимогами до якості та стабільності властивостей.

Найпоширенішими є вуглецеві конструкційні сталі, такі як Ст3 і Ст5, які використовуються у будівництві, для виготовлення арматури, металоконструкцій та прокату. Вони характеризуються відносно простим хімічним складом і достатньою міцністю для загальних інженерних застосувань.

Також у ДСП виплавляють леговані конструкційні сталі, наприклад 20Х, 40Х, 30ХГСА та 12ХН3А. Такі сталі широко застосовуються у машинобудуванні, автомобільній та авіаційній промисловості, оскільки мають підвищену міцність, зносостійкість і здатність працювати при значних навантаженнях.

Важливу групу становлять інструментальні сталі, такі як У7, У8, У10, Х12МФ, які використовуються для виготовлення різального, штампувального та вимірювального інструменту. Вони відзначаються високою твердістю, зносостійкістю та здатністю зберігати ріжучі властивості при нагріванні.

Окремо слід виділити нержавіючі сталі, наприклад 12Х18Н10Т, 08Х18Н10 та 20Х13. Вони застосовуються у харчовій, хімічній та медичній промисловості завдяки високій корозійній стійкості, яка забезпечується вмістом хрому та нікелю.

Крім того, у ДСП виплавляють спеціальні високолеговані сталі, включаючи жароміцні, магнітні та електротехнічні, які використовуються в енергетиці, турбобудуванні та електротехнічній галузі.

Промислове використання дугових сталеплавильних печей є дуже широким. Вони застосовуються в чорній металургії для виробництва сортового та листового прокату, у машинобудуванні – для виготовлення відповідальних деталей і вузлів машин, в автомобільній та авіаційній промисловості – для отримання високоміцних легованих сталей, а також в інструментальному виробництві.

У промисловості ДСП використовуються переважно для виробництва легованих і високоякісних сталей. Наприклад, на підприємстві

ПрАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) експлуатуються електродугові печі малої та середньої місткості (приблизно 4–8 т (індукційні установки) та до 30 т (ДСП у сталеплавильному цеху)), які застосовуються для виплавки нержавіючих, інструментальних і жароміцних сталей. Після плавлення метал додатково обробляється в агрегатах «ківш-піч» та вакуумних установках, що забезпечує високу якість сталі.

Іншим великим прикладом є підприємство «Інтерпайп Сталь» (м. Дніпро), яке є сучасним електросталеплавильним комплексом. Тут використовуються потужні ДСП із ємністю приблизно 160 т, що дозволяє випускати до 1,3 млн тонн сталі на рік. Основною продукцією є безперервнолиті заготовки (білети) для трубної та колісної промисловості.

Також електросталеплавильні печі середньої та великої місткості застосовуються на підприємствах групи «Метінвест», зокрема на ПАТ «Запоріжсталь» та пов’язаних електросталеплавильних майданчиках, де частково використовуються ДСП та конвертерно-електросталеплавильні технології. Ємність таких агрегатів у світовій практиці зазвичай становить 100–150 т і більше, що забезпечує масове виробництво конструкційної сталі для будівництва та машинобудування.

Окремо слід відзначити підприємства спеціалізованої електрометалургії, такі як ПрАТ «Азовелектросталь» (м. Маріуполь (тимчасове окуповане)), де застосовуються ДСП ємністю приблизно 12–60 т, призначені для виробництва литих заготовок, фасонного литва та сталей для важкого машинобудування.

У світі великі електросталеплавильні комплекси, зокрема ArcelorMittal, ThyssenKrupp та Nippon Steel, використовують надпотужні дугові сталеплавильні печі (ДСП) ємністю приблизно 150–400 т, що забезпечує високу продуктивність, стабільну якість сталі та масову переробку металобрухту. Такі агрегати дозволяють ефективно поєднувати економічні та екологічні переваги електрометалургії, зменшуючи споживання природних ресурсів і рівень викидів CO_2.

Зокрема, компанія ArcelorMittal має електросталеплавильні та комбіновані комплекси в різних країнах світу, серед яких Люксембург (м. Люксембург), Німеччина (м. Бремен і Айзенхюттенштадт), Франція (м. Флоранж і Денкерк), Іспанія (м. Хіхон), Польща (м. Краків), а також США (м. Г'ярі, штат Індіана). На цих підприємствах використовуються потужні ДСП для переробки металобрухту та виробництва сортової і листової сталі.

Компанія ThyssenKrupp (thyssenkrupp Steel) зосереджує основні металургійні потужності в Німеччині, насамперед у місті Дуйсбург, яке є одним із найбільших сталеливарних центрів Європи. Тут експлуатуються великі електросталеплавильні та доменно-конвертерні комплекси, що забезпечують виробництво високоякісної сталі для автомобільної, будівельної та машинобудівної промисловості. Додаткові підрозділи та технологічні центри компанії також розташовані в інших містах Рурського регіону.

Nippon Steel Corporation має основні виробничі бази в Японії, зокрема в містах Кітакюсю (Yahata Works), Кіміцу (Kimitsu Works, м. Тіба), Оїта та Нагоя, де функціонують сучасні сталеплавильні комплекси з високим рівнем автоматизації. Крім того, компанія бере участь у міжнародних проєктах, зокрема спільному підприємстві в США (Calvert, штат Алабама) та в Індії, де також застосовуються потужні електросталеплавильні технології.

Таким чином, використання надпотужних ДСП у провідних металургійних компаніях світу дозволяє забезпечити великомасштабне виробництво сталі з високим рівнем енергоефективності та екологічної безпеки, що є ключовим напрямом розвитку сучасної електрометалургії.

1.4 Види та функціональні можливості вакуумно-дугових печей у металургії

Вакуумно-дугові печі (ВДП) належать до сучасних електрометалургійних агрегатів спеціального призначення, які використовуються для отримання високоякісних металів і сплавів із підвищеними вимогами до чистоти,

однорідності та експлуатаційних властивостей. Принцип їх роботи базується на переплаві витратного електрода в умовах глибокого вакууму за рахунок тепла електричної дуги, що дозволяє суттєво знизити вміст газових і неметалевих домішок у металі.

Залежно від конструктивних особливостей та способу ведення процесу, вакуумно-дугові печі поділяються на кілька основних типів. Найпоширенішими є печі з витратним електродом, у яких вихідний метал у вигляді електрода поступово плавиться електричною дугою і кристалізується у водоохолоджуваному кристалізаторі, утворюючи зливок. Саме цей тип є найбільш застосовуваним у промисловості, особливо для виплавки титанових, нікелевих і спеціальних жароміцних сплавів. Інший тип – печі з невитратним електродом, де дуга горить між графітовим електродом і металевою ванною. Такі установки використовуються рідше і переважно в лабораторних або спеціальних технологічних процесах.

Також вакуумно-дугові печі поділяють за конструкцією кристалізатора. У печах із нерухомим кристалізатором зливок формується у стаціонарній формі, що забезпечує простішу конструкцію та обслуговування. У більш сучасних установках застосовуються системи з рухомим кристалізатором, де зливок поступово витягується вниз у процесі кристалізації, що дозволяє покращити структуру металу та зменшити внутрішні дефекти.

Крім того, ВДП можуть бути промисловими, лабораторними або спеціальними. Промислові установки призначені для масового виробництва високоякісних сплавів, лабораторні використовуються для досліджень і розробки нових матеріалів, а спеціальні – для отримання металів для авіаційної, космічної та атомної промисловості.

Функціональні можливості вакуумно-дугових печей є надзвичайно широкими. Насамперед вони забезпечують глибоке рафінування металу завдяки плавленню у вакуумі, що дозволяє значно зменшити вміст кисню, азоту та водню. Це підвищує пластичність, ударну в’язкість і корозійну стійкість готових матеріалів. Крім того, у процесі переплаву досягається суттєве

зменшення неметалевих включень, що є критично важливим для відповідальних деталей.

Ще однією важливою функцією є отримання надчистих і високоякісних сплавів із контрольованою структурою. Завдяки регулюванню швидкості кристалізації та умов охолодження можна впливати на розмір зерна, зменшувати ліквацію та покращувати однорідність металу по всьому об'єму зливка. Це дозволяє отримувати матеріали з прогнозованими та стабільними властивостями.

Процес вакуумно-дугового переплаву (ВДП, VAR (Vacuum Arc Remelting)) (рис. 1.10) є одним із найефективніших методів отримання високоякісних металів і сплавів із підвищеними вимогами до чистоти та однорідності. Його суть полягає в повторному переплаві витратного електрода в умовах глибокого вакууму за рахунок тепла електричної дуги з подальшою кристалізацією металу у водоохолоджуваному кристалізаторі.

Процес починається з підготовки витратного електрода, який виготовляється з попередньо виплавленої сталі або сплаву. Цей електрод закріплюється у верхній частині вакуумної камери і поступово опускається в напрямку кристалізатора. Вся установка герметизується, після чого створюється глибокий вакуум, що дозволяє значно зменшити вміст газів (кисню, азоту та водню) у металевій фазі.

Після подачі електричного струму між кінцем електрода і рідким металом у зоні плавлення виникає електрична дуга. Під дією високої температури відбувається плавлення металу електрода, краплі якого капають у водоохолоджуваний кристалізатор. Там формується рідка металева ванна, яка поступово кристалізується знизу вгору.

Особливістю процесу є безперервне формування зливка з контрольованою швидкістю кристалізації. Завдяки цьому досягається рівномірна структура металу, зменшується ліквація (хімічна неоднорідність) та практично повністю усуваються усадочні раковини і внутрішні пори.

Вакуумне середовище відіграє ключову роль у процесі, оскільки воно

запобігає окисненню металу та сприяє видаленню розчинених газів. Це дозволяє отримувати сплави з наднизьким вмістом домішок, що особливо важливо для авіаційної, космічної, енергетичної та медичної промисловості.

Регулювання параметрів процесу, таких як сила струму, швидкість плавлення електрода та швидкість кристалізації, дозволяє впливати на структуру і властивості кінцевого зливка. Завдяки цьому можна отримувати матеріали з високою міцністю, в’язкістю та термостійкістю.



Рисунок 1.10 – Процес вакуммно-дугового переплаву

Вакуумно-дугові печі широко застосовуються для виробництва матеріалів, що працюють в екстремальних умовах. Зокрема, це титанові сплави для авіації, нікелеві жароміцні сплави для газових турбін, спеціальні сталі для енергетики, а також матеріали для атомної та космічної техніки. Такі матеріали повинні витримувати високі температури, значні механічні навантаження та агресивні середовища, що вимагає максимальної чистоти та структурної стабільності.

Таким чином, вакуумно-дугові печі є важливим елементом сучасної

металургії спеціальних сплавів. Вони забезпечують поєднання високого рівня очищення металу, точного контролю структури та можливості отримання матеріалів із унікальними експлуатаційними властивостями, що робить їх незамінними у високотехнологічних галузях промисловості.

1.5 Перспективні конструкції електросталеплавильних печей

Сучасний розвиток електросталеплавильного виробництва спрямований на вдосконалення конструкцій печей з метою підвищення енергоефективності, продуктивності та екологічної безпеки. Перспективні конструкції електропечей поєднують інноваційні інженерні рішення, автоматизацію процесів та використання нових матеріалів, що дозволяє зменшити витрати електроенергії та скоротити шкідливі викиди.

Одним із основних напрямів розвитку є сучасні електродугові сталеплавильні печі (EAF нового покоління) (рис. 11 та рис. 1.12), які є базовим агрегатом «зеленої металургії» в електросталеплавильному виробництві. Вони оснащуються системами автоматичного керування електричною дугою, регулювання положення графітових електродів, водоохолоджуваними панелями та дахами, а також інтелектуальними системами дозування та завантаження шихти. Додатково такі печі інтегруються з системами постійного моніторингу енергоспоживання, температури ванни та складу газів, що дозволяє оптимізувати процес плавлення в реальному часі.

До сучасних прикладів належать установки, що використовуються на підприємствах Nucor Corporation (США). Зокрема, це електродугові печі типу mini-mill EAF (Quantum EAF та Ultra High Power EAF), які характеризуються високою питомою потужністю (понад 600–1000 кВА/т), коротким часом плавки (близько 35–50 хвилин на плавку) та високим рівнем використання металобрухту (до 100%). Такі печі інтегровані з безперервними лініями розливання сталі та системами попереднього підігріву шихти, що суттєво знижує енергоспоживання та викиди CO_2.

У компанії Thyssenkrupp Steel Europe (Німеччина) впроваджуються сучасні електродугові агрегати високої потужності класу UHP EAF (Ultra High Power Electric Arc Furnace), які працюють у складі програм декарбонізації виробництва. Їх конструкція передбачає використання багатозонних систем подачі кисню, автоматизованих систем контролю шлакоутворення та оптимізованого керування електричною дугою. Основними характеристиками таких печей є висока енергоефективність, зниження питомої витрати електроенергії до 350–400 кВт·год/т сталі та можливість стабільної роботи з різними видами металобрухту.



Рисунок 1.11 – Електродугова сталеплавильна піч у процесі випуску сталі та видалення шлаку

Додатково слід зазначити, що сучасні EAF нового покоління відрізняються зниженим рівнем шуму, покращеною герметизацією робочої камери та інтегрованими системами аспірації, які дозволяють ефективно уловлювати пил безпосередньо в зоні утворення. Це значно підвищує екологічну безпеку виробництва та відповідає вимогам концепції «зеленої металургії».

Ще одним перспективним напрямом розвитку електросталеплавильного виробництва є використання печей із попереднім підігрівом металобрухту, зокрема систем типу Consteel, ECOARC та інших аналогічних технологій безперервного завантаження шихти. У таких конструкціях металобрухт транспортується до печі спеціальним конвеєром та попередньо нагрівається теплом відхідних газів. Це дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії, скоротити тривалість плавки та зменшити термічне навантаження на обладнання. Крім того, попередній підігрів шихти забезпечує більш стабільний тепловий режим і зменшує кількість пилу та газових викидів під час завантаження.



Рисунок 1.12 – Сучасна електродугова сталеплавильна піч у процесі випуску сталі

Технології Consteel широко застосовуються на металургійних підприємствах Італії, Туреччини, США та Китаю. Наприклад, італійська компанія Tenova є одним із провідних розробників таких систем. Її печі

використовуються на підприємствах Arvedi Group (Італія) та Çolakoğlu Metalurji (Туреччина). Основною перевагою цих установок є зниження питомого споживання електроенергії до 280–320 кВт·год/т сталі, що значно менше порівняно з традиційними електродуговими печами.

Важливе місце серед перспективних конструкцій займають вакуумні дугові печі та вакуумні індукційні печі нового покоління, які використовуються для виплавки високоякісних, жароміцних, корозійностійких і спеціальних сталей. Основною перевагою таких агрегатів є можливість плавлення металу у вакуумному середовищі, що дозволяє ефективно видаляти водень, азот, кисень та інші небажані домішки. Це забезпечує отримання металу з високою чистотою та однорідною структурою.

Сучасні вакуумні печі оснащуються автоматизованими системами контролю тиску, температури та хімічного складу металу. Вони активно використовуються в аерокосмічній, енергетичній та оборонній промисловості. Наприклад, компанія PCC Structurals (США) застосовує вакуумні індукційні печі для виробництва деталей авіаційних двигунів, а японські компанії Nippon Steel та Daido Steel використовують вакуумні технології для виплавки спеціальних легованих сталей і сплавів для високотехнологічного машинобудування.

Окремо слід відзначити індукційні печі нового покоління з високим коефіцієнтом корисної дії. Такі печі характеризуються компактністю, високою швидкістю нагріву та точним автоматизованим контролем температури. Вони забезпечують мінімальні втрати металу при плавленні та низький рівень шуму порівняно з електродуговими печами. Сучасні індукційні установки можуть працювати на середніх і високих частотах струму, що дозволяє адаптувати їх до різних типів сплавів.

Індукційні печі широко використовуються на підприємствах малого та середнього металургійного виробництва у Німеччині, Індії та Китаї. Наприклад, обладнання компанії ABP Induction (Німеччина) застосовується для плавлення високолегованих сталей та кольорових сплавів. Такі печі забезпечують високий

рівень енергоефективності та зменшення втрат електроенергії завдяки використанню сучасних інверторних систем живлення.

Перспективним напрямом також є гібридні електропечі, які поєднують електродуговий, індукційний та газокисневий нагрів. У таких системах частина теплової енергії генерується електричною дугою, а частина – киснево-паливними пальниками. Це дозволяє більш гнучко регулювати тепловий баланс плавки, зменшувати навантаження на електромережу та підвищувати продуктивність агрегату.

Подібні технології активно впроваджуються компаніями Danieli (Італія) та SMS group (Німеччина), які розробляють енергоефективні гібридні печі для сучасних електросталеплавильних комплексів (рис. 1.13). Такі установки особливо ефективні при роботі з різнорідною шихтою та вторинною сировиною, оскільки забезпечують стабільність процесу плавлення та зниження питомих витрат енергії.



Рисунок 1.13 – Електродугова піч від Danieli

2 «ЗЕЛЕНА МЕТАЛУРГІЯ» ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Декарбонізація промисловості

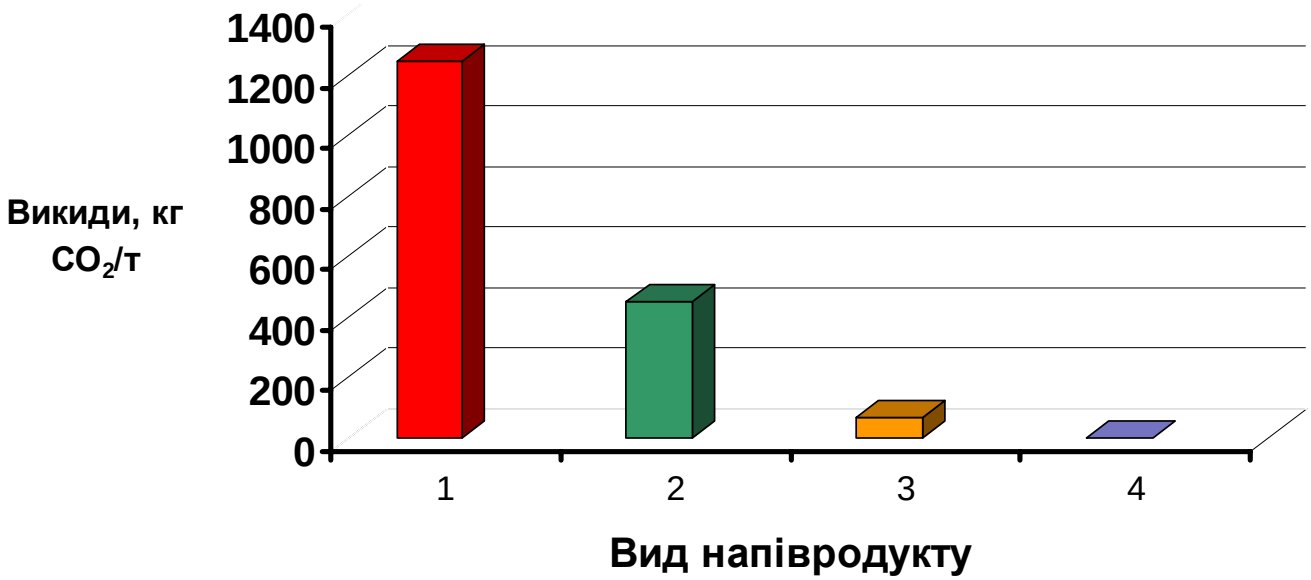
Декарбонізація планети – одна з цілей, яку країни по всьому світу поставили на 2050 рік. Для досягнення цього, декарбонізація виробництва такого елемента, як зелений водень, є одним із ключових факторів. Європейський Союз планує розширити масштаби проєктів з відновлюваного водню та інвестувати в них мільярди євро.

Декарбонізація металургійної галузі є ключовим фактором для досягнення глобальних цілей щодо нульових викидів CO_2. Основними факторами, які сприятимуть інвестиціям в галузь та збільшенню споживання екологічно чистої сталі, є правове регулювання в поєднанні з ціновими стимулами.

Так переробка 1 тонни металевого брухту скорочує 1,5 тонни викидів CO_2, а для брухту нержавіючої сталі цей показник зростає до 4 тонн, тобто щороку тільки європейська сталеливарна промисловість скорочує 132 мільйони тонн CO_2. Таким чином, Європейська сталеливарна промисловість перебуває на шляху до скорочення викидів вуглецю на 55% до 2030р. і досягнення кліматичної нейтральності до 2050р. відповідно до кліматичних цілей ЄС (Green Deal). При цьому з 2026р. передбачається запровадження спеціального «вуглецевого податку» на імпортовану продукцію в розмірі близько €50 на тонну емісії CO_2 з подальшим його зростанням до 2030р. до €80−90, включаючи вихідні матеріали та енергоносії. Це складає в середньому 8−10% собівартості виплавки 1 т якісної сталі.

Так згідно даним компанії Primetals Technologies рівень викидів вуглекислого газу при виплавці 1 тони переробного чавуну досягає 1250 кг

CO_2/т (рис. 2.1).



1 – чавун; 2 – DRI (на основі CH_4); 3 – DRI (на основі H_2); 4 – металобрухт

Рисунок 2.1 – Рівень викидів вуглекислого газу при отриманні напівпродукту

В металургійному секторі рух з декарбонізації дуже помітний: найбільші інжинірингові організації та інститути включилися у розробку альтернативних методів виплавки та прокатування металів та сплавів, а деякі провідні виробники сталі (SSAB, Tata Steel, ArcelorMittal та інші) навіть розпочали випуск «зеленої сталі» на своїх активах.

Розповсюджені проєкти зі створення підприємств, що працюють на металізованій сировині, виробленій прямим відновленням оксидів заліза воднем, отриманим за допомогою відновлюваних джерел енергії (вітру, сонцю, води та ін.). Безпосередньо на підприємствах SSAB, Nippon Steel, Thyssen Krupp, Voestalpine, Posco, Arcelor Mittal, British Steel та інших проєктуються і будуються виробничі лінії, що працюють за технологічними схемами, в основі яких лежить пряме відновлення заліза – DRI.

Перспективним напрямом декарбонізації металургії також є збільшення частки електросталеплавильного виробництва, яке характеризується нижчим рівнем викидів CO_2 порівняно з традиційним доменним процесом. Особливо ефективним є використання електродугових печей при переробці металобрухту,

що дозволяє суттєво знизити споживання природних ресурсів та енергоносіїв. Важливу роль у зменшенні негативного впливу на довкілля відіграє впровадження сучасних систем газоочистки, аспірації та утилізації вторинних енергоресурсів. Значна увага приділяється також підвищенню енергоефективності металургійного обладнання, автоматизації виробничих процесів та оптимізації витрат електроенергії. У країнах Європейського Союзу активно підтримуються інноваційні проєкти, спрямовані на використання відновлюваних джерел енергії у металургійному виробництві та скорочення вуглецевого сліду готової продукції. Усе це свідчить про поступовий перехід світової металургії до екологічно безпечних і ресурсозберігаючих технологій виробництва сталі.

2.2 Екологічні проблеми електросталеплавильного виробництва

2.2.1 Сучасний стан та впровадження технологій «зеленої металургії» в електросталеплавильному виробництві України

Електросталеплавильне виробництво в Україні є одним із ключових джерел техногенного навантаження на довкілля, особливо у промислових регіонах із високою концентрацією металургійних підприємств, таких як Дніпропетровська, Запорізька та Донецька області. Основними екологічними проблемами залишаються викиди пилу та дрібнодисперсних частинок, що утворюються під час завантаження металобрухту, плавлення в дугових сталеплавильних печах та випуску сталі. Додатково значний вплив мають викиди оксидів вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x) та інших газоподібних сполук, що формуються при високотемпературних процесах.

Однією з суттєвих проблем залишається недостатня ефективність або зношеність систем газоочистки на окремих підприємствах. На застарілих виробництвах системи аспірації не завжди забезпечують повне уловлювання

пилу, що призводить до локального забруднення повітря та можливого перевищення гранично допустимих концентрацій у робочій зоні.

Водночас в Україні поступово впроваджуються технології «зеленої металургії», спрямовані на зменшення екологічного навантаження. Зокрема, сучасний електросталеплавильний комплекс «Інтерпайп сталь» (м. Дніпро) (рис. 2.2) є прикладом підприємства нового покоління, де застосовуються електродугові печі, замкнуті цикли водопостачання, сучасні системи газоочистки та аспірації. Це дозволяє значно знизити викиди пилу і газів, а також скоротити споживання природних ресурсів. Важливим етапом модернізації стало також закриття застарілого мартенівського виробництва, що суттєво зменшило рівень забруднення в регіоні. Електродугова піч в умовах «Інтерпайп сталь» 3-х фазна дугова змінного струму з еркерним випуском плавки, її ємність 186 т, ємність при випуску 160 т, технологічний залишок металу у печі 26 т, тривалість плавки 53 хв., кількість плавок на добу 27.



Рисунок 2.2 – Електродугова піч в умовах «Інтерпайп сталь»

Ще одним прикладом є підприємство ТОВ «Електросталь-Курахове» (м. Курахове, Донецька область (тимчасово окуповане)), де впроваджено електродугові печі, установки позапічної обробки сталі та ефективні системи газоочистки з рукавними фільтрами. Такі технології забезпечують зниження запиленості відхідних газів до рівнів, що відповідають сучасним екологічним вимогам, та дозволяють частково мінімізувати вплив виробництва на довкілля.

Крім того, на окремих підприємствах електросталеплавильного профілю впроваджуються сучасні системи очищення газів, вторинного димовидалення та автоматизованого контролю викидів, що сприяє стабільному дотриманню нормативів якості повітря в промислових зонах.

Важливим напрямом розвитку «зеленої металургії» також є широке використання металобрухту як основної сировини для електросталеплавильних процесів. Це відповідає принципам циркулярної економіки, зменшує потребу у видобутку первинної сировини та сприяє зниженню енергоспоживання і викидів CO_2 порівняно з доменним виробництвом.

Таким чином, попри наявні екологічні проблеми, в Україні вже сформовано реальні приклади впровадження технологій «зеленої металургії», зокрема на підприємствах «Інтерпайп сталь» та ТОВ «Електросталь-Курахове», що свідчить про поступовий перехід електросталеплавильного виробництва до більш екологічно безпечної та енергоефективної моделі розвитку.

2.2.2 Сучасний стан та впровадження технологій «зеленої металургії» в електросталеплавильному виробництві зарубіжних країн

У розвинених країнах світу електросталеплавильне виробництво також є одним із ключових напрямів реалізації концепції «зеленої металургії», що передбачає мінімізацію викидів CO_2, підвищення енергоефективності та широке використання вторинної сировини. Основою цього переходу є електродугові печі нового покоління, цифровізація виробництва, системи

уловлювання та очищення газів, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії.

Так Німеччина є одним із лідерів у сфері декарбонізації металургії. Значний внесок робить компанія Thyssenkrupp Steel Europe, яка впроваджує технології скорочення викидів CO_2, зокрема використання водню в рамках проєктів прямого відновлення заліза (DRI). Також підприємства Salzgitter AG реалізують програму SALCOS (Salzgitter Low CO_2 Steelmaking), яка передбачає перехід до електросталеплавильного виробництва з використанням «зеленого» водню та електроенергії з відновлюваних джерел.

У США активно розвивається електросталеплавильний сектор на базі компаній Nucor Corporation та Steel Dynamics Inc. Ці підприємства використовують переважно металобрухт як сировину та електродугові печі, що дозволяє суттєво зменшити вуглецевий слід у порівнянні з доменним виробництвом. Nucor є одним із найбільших виробників «зеленої сталі» у Північній Америці, а також активно інвестує у відновлювану енергетику для живлення своїх виробничих потужностей.

Американська металургія стала «зеленою» (рис. 2.3) задовго до того, як у ЄС та інших країнах почали говорити про перехід на більш екологічні технології виробництва сталі. За словами віцепрезидента Асоціації виробників сталі (SMA) Брендона Фарріса, сьогодні сталеві виробники США на 75–320 % більш вуглецевоефективні, ніж глобальні ринки. Варто уточнити, що це усереднений показник, який враховує роботу металургійних комбінатів за традиційною технологією BF-BOF. Викиди CO_2 у заводів на R-EAF scrap based знаходяться в межах 0,39–0,8 т на 1 т сталі. Тобто відповідають нинішнім екологічним стандартам. А таких заводів у США переважна більшість.

Китай, як найбільший виробник сталі у світі, активно модернізує металургійну галузь. Компанії Baowu Steel Group та HBIS Group впроваджують електродугові печі, системи енергоощадження та технології уловлювання викидів. Китайська стратегія передбачає скорочення частки доменного

виробництва та збільшення частки електросталі, а також досягнення піку викидів CO_2 у металургії з подальшим їх зниженням.

Туреччина є одним із найбільш електросталеплавильних ринків у світі, де значна частина сталі виробляється саме в електродугових печах. Компанії Erdemir та İsdemir активно модернізують виробництво, впроваджуючи сучасні системи фільтрації, енергоефективні печі та технології повторного використання металобрухту. Це дозволяє країні утримувати конкурентоспроможність при відносно нижчому рівні викидів порівняно з доменними технологіями.



Рисунок 2.3 – Американська «зелена» металургія

У Швеції одним із найпередовіших проєктів є ініціатива HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology), реалізована компаніями SSAB, LKAB та Vattenfall. Технологія базується на використанні «зеленого» водню замість вуглецю в процесі прямого відновлення заліза, у результаті чого єдиним побічним продуктом є водяна пара замість вуглекислого газу. Отриманий напівпродукт (губчасте залізо) надалі переплавляється в електродугових печах, що дозволяє отримувати сталь із практично нульовим вуглецевим слідом. Дана

технологія вже проходить етапи промислового впровадження та вважається однією з найперспективніших у світі.

У цілому для світової металургії характерні наступні тенденції:

– перехід від доменних процесів до електросталеплавильних технологій;

– зростання частки вторинної сировини (металобрухту);

– інтеграція відновлюваних джерел енергії у виробництво;

– впровадження систем уловлювання CO_2 та цифрового моніторингу викидів;

– розвиток концепції циркулярної економіки.

2.3 Технології та інновації для екологізації електросталеплавильних процесів

Екологізація електросталеплавильного виробництва сьогодні базується на комплексному впровадженні інженерних, цифрових та організаційних рішень, спрямованих на зменшення енергоспоживання, скорочення викидів та підвищення загальної ефективності процесів.

Одним із ключових напрямів є впровадження інтелектуальних систем керування електродуговими печами. Сучасні системи автоматизації дозволяють у режимі реального часу регулювати потужність дуги, положення електродів, подачу кисню та шихти. Це забезпечує стабільність процесу плавлення, зменшує коливання температури та знижує утворення надлишкових оксидів і пилу.

Важливим інноваційним напрямом є використання попереднього підігріву металобрухту. Спеціальні установки дозволяють нагрівати шихту за рахунок тепла відхідних газів перед завантаженням у піч. Це зменшує енергоспоживання під час плавлення, скорочує тривалість циклу та знижує навантаження на електричну мережу.

Окрему роль відіграє вдосконалення матеріалів футерівки печей. Використання сучасних вогнетривких матеріалів із підвищеною стійкістю до

термічних і хімічних впливів дозволяє збільшити строк служби обладнання, зменшити кількість ремонтів та відповідно скоротити утворення відходів.

Перспективним напрямом є також впровадження систем безперервного екологічного моніторингу. Такі системи здійснюють контроль концентрації пилу, газів, температури та шумового навантаження в режимі онлайн. Отримані дані інтегруються у цифрові платформи управління підприємством, що дозволяє оперативно реагувати на перевищення нормативів.

Ще одним важливим рішенням є оптимізація енергоспоживання через балансування навантаження електромережі. Сучасні електросталеплавильні цехи використовують системи компенсації реактивної потужності та накопичення енергії, що зменшує пікові навантаження та підвищує стабільність енергосистеми.

Додатково впроваджуються технології вторинного використання побічних продуктів виробництва, зокрема металургійних шлаків і пилу газоочистки. Вони можуть застосовуватися у виробництві будівельних матеріалів, цементу або дорожнього покриття, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Таким чином, сучасні технології екологізації електросталеплавильного виробництва охоплюють весь виробничий цикл – від підготовки сировини до утилізації відходів. Їх впровадження дозволяє значно зменшити вплив на довкілля, підвищити ресурсоефективність і забезпечити перехід до сталого розвитку металургійної галузі.

2.4 Використання вторинної сировини та принципи циркулярної економіки

Сучасний розвиток електросталеплавильного виробництва тісно пов’язаний із впровадженням принципів циркулярної економіки, які передбачають максимальне повторне використання матеріальних ресурсів та мінімізацію утворення відходів. У цьому контексті ключову роль відіграє

використання вторинної металургійної сировини, насамперед металобрухту, як основного джерела заліза для виплавки сталі в електродугових печах.

Застосування металобрухту дозволяє суттєво зменшити потребу у видобутку та первинній переробці залізної руди, що, у свою чергу, скорочує енергетичні витрати та обсяг викидів парникових газів. Крім того, переробка вторинної сировини потребує значно менших ресурсів порівняно з традиційними доменними процесами, що робить електросталеплавильне виробництво більш екологічно доцільним.

Важливим елементом циркулярної моделі є сортування та підготовка металобрухту, що включає видалення неметалевих домішок, класифікацію за хімічним складом та розміром. Це забезпечує стабільність технологічного процесу плавлення, підвищує якість кінцевої продукції та зменшує утворення шкідливих газів і шлаків.

Окрему увагу приділяють повторному використанню побічних продуктів виробництва. Металургійні шлаки, пил газоочистки та інші відходи можуть бути перероблені і застосовані у будівельній індустрії, зокрема у виробництві цементу, бетону, дорожніх матеріалів та засипних сумішей. Такий підхід зменшує обсяги промислових відвалів і знижує екологічне навантаження на довкілля.

Принципи циркулярної економіки також передбачають подовження життєвого циклу матеріалів і обладнання, що реалізується через ремонт, модернізацію та повторне використання металургійних компонентів. Це дозволяє зменшити кількість промислових відходів та підвищити ресурсну ефективність виробництва.

Таким чином, використання вторинної сировини в електросталеплавильному виробництві є одним із ключових чинників переходу до «зеленої металургії». Воно забезпечує зменшення екологічного навантаження, підвищення енергоефективності та формування сталого виробничого циклу, що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку металургійної галузі.

3 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В ЕЛЕКТРОПЕЧАХ

3.1 Характеристика продукції та технологічних способів виплавки сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Електросталеплавильний цех ПрАТ «Дніпроспецсталь» спеціалізується на виробництві широкого сортаменту високоякісних сталей і сплавів, зокрема конструкційних, інструментальних, нержавіючих, жароміцних та підшипникових сталей. Основною продукцією цеху є леговані та високолеговані марки сталі, що використовуються у машинобудуванні, енергетиці, авіаційній, хімічній та оборонній промисловості. Виплавка сталі здійснюється в сучасних дугових сталеплавильних печах із застосуванням ефективних технологій рафінування та позапічної обробки металу, що забезпечує високу якість готової продукції та відповідність міжнародним стандартам.

Особливе місце у сортаменті продукції ПрАТ «Дніпроспецсталь» займають конструкційні леговані сталі, які широко застосовуються для виготовлення відповідальних деталей і вузлів, що працюють в умовах високих механічних та температурних навантажень. Саме тому до таких сталей висуваються підвищені вимоги щодо міцності, пластичності, ударної в’язкості, прокалюваності та експлуатаційної надійності. До основних конструкційних марок сталей, що виплавляються в умовах підприємства, належать сталі типу 25–30ХГСА, 38ХС, 30ХГСН2А, 30ХГСН2МА, 12–23Х2НВ(М)ФА, 30ХГСН2МА-ВД, 40ХН2СВА-ВД, КВК-37ВД, 40ХН2СМА-ВД, КВК-32, КВК-26, КВК-42ВД, 12–30Х2НВФА, 12–30Х2НМФА, 20ХГСН2МФА-Ш, 12Х2НВМФА, 12Х2НМ1Ф, 18Х2Н4В(М)А та 30Х3В(М) (рис. 3.1). Вказані марки сталей характеризуються підвищеними вимогами до механічних властивостей, чистоти металу та стабільності хімічного складу.

Виплавка сталі в електросталеплавильному цеху здійснюється кількома технологічними способами залежно від вимог до якості готової продукції та особливостей технологічного процесу (рис. 3.1). До основних методів належать: виплавка з повним окисленням; виплавка переплавом із використанням кисню; виплавка у відкритих дугових сталеплавильних печах із подальшим рафінуванням металу в печі.

Застосування різних способів виплавки дозволяє забезпечити необхідний рівень очищення металу від домішок, знизити вміст газів і неметалевих включень, а також отримувати сталі з високими експлуатаційними характеристиками.

Для забезпечення високої якості металу в технологічному процесі також застосовуються позапічна обробка сталі на установках «піч-ківш» та вакуумування, що дозволяє додатково зменшити вміст шкідливих домішок, газів і неметалевих включень. Комплексне використання сучасних електросталеплавильних технологій забезпечує отримання конструкційних сталей із високими механічними властивостями, необхідними для експлуатації в умовах значних навантажень і підвищених температур.



Рисунок 3.1 – Технологічні методи виплавки високоякісної конструкційної сталі

Значна увага в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» приділяється

автоматизації технологічних процесів, контролю параметрів плавки та застосуванню сучасних систем керування виробництвом. Використання високоефективного обладнання та сучасних технологій дозволяє підприємству випускати конкурентоспроможну металопродукцію, що відповідає вимогам вітчизняних і міжнародних стандартів якості.

3.2 Технологічна схема роботи електросталеплавильного цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Електросталеплавильний цех ПрАТ «Дніпроспецсталь» являє собою складний виробничий комплекс, до складу якого входять шихтовий, пічний та розливний прольоти. Організація роботи цеху забезпечує безперервність технологічного процесу виплавки, позапічної обробки та розливання сталі (рис. 3.2 та рис. 3.3).

Шихтовий проліт призначений для приймання, зберігання, підготовки та подачі шихтових матеріалів до плавильних агрегатів. У ньому розташовані шихтові ями, дробарки, а також грейферні та магнітогрейферні крани, які використовуються для транспортування металобрухту та інших матеріалів. Металева шихта надходить у цех залізничним транспортом у контейнерах або навалом, після чого сортується за видами та габаритами й завантажується у завалочні кошики-бадді. Крім металобрухту, до складу шихти входять феросплави, окислювачі, шлакоутворюючі та легуючі матеріали, які забезпечують отримання необхідного хімічного складу сталі.

Після зважування баддя за допомогою передавального візка транспортується до пічного прольоту, де завалочним краном подається до електродугової печі. Після відкривання склепіння печі виконується завалка шихти та починається процес плавлення металу. Плавлення супроводжується утворенням високотемпературної електричної дуги між графітовими електродами та металевою шихтою, що забезпечує інтенсивне нагрівання і швидке розплавлення матеріалів.

Пічний проліт є основною виробничою ділянкою цеху. У ньому встановлено три дугові сталеплавильні печі типу ДСВ-50 із плановою продуктивністю близько 9,8 т/год, дві установки «піч-ківш», вакууматор фірми Mannesmann Demag, а також обладнання для сушіння феросплавів. Під час плавки відбувається розплавлення шихти, окислювальний період із видаленням шкідливих домішок, а також введення феросплавів і шлакоутворюючих матеріалів. Для інтенсифікації процесу використовуються кисень та сучасні системи автоматичного регулювання електричного режиму печей.

Після випуску металу з печі сталь надходить у ківш, де проводиться позапічна обробка на установці «піч-ківш». На цьому етапі здійснюється коригування хімічного складу, розкислення металу та рафінування. Позапічна обробка дозволяє підвищити однорідність сталі, зменшити вміст сірки, кисню та інших небажаних домішок. Для отримання високоякісних сталей ківш додатково подається на вакууматор, де з металу видаляються розчинені гази та неметалеві включення. Вакуумна обробка є особливо важливою при виробництві відповідальних конструкційних та спеціальних марок сталі.

Після завершення вакуумної обробки готову сталь транспортують розливним краном до розливного прольоту, де здійснюється її розливання у виливниці через шиберний затвор. У цеху використовуються виливниці місткістю 3,825; 4,03; 6,67 та 7,15 т. Під час розливання важливе значення має дотримання температурного режиму та швидкості подачі металу, що впливає на формування структури та якість зливків.

Розливний проліт забезпечує своєчасне та якісне розливання сталі, а також підготовку ковшів і виливниць до подальшої роботи. У його складі функціонують ділянки ремонту та сушіння ковшів, двір виливниць і стриперне відділення. Для виконання транспортних операцій встановлено два мостові крани. Після кристалізації сталі зливки направляються на подальшу термічну та механічну обробку.

Крім основних виробничих дільниць, до складу електросталеплавильного цеху входять допоміжні відділення та інженерні системи, призначені для

забезпечення виробництва електроенергією, водою, киснем, стисненим повітрям та іншими енергоресурсами. Значна увага приділяється роботі систем газоочистки та аспірації, які забезпечують уловлювання пилу та очищення відхідних газів від шкідливих речовин. Для стабільної роботи обладнання використовуються системи водяного охолодження печей, трансформаторів і газовідвідних трактів.

Важливу роль у функціонуванні цеху відіграють автоматизовані системи керування технологічними процесами, які дозволяють контролювати параметри плавки, витрати електроенергії, температуру металу та склад газового середовища. Це забезпечує підвищення продуктивності виробництва, покращення якості сталі та зниження енерговитрат.

3.3 Розрахунок потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху

Розрахунок потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху є важливим етапом проєктування та організації металургійного виробництва. Його виконують з метою визначення необхідної кількості та продуктивності технологічного обладнання, яке забезпечує безперервне та ефективне функціонування цеху відповідно до заданої виробничої програми.

Під час розрахунку визначають кількість дугових сталеплавильних печей, установок «піч-ківш», вакууматорів, розливного обладнання, кранів, шихтових механізмів та допоміжних агрегатів. Основою для таких розрахунків є річна продуктивність цеху, тривалість плавки, час позапічної обробки, режим роботи обладнання та коефіцієнт його завантаження.

Правильний розрахунок устаткування безпосередньо впливає на продуктивність електросталеплавильного виробництва, рівномірність технологічного процесу та економічну ефективність роботи підприємства. Недостатня кількість обладнання може призводити до простоїв, порушення ритму роботи та зниження обсягів виплавки сталі, тоді як надлишкова кількість

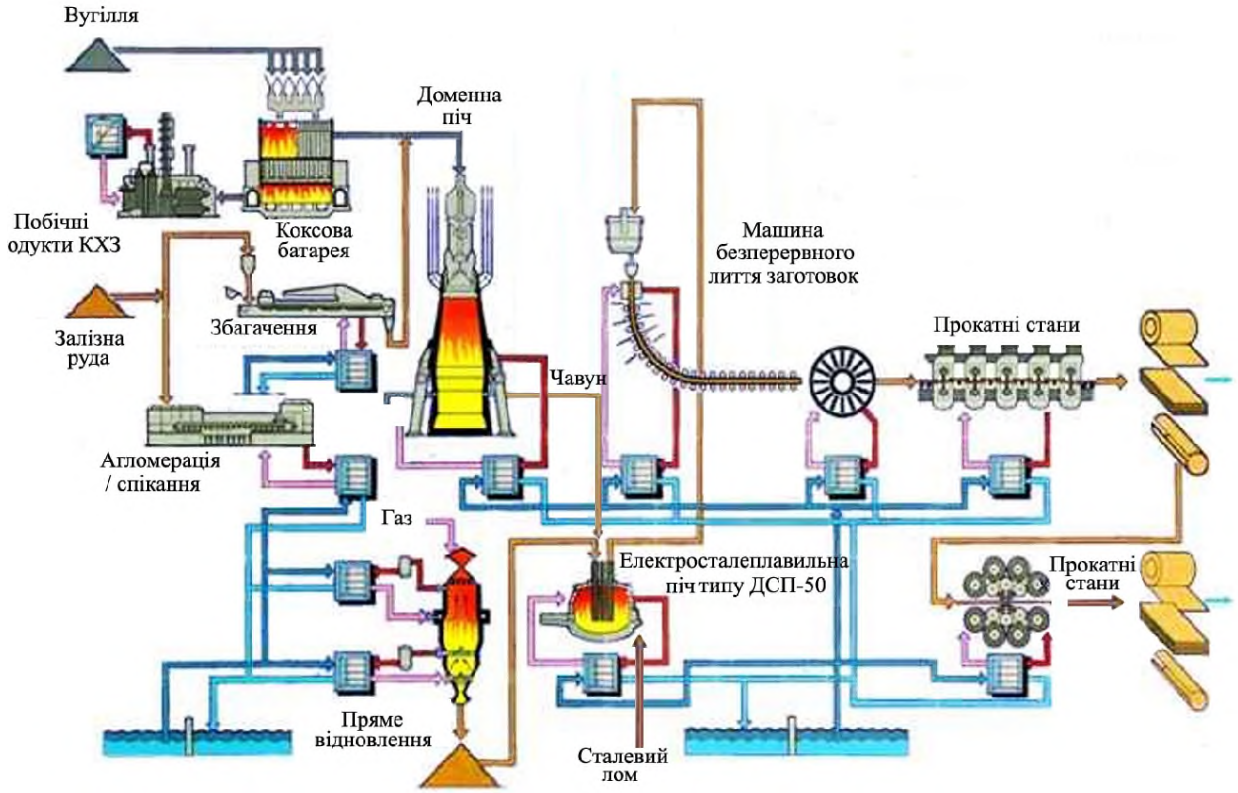


Рисунок 3.2 – Схема організації технологічного процесу виробництва електросталі

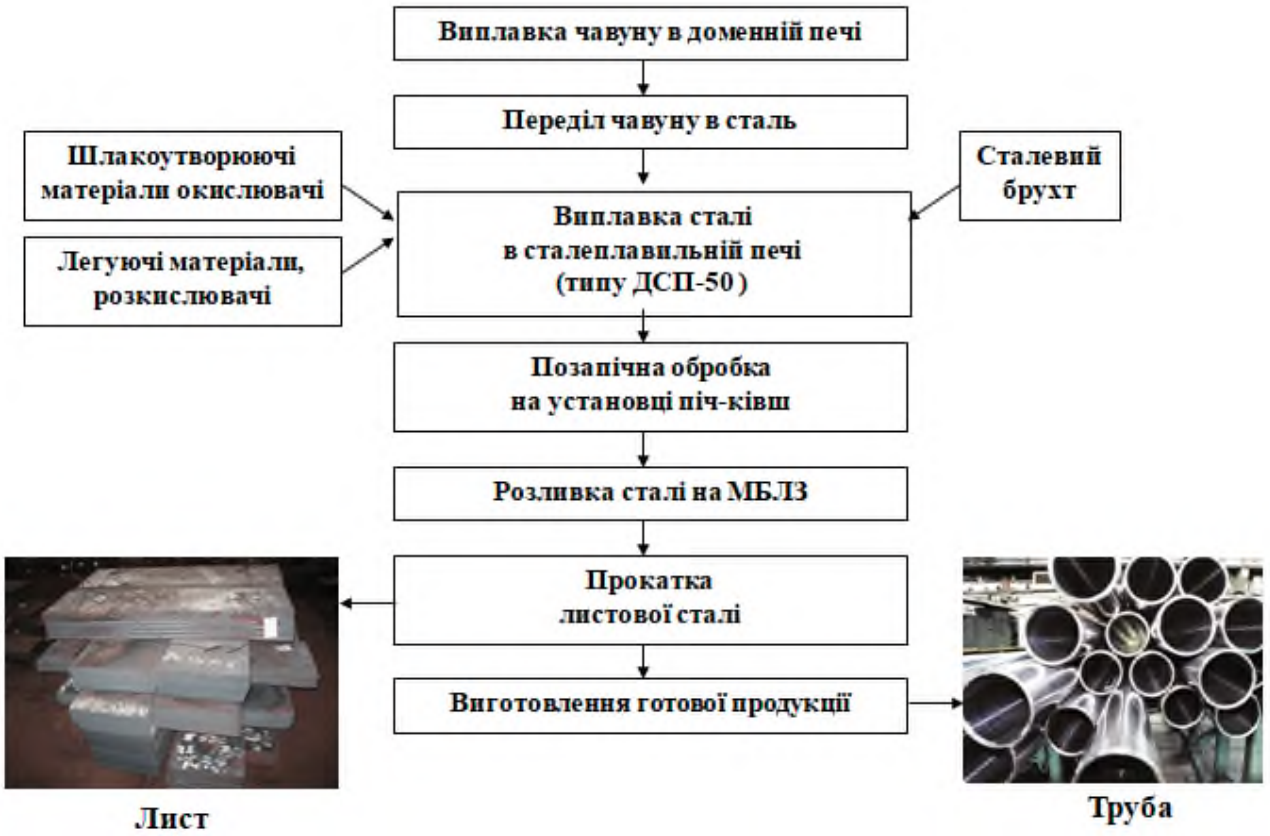


Рисунок 3.3 – Технологічна схема виробництва електросталі

агрегатів збільшує капітальні витрати, енергоспоживання та витрати на обслуговування.

Крім того, розрахунок потреби в обладнанні дозволяє визначити оптимальну структуру цеху, раціонально організувати транспортні потоки шихтових матеріалів і готової продукції, а також забезпечити узгоджену роботу всіх виробничих дільниць. Важливе значення це має і для забезпечення охорони праці та техногенної безпеки, оскільки правильне розміщення та завантаження обладнання сприяє зменшенню аварійних ситуацій і покращенню умов праці персоналу.

У сучасних умовах розрахунок основного устаткування також враховує вимоги енергоефективності, автоматизації та екологічної безпеки виробництва. Це дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії, знизити втрати металу та скоротити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Таким чином, обґрунтований вибір і розрахунок основного устаткування є одним із ключових факторів ефективної роботи електросталеплавильного цеху.

Вихідні дані для визначення потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні данні для визначення потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху

Ємність дугової сталеплавильної печі, т	50
Номінальна потужність трансформатора, МВА	24
Тривалість плавки, год.	2,50
Тривалість розплавлення, год.	1

Кількість мостових завалочних кранів (n) визначається з метою забезпечення безперервного та своєчасного обслуговування електросталеплавильних печей, транспортування шихтових матеріалів і

виконання завалочних операцій у межах заданої продуктивності цеху та розраховується за формулою:

$$n = \frac{A \cdot \sum \cdot k}{1440 \cdot b},$$

де А – число завалок (плавок) на добу, шт./діб.;

∑ – заборгованість машини (тривалість завалки) на одну плавку, хв./пл.;

К – коефіцієнт нерівномірності, що враховує можливість збігу завалки на декількох печах (1–1,3);

b – коефіцієнт використання машини (0,8);

1440 – число хвилин у добі, хв./діб.

Завантаженість крана (∑) визначається сумарними витратами часу на виконання основних технологічних та допоміжних операцій у процесі обслуговування електросталеплавильних печей. До основних операцій належать:

– завантаження шихти – витрати кранового часу на подачу одного завалочного кошика з днищем із гнучких секторів, що включає підйом кошика з передавального візка, його встановлення на робочому майданчику, подальше завантаження шихти в піч та виконання зворотних операцій. Тривалість таких операцій становить у середньому 12–15 хв. Додатково близько 15 хв витрачається на складання днища кошика. У сучасних електросталеплавильних цехах при використанні швидкохідних мостових кранів і завалочних кошиків грейферного типу тривалість операції скорочується до 6–7 хв;

– заправлення печі за допомогою центробіжної машини – 7–10 хв;

– заміна електродів – 5–6 хв;

– перепускання двох електродів – 1–2 хв;

– допоміжні операції, до яких належать заміна склепіння печі, транспортування електродів, обслуговування діючих печей та інші технологічні

роботи. Орієнтовна тривалість зайнятості крана на виконання таких операцій становить 20–30 хв на одну плавку.

∑ приймаємо 62 хв.

Приймаємо k рівним 1,05.

$$n = \frac{A \cdot \sum \cdot k}{1440 \cdot b} = \frac{10 \cdot 62 \cdot 1{,}05}{1440 \cdot 0{,}8} \approx 1{,}0 .$$

n= 0,577 приймаємо 1 мостовий завалочний кран.

Кількість завалочних кошиків при одноразовому завантаженні шихти визначається відповідно до кількості печей, установлених у електросталеплавильному цеху. У разі здійснення завалки шихти у два прийоми для кожної печі передбачається використання двох кошиків.

Відповідно до рекомендацій Гіпромеза, кількість передавальних візків для транспортування кошиків та поперечних передавальних шляхів у сучасних електросталеплавильних цехах повинна відповідати числу плавильних агрегатів. Таким чином, для цеху з трьома печами необхідно передбачити три робочі завалочні кошики та один резервний, тобто загалом чотири кошики.

Кількість кранових і безрейкових мульдозавалочних машин визначається за формулою (1.30):

$$n = \frac{A \sum k}{1140 \cdot b} = \frac{10 \cdot 72 \cdot 1{,}3}{1440 \cdot 0{,}8} \approx 1{,}0.$$

Кількість мульд з шихтою:

$$n = \frac{Q_{\text{пл}}}{V_M \cdot q}$$

де $Q_{пл}$ – витрата того чи іншого шихтового матеріалу на одну плавку, т/пл;

$V_м$ – об'єм однієї мульди, $м^3$;

q – насипна маса матеріалу в мульді, $т/м^3$.

При цьому завантаженість машини під час подачі однієї мульди визначається сумарними витратами часу на виконання основних операцій, а саме: установку мульди в прокалювальну піч, що займає близько 3 хв., та подальше завантаження мульди в піч тривалістю 2–3 хв. Ємність мульд, які використовуються в електросталеплавильному цеху, становить 0,6 м³. Розрахунок необхідної кількості мульд здійснюється для однієї плавильної печі.

$$n_{FeMn} = \frac{0.030}{0{,}6 \cdot 3} \approx 1,$$

$$n_{FeSi} = \frac{0{,}0473}{0{,}6 \cdot 2{,}5} \approx 1,$$

$$n_{FeCr} = \frac{0{,}3844}{0{,}6 \cdot 4} \approx 1.$$

Крани шихтового прольоту призначені для розвантаження сталевого брухту та чавуну, що надходять навалом у залізничних вагонах, у ямні бункери з подальшим завантаженням шихти в завалочні кошики за допомогою електромагнітів. Крім того, вони використовуються для завантаження металобрухту в кошики з контейнерів.

Кількість кранів, необхідних для завантаження кошиків електромагнітами, визначається за формулою:

$$n = \frac{Q_c \sum k}{1140 \cdot b},$$

$$n_{\text{лома}} = \frac{1500 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}15}{1140 \cdot 0{,}8} = 2,$$

$$n_{\text{извести}} = \frac{7{,}050 \cdot 1{,}4 \cdot 1{,}15}{1140 \cdot 0{,}8} = 9,$$

$$n_{\text{п.шпат}} = \frac{0{,}0478 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}15}{1140 \cdot 0{,}8} = 0{,}3,$$

$$n_{\text{магн.порошка}} = \frac{2{,}250 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}15}{1140 \cdot 0{,}8} = 1{,}3.$$

Кількість шихтових кранів у електросталеплавильному цеху приймається рівною чотирьом одиницям, що забезпечує своєчасне виконання операцій із розвантаження, сортування та подачі шихтових матеріалів до плавильних агрегатів.

Кількість мостових (ливарних) кранів у розливному прольоті визначається розрахунковим шляхом із урахуванням коефіцієнта нерівномірності роботи обладнання. Для електросталеплавильного цеху з двома встановленими печами значення коефіцієнта нерівномірності приймають рівним 1,2. Розрахунок виконується з урахуванням загальної зайнятості крана на обслуговування однієї плавки.

Завантаженість ливарного крана визначається витратами часу на виконання основних технологічних і допоміжних операцій. До таких операцій належать:

– транспортування ковша зі сталевоза та його встановлення на стенд позапічної обробки, що займає приблизно 3 хв;

– міжплавочна підготовка ковша, під час якої кран виконує близько п’яти перестановок ковша тривалістю 3–4 хв кожна;

– прибирання та транспортування шлакових ковшів. У процесі видалення шлаку кран виконує перестановку шлакового ковша зі шлакового візка на стенд, а потім на шлаковоз для вивезення з цеху, після чого здійснюються зворотні операції з порожнім ковшем. Загалом виконується чотири перестановки тривалістю близько 3 хв кожна;

– допоміжні операції, пов’язані з обслуговуванням установок позапічної обробки сталі, транспортуванням вогнетривких матеріалів, обладнання та виконанням інших виробничих робіт. Орієнтовна зайнятість крана на

виконання допоміжних операцій становить 10–20 хв на одну плавку.

Важливим елементом технологічного процесу є вакуумна обробка сталі, тому кількість установок для вакуумування визначається залежно від частки сталей, що потребують такої обробки у загальному сортаменті продукції. Під час розрахунку враховується, що тривалість вакуумування одного ковша становить близько 20 хв, а підготовка вакуумної установки до приймання наступного ковша займає орієнтовно 30 хв.

Правильне визначення кількості мостових ливарних кранів та вакуумних установок має важливе значення для забезпечення безперервності технологічного процесу, скорочення простоїв обладнання та своєчасного виконання операцій із позапічної обробки й розливання сталі. Крім того, раціональний вибір вантажопідіймального обладнання сприяє підвищенню продуктивності електросталеплавильного цеху, покращенню умов праці персоналу та забезпеченню безпечної експлуатації виробничих дільниць.

Кількість мостових (ливарних) кранів у розливному прольоті визначається за формулою:

$$n = \frac{30 \cdot 51 \cdot 1{,}2}{1140 \cdot 0{,}8} \approx 2.$$

Приймаємо 2 мостових крани.

Обсяг бункерів для зберігання шихтових матеріалів визначають за формулою:

$$V = \frac{(Q_c K_з)}{qh},$$

де Q_c – добова витрата матеріалу, т/діб;

q – величина насипної маси матеріалу в бункері т/м^3;

Кз – норма запасу матеріалу в бункері, число діб;

h – коефіцієнт заповнення бункера, рівний 1,2 для металевої шихти й 0,8 для сипучих матеріалів.

$$V_{\text{лома}} = \frac{1500 \cdot 2}{2 \cdot 1.2} = 1250 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{вапно}} = \frac{7{,}05 \cdot 2}{0{,}8 \cdot 0{,}8} = 22 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{п.шпат}} = \frac{0{,}0478 \cdot 5}{0{,}8 \cdot 1.7} = 1{,}75 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{маг.порошок}} = \frac{2{,}25 \cdot 5}{0{,}8 \cdot 1{,}9} = 7{,}4 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{лома}} = \frac{1500 \cdot 2}{2 \cdot 1.2} = 1250 \text{ м}^3.$$

Феросплави, зокрема феромарганець (FeMn), феросиліцій (FeSi) та ферохром (FeCr), доцільно зберігати на спеціалізованому цеховому складі, оскільки вони є дороговартісними легуючими матеріалами та потребують належних умов зберігання для запобігання зволоженню, окисненню й втратам під час транспортування та використання. У сталеплавильному виробництві вони вводяться на етапах розкислення, легування та коригування хімічного складу сталі: феромарганець використовується для зв’язування сірки та підвищення міцності металу, феросиліцій — для ефективного розкислення розплаву та підвищення пружних властивостей, а ферохром — для надання сталі корозійної стійкості та жароміцності.

Кількість введення феросплавів залежить від марки сталі та заданого хімічного складу і зазвичай становить від десятих часток відсотка до кількох відсотків від маси плавки. Наприклад, для конструкційних сталей їх витрати є мінімальними і використовуються переважно для коригування складу, тоді як для високолегованих і спеціальних сталей частка феросплавів може досягати 5–10 % і більше від маси металу. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідні експлуатаційні властивості готової продукції та стабільність її якості.

Проведений вище розрахунок потреби в основному устаткуванні електросталеплавильного цеху показав, що для забезпечення безперервної та

ефективної роботи виробництва необхідно раціонально підібрати кількість основного й допоміжного обладнання відповідно до продуктивності цеху та особливостей технологічного процесу. У результаті розрахунків встановлено потребу в одному мостовому завалочному крані, чотирьох завалочних кошиках, одному комплекті мульдозавалочних машин, чотирьох шихтових кранах та двох мостових ливарних кранах у розливному прольоті.

Отримані результати свідчать про те, що прийнята структура обладнання забезпечує своєчасне виконання операцій із завалки шихти, транспортування матеріалів, позапічної обробки та розливання сталі без виникнення простоїв і порушення ритму роботи цеху. Визначення необхідної кількості кранів, кошиків, мульд і вакуумних установок дозволяє забезпечити узгоджену роботу всіх виробничих дільниць електросталеплавильного цеху.

Розрахунок об’ємів бункерів для зберігання шихтових матеріалів показав необхідність створення достатнього запасу металобрухту, вапна, плавикового шпату та магнітного порошку для стабільної роботи цеху. Особливу увагу приділено зберіганню феросплавів, які через високу вартість і вимоги до умов зберігання доцільно розміщувати на спеціалізованих цехових складах.

Крім забезпечення виробничої продуктивності, правильний вибір і розрахунок обладнання має важливе значення для підвищення енергоефективності, покращення організації праці та забезпечення охорони праці й техногенної безпеки.

Раціональне завантаження обладнання сприяє зниженню аварійності, скороченню витрат електроенергії та підвищенню загальної економічної ефективності електросталеплавильного виробництва.

3.4 Визначення кількості та ємності печей в електросталеплавильному цеху

Визначення кількості та ємності печей в електросталеплавильному цеху проводиться з метою забезпечення заданої річної продуктивності,

раціонального використання виробничих потужностей, мінімізації простоїв обладнання та підвищення економічної ефективності виробництва.

В електросталеплавильному цеху експлуатуються дугові сталеплавильні печі типу ДСВ-50 та ДСП-50. Необхідну кількість печей, що встановлюються в електросталеплавильному цеху (ЕСПЦ), визначають на основі співвідношення:

$$n = \frac{П_ц}{П_п},$$

де $П_ц$ і $П_п$ – річна продуктивність відповідно електросталеплавильного цеху й однієї електросталеплавильної печі. Приймається річна продуктивність електросталеплавильного цеху 210000 т на рік.

Річну продуктивність однієї дугової сталеплавильної печі визначають за такою формулою:

$$П_п = \frac{T24an_{діб}}{100t},$$

$$П_п = \frac{50 \cdot 24 \cdot 97338}{100 \cdot 2{,}50} = 157373 \text{ т/рік},$$

де Т – ємність печі (по масі рідкої сталі), т;

t – тривалість плавки, год.;

а – вихід придатних зливків по відношенню до маси рідкої сталі, %;

$п_{діб}$ – кількість робочих діб на рік, доба;

24 – кількість годин у добі, год./добу.

Вихід придатних зливків при сифонному розливанні становить 97,0–98,5%. Кількість робочих діб на рік для печей з вогнетривкою футеровкою стін за нормативними даними становить 333–348 діб для агрегатів ємністю 50–60 т (у цьому діапазоні показник n зменшується зі збільшенням ємності печі). Кількість робочих діб печі протягом року визначається як різниця між календарним фондом часу (365 діб) і тривалістю простоїв на холодних

ремонтах. Відповідно до нормативів, для печей ємністю 50–60 т раз на 1–2 роки виконується капітальний ремонт із заміною поду тривалістю 8–10 діб, а також холодні ремонти з оновленням футеровки стін, що тривають 18–24 години і проводяться кожні 15–20 діб експлуатації. У разі використання водоохолоджуваних стінових панелей кількість робочих діб печі за рік зростає через зменшення частоти ремонтів стін:

$$n = \frac{210000}{157373} = 1{,}33 .$$

Отже, передбачається встановлення у проєктованому сталеплавильному цеху двох печей типу ДСВ місткістю 50 т, оскільки коефіцієнт завантаження обладнання не повинен наближатися до 100%, що дасть змогу забезпечити резерв виробничих потужностей, підвищити надійність роботи цеху та компенсувати можливі простої обладнання під час ремонтів і технічного обслуговування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів електросталеплавильного виробництва

Під час експлуатації електросталеплавильних агрегатів (дугових, індукційних, вакуумно-індукційних печей та інших установок) на працівників впливає комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які формуються внаслідок високотемпературних, електричних та хімічних процесів.

До основних небезпечних факторів належать ураження електричним струмом високої напруги, що використовується для живлення печей, а також можливі аварійні викиди розплавленого металу та шлаку. Такі ситуації можуть виникати при порушенні режимів плавлення, руйнуванні футерівки або розгерметизації плавильної ванни. Додаткову небезпеку становлять вибухи, що можуть бути спричинені вологим металобрухтом або потраплянням води в зону високих температур.

До шкідливих виробничих факторів належать підвищена запиленість робочої зони, наявність токсичних газів (зокрема оксиду вуглецю, оксидів азоту та сірки), інтенсивне теплове випромінювання, високий рівень шуму, що може досягати 120 дБ, а також підвищена температура повітря в робочій зоні (до 30–40 °С і вище в залежності від умов роботи печі).

У ряді сучасних технологічних процесів також застосовується ультразвукова або електромагнітна обробка розплаву, що створює додаткові фізичні фактори впливу на персонал.

Інтенсивність теплового потоку на робочих місцях електросталеплавильних цехів є значною, особливо в зоні обслуговування печі, завантаження шихти та розливання сталі.

Основні шкідливі та небезпечні фактори електросталеплавильних печей приведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні шкідливі та небезпечні фактори електросталеплавильних печей

№ п/п	Показник	Електросталеплавильний агрегат			
		дугова сталеплавильна піч	вакумно-дугова піч	індукційна піч	вакумно-індукційна піч
1	Шум, дБА (ДСН 3.3.6.037-99, ГДР 80–85 дБА)	95–110	85–95	85–100	80–90
2	Вібрація, м/с² (ДСН 3.3.6.039-99)	1,0–2.5	0,5–1.2	0,6–1.8	0,2–0,8
3	Запиленість повітря, мг/м³ (ГДК 6–10 мг/м³)	10–30	2–6	2–5	1–3
4	Загазованість (CO, NOx), мг/м³ (ГДК CO до 20 мг/м³)	50–200	10–20	10–25	5–10
5	Мікроклімат: температура, °C (ДСН 3.3.6.042-99)	28–45 (до 60 локально)	25–35	25–40	22–30
6	Відносна вологість повітря, %	30–60	40–60	40–70	40–60
7	Електромагнітні поля, кА/м	0,5–1,0	0,1–0,3	1,0–3,0	0,5–1,5
8	Інфрачервоне випромінювання, Вт/м²	1400–3500	800–2000	600–1500	300–1000
9	УФ/іонізуюче випромінювання (умовна оцінка)	високе	низьке	низьке	дуже низьке
10	Освітленість робочої зони, лк (норма 200–300 лк)	100–200	150–300	200–300	200–400

Аналіз наведених даних таблиці 4.1 показує, що рівень шкідливих та небезпечних виробничих факторів суттєво залежить від типу електросталеплавильного агрегату. Найбільш несприятливі умови праці

характерні для дугової сталеплавильної печі, де спостерігаються підвищені рівні шуму (до 110 дБА), запиленості повітря (до 30 мг/м³), загазованості (до 200 мг/м³ CO), а також інтенсивне інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Усі ці показники значно перевищують гранично допустимі рівні, що визначає високий рівень професійного ризику для персоналу.

Вакуумно-дугова піч характеризується покращеними умовами праці за рахунок зниження впливу пилу, газів і теплового випромінювання, однак рівень шуму та вібрації залишається відносно підвищеним. Індукційна піч відзначається значним електромагнітним навантаженням, але має нижчі показники запиленості та газовиділення порівняно з дуговими процесами.

Найбільш сприятливі умови праці спостерігаються у вакуумно-індукційній печі, де завдяки герметизації процесу суттєво знижуються всі основні шкідливі фактори: шум, пил, гази та теплове випромінювання.

Додатковим фактором ризику є вплив електромагнітних полів, особливо у печах високої частоти, які можуть впливати на нервову та серцево-судинну систему працівників при тривалому перебуванні в зоні дії обладнання.

Пил, що утворюється під час плавлення, має складну хімічну структуру. Основними компонентами є оксиди заліза (до 60 %), а також оксиди кремнію, магнію, алюмінію, марганцю та цинку. Розмір частинок коливається від 5 до 100 мкм, що створює ризик для органів дихання при недостатній вентиляції. У порівнянні з дуговими печами, індукційні установки характеризуються меншим рівнем газо- та пиловиділення, однак все одно потребують ефективних систем аспірації.

Пожежна небезпека електросталеплавильного виробництва зумовлена наявністю горючих газів, використанням кисню для інтенсифікації процесів плавлення, великою кількістю електричних кабельних мереж, трансформаторного масла, гідравлічних систем та мастильних матеріалів. Особливу небезпеку становлять екзотермічні суміші, що використовуються для прискорення плавлення та рафінування сталі.

До газонебезпечних робіт відносяться операції, що проводяться в

замкнутих або недостатньо вентильованих просторах, а також процеси, пов’язані з можливим виділенням чадного газу та інших токсичних або вибухонебезпечних речовин. Такі роботи потребують постійного контролю повітряного середовища та використання засобів індивідуального захисту.

4.2 Охорона праці та техногенна безпека металургійного підприємства

Техногенна безпека являє собою стан захищеності населення, персоналу та навколишнього середовища від наслідків аварій і надзвичайних ситуацій, що виникають у результаті виробничої діяльності металургійних підприємств. Вона є важливою складовою системи промислової безпеки та охорони праці.

У металургійному виробництві аварійні ситуації, як правило, мають комплексний характер, оскільки одна подія може спричинити виникнення низки вторинних небезпечних процесів, таких як пожежі, вибухи, руйнування обладнання або викиди небезпечних речовин у навколишнє середовище. Особливо це характерно для електросталеплавильних цехів, де експлуатуються дугові сталеплавильні печі, вакуумно-дугові, індукційні та вакуумно-індукційні печі, що працюють за умов високих температур, значних електричних навантажень і використання розплавленого металу.

Основними завданнями забезпечення техногенної безпеки є:

– виявлення та аналіз усіх потенційних джерел техногенного ризику на підприємстві;

– оцінювання рівня небезпеки технологічних процесів, обладнання та продукції;

– визначення критичних вузлів виробництва (електродуги, індукційні котушки, вакуумні камери, системи охолодження), відмова яких може призвести до аварій;

– врахування природно-кліматичних умов, сейсмічності та гідрогеологічних факторів території;

– впровадження систем моніторингу стану печей, електрообладнання, систем охолодження та газовидалення;

– розробка сценаріїв розвитку аварійних ситуацій, характерних для електроплавильних процесів (пробій футерівки, викид розплаву, коротке замикання, перегрів трансформаторів);

– впровадження технічних рішень для зниження ризиків, зокрема автоматичних систем захисту, аварійного відключення печей, блокувальних систем та сигналізації перевантажень;

– організація системи навчання персоналу та регулярних тренувань дій у разі аварій у зоні печей;

– забезпечення оперативного реагування та ліквідації наслідків можливих аварій.

Особливу увагу приділяють впровадженню систем управління ризиками (Risk Management), які включають ідентифікацію небезпек, оцінку ймовірності їх виникнення та визначення рівня допустимого ризику. Умови роботи поблизу електросталеплавильних печей характеризуються підвищеним тепловим випромінюванням, високим рівнем шуму, електромагнітними полями та наявністю розплавленого металу, що вимагає застосування посиленого контролю безпеки, автоматизації процесів та використання спеціальних засобів індивідуального захисту.

У зоні дугових сталеплавильних печей додаткову небезпеку становлять інтенсивне ультрафіолетове випромінювання, висока температура електричної дуги, а також можливі раптові викиди шлаку і розплавленого металу під час завантаження шихти або порушення технологічного режиму, що створює ризик опіків, ураження очей та аварійних ситуацій. Індукційні печі характеризуються підвищеним електромагнітним навантаженням, яке може впливати на здоров’я персоналу при тривалому перебуванні в зоні дії поля, а також потребують контролю за станом індукційних котушок і систем охолодження для запобігання перегріву та аварійним відключенням. Вакуумні печі знижують вплив пилу, диму та газоподібних домішок за рахунок герметизації процесу,

однак потребують особливого контролю герметичності систем, вакуумних насосів і ущільнень, оскільки їх розгерметизація може призвести до порушення технологічного процесу та аварійних ситуацій.

Додатково слід враховувати підвищену складність обслуговування вакуумного та індукційного обладнання, що вимагає високої кваліфікації персоналу та суворого дотримання регламентів безпеки. Також важливим є постійний контроль температурних режимів і систем охолодження, оскільки їх відмова може спричинити пошкодження обладнання або виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

4.3 Нормативні документи з охорона праці в металургійній галузі

Умови праці в електросталеплавильних цехах повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів України та міжнародних стандартів, оскільки аналіз наведеного переліку нормативно-правових актів (таблиця 4.2) свідчить, що охорона праці в електросталеплавильному виробництві має комплексний і багаторівневий характер. Основу регулювання становлять галузеві НПАОП, які визначають вимоги до безпечної експлуатації електросталеплавильних печей (дугових, вакуумно-дугових, індукційних), організації технологічних процесів розливання сталі, транспортування шихтових матеріалів та обслуговування обладнання.

Додатково важливу роль відіграють міжгалузеві нормативні акти, що регламентують експлуатацію вантажопідіймального обладнання, використання засобів індивідуального захисту, роботу в газонебезпечних і вибухонебезпечних середовищах, а також забезпечення пожежної та техногенної безпеки.

Санітарно-гігієнічні нормативи встановлюють допустимі рівні шуму, вібрації, електромагнітних полів, мікрокліматичних параметрів і радіаційного фону, що є особливо актуальним для умов гарячих цехів і високотемпературних процесів плавлення металу.

Таблиця 4.2 – Перелік нормативно-правових актів з охорони праці, що застосовуються в електросталеплавильному виробництві

№ п/п	Назва нормативно-правового акта	Аспект охорони праці
1	НПАОП 27.0-7.04-21 «Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров’я на роботі в металургійній промисловості»	Загальні вимоги безпеки та управління професійними ризиками
2	НПАОП 27.1-1.01-09 «Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві»	Безпечна експлуатація печей (дугові сталеплавильні печі та вакуумно-дугові печі, індукційні та вакуумно-індукційні печі), розливання сталі
3	НПАОП 28.5-1.02-07 «Правила охорони праці при термічній обробці металів»	Високотемпературні процеси нагріву та охолодження металу
4	НПАОП 0.00-1.80-18 «Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання»	Переміщення шихти, ковшів із розплавленим металом
5	НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги щодо безпеки і охорони здоров’я при використанні засобів індивідуального захисту працівниками»	Захист від теплового випромінювання, пилу, газів та електричного струму
6	НПАОП 0.00-7.23-23 «Мінімальні вимоги щодо безпеки працівників у вибухонебезпечних середовищах»	Попередження вибухів газів і пилу в сталеплавильних цехах
7	НПАОП 27.1-1.09-09 «Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії»	Безпечне використання технологічних газів (CO, природний газ)
8	ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку»	Обмеження шуму електродугових печей
9	ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої вібрації»	Контроль вібраційного впливу обладнання
10	ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»	Високотемпературний мікроклімат гарячих цехів
11	ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми при роботі з електромагнітними полями»	Вплив електромагнітних полів (особливо індукційні печі)
12	ДСЕПіН 6.6.1-079/211.3.9-001-02 «Радіаційна безпека при роботі з металобрухтом»	Контроль радіаційного фону шихтових матеріалів

Загалом, виконання вимог зазначених нормативних документів є обов’язковою умовою забезпечення безпечних та здорових умов праці на підприємствах електросталеплавильного виробництва. Їх дотримання дозволяє системно знижувати рівень професійних ризиків, пов’язаних із дією високих температур, електричного струму, випромінювання та шкідливих газів.

Особливе значення має впровадження сучасних систем вентиляції, аспірації та газоочистки, які зменшують концентрацію пилу та токсичних речовин у робочій зоні. Важливим також є використання автоматизованих та дистанційних технологій керування плавильними процесами, що мінімізує безпосередній контакт працівників з небезпечними факторами. Значну роль відіграє регулярний контроль стану виробничого середовища та проведення виробничого моніторингу відповідно до санітарних норм. Крім того, необхідною є систематична підготовка та навчання персоналу з питань охорони праці та безпечної експлуатації обладнання. Реалізація комплексу організаційних і технічних заходів забезпечує підвищення рівня промислової безпеки та зниження виробничого травматизму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексний аналіз основних типів електросталеплавильних печей (дугових, індукційних, вакуумно-дугових та вакуумно-індукційних), їх конструктивних особливостей і технологічних можливостей.

2. Встановлено, що сучасні напрями розвитку «зеленої металургії» базуються на підвищенні енергоефективності, автоматизації процесів, цифровому керуванні плавкою та зниженні викидів CO_2. Це забезпечує зменшення собівартості продукції та підвищення конкурентоспроможності металургійних підприємств на світовому ринку. Впровадження таких підходів також сприяє зниженню техногенного навантаження на довкілля та покращенню екологічної безпеки виробництва.

3. Розглянуто сучасний стан електросталеплавильного виробництва в Україні та за кордоном. Показано, що підприємства впроваджують електродугові печі нового покоління, системи газоочистки, аспірації, замкнуті цикли водопостачання та технології прямого відновлення заліза, а також інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Важливим напрямом є розвиток циркулярної економіки через широке використання металобрухту та переробку відходів. Це дозволяє суттєво зменшити споживання природних ресурсів і скоротити обсяги промислових відходів, що утворюються в процесі виробництва сталі. У результаті підвищується загальна екологічна ефективність металургійної галузі та знижується її вплив на довкілля.

4. Показано, що в Україні ПрАТ «Дніпроспецсталь» є одним із провідних підприємств із виробництва високоякісних легованих та спеціальних марок сталей, яке використовує сучасні електросталеплавильні технології, позапічну обробку та вакуумування металу для забезпечення високих показників якості продукції. Представлено технологічну схему виробництва електросталі, яка включає підготовку шихтових матеріалів, виплавку металу в дугових сталеплавильних печах, позапічну обробку на установках «піч-ківш»,

вакуумування, розливання сталі у виливниці та подальшу підготовку зливків до термічної й механічної обробки.

5. Виконано розрахунок основного та допоміжного устаткування електросталеплавильного цеху, а також визначено ємності бункерів для шихтових матеріалів. Обґрунтовано раціональну кількість кранів, кошиків, мульдозавалочних машин і ливарного обладнання, що забезпечує безперервність технологічного процесу та узгоджену роботу всіх дільниць цеху.

6. Проаналізовано умови праці та техногенну безпеку електросталеплавильного виробництва. Встановлено, що основними небезпечними факторами є високі температури, шум, вібрація, запиленість, загазованість, електромагнітні поля та ризики аварійних викидів розплаву. Найбільш несприятливі умови характерні для дугових печей, тоді як вакуумно-індукційні установки мають найнижчий рівень шкідливих впливів. Узагальнено підходи до забезпечення охорони праці та техногенної безпеки. Встановлено, що ефективне функціонування електросталеплавильного виробництва забезпечується впровадженням систем управління ризиками, автоматизованого контролю, аварійного захисту, засобів індивідуального захисту та дотриманням чинних нормативно-правових актів і санітарних норм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могиталенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб.; за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.

2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручн. / Д. Ф. Чернега та ін.; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

3. Колесник М. Ф. Металургія чорних металів (ведення до спеціальності) : навч. посіб. для студ. спец. 6.090401 «Металургія чорних металів. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 124 с.

4. Індукційні печі. URL: https://kema.at.ua/book7.html (дата звернення: 08.05.2026)

5. Плавка сталі в індукційних печах. URL: https://iua.waykun.com/articles/plavka-stali-v-indukcijnih-pechah.php (дата звернення: 08.05.2026).

6. Індукційне плавлення. URL: https://uk.dw-inductionheater.com/product/induction-melting-metal (дата звернення: 08.05.2026).

7. Електрична дугова піч: все, що потрібно знати. URL: https://jinsuncarbon.com/uk/%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%B0-%D0%BF%D1%96%D1%87/ (дата звернення: 08.05.2026).

8. Плавильні агрегати спеціальної електрометалургії. у 3 ч. Ч. 2. Плазмово-дугові печі : атлас : навч. посіб. для ВНЗ / уклад. Г. О. Ремізов; ред. Б. Є. Патон, Д.Ф. Чернега; НТУУ «КПІ», НАН України. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. Київ : Політехніка, 2004. 100 с.

9. Плавильні агрегати спеціальної електрометалургії. у 3 ч. Ч. 3. Електронно-променеві печі, магнітодинамічні насоси : атлас : навч. посіб. для ВНЗ / уклад. Г. О. Ремізов; ред. Б. Є. Патон, Д. Ф. Чернега; НТУУ «КПІ», НАН України. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона. Київ : Політехніка,

2005. 78 с.

10. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посібн. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с.

11. Воденніков С. А., Воденнікова О. С., Галицький Ю. П. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва : навч. посібн. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 246 с. ISBN 978-966-8462-38-2.

12. Воденніков С. А., Галицький Ю. П., Воденнікова О. С. Теорія та технологія електросталеплавильних процесів : навч.-метод. посібн. для студентів спеціальності 6.090401 «Металургія чорних металів». Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 124 с.

13. Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Скідін І. Е. Заходи для енергозбереження при виплавці сталі в електропечах. *Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів* : збірка матеріалів. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка, 2022. С. 22–23.

14. Danieli Offers Services on Steel Smelting Production Design to UIET. URL: https://business.com.tm/post/3912/danieli-offers-services-on-steel-smelting-production-design-to-uiet (дата звернення: 12.05.2026)

15. В Китаї запущено 6 електродугових печей від Danieli за останні 2 місяці. URL: https://gmk.center/ua/news/v-kitai-zapushheno-6-elektrodugovih-pechej-vid-danieli-za-ostanni-2-misyaci/ (дата звернення: 12.05.2026)

16. ІНТЕРПАЙП. URL: https://interpipe.biz/ (дата звернення: 12.05.2026)

17. Інтерпайп сталь. Електродугова піч. URL: https://www.interpipesteel.biz/about/elektrodugova-p-ch (дата звернення: 12.05.2026)

18. Бєлоконь Ю. О., Кириченко О. Г., Воденнікова О. С., Воронкова В. Г., Нікітенко В. Розділ 4. Міжнародні та вітчизняні практики управління «зеленою» металургією в умовах цифровізації економіки та сталого розвитку. В кн. : Екологічний менеджмент у системі цифрових інновацій сталого розвитку : стратегії для зеленої економіки, металургії та бізнесу / За загальною редакцією Воронкової В. Г., Метеленко Н. Львів – Торунь : Liha-Pres. 2025 С. 191–277

19. Як США стали лідером у виробництві зеленої сталі. URL: https://gmk.center/ua/posts/iak-ssha-staly-liderom-u-vyrobnytstvi-zelenoi-stali/ (дата звернення: 12.05.2026)

20. «Зелена» сталь Затоки: погляд у майбутнє. URL: https://gmk.center/ua/posts/zelena-stal-zatoki-poglyad-u-majbutnie/ (дата звернення: 12.05.2026)

21. Декарбонізація металургії потребує регулювання та цінових стимулів – аналітик. URL: https://gmk.center/ua/news/dekarbonizaciya-metalurgii-potrebuie-reguljuvannya-ta-cinovih-stimuliv-analitik/ (дата звернення: 07.10.2024)

22. Мельник С. Г. «Зелена» металургія на етапі переходу до вуглецевої нейтральності. *Метал та лиття України*. 2022. №1(328). Т 30. С. 16–27. https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.016

23. Воденнікова О. С., Воденніков С. А. Вплив тенденцій «зеленої» металургії на екологічну модернізацію промисловості України. *Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки* : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти (м. Запоріжжя, 28–30 жовтня 2025 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2025. С. 16–18.

24. Воденнікова О. С., Воденніков С. А. «Зелені» технології у промисловості України. *Актуальні питання суспільства у сферах екологічної та цивільної безпеки, енергозбереження, менеджменту та економіки* : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти (м. Запоріжжя, 28–30 жовтня 2025 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2025. С. 18–21.

25. Воденнікова О. С., Воденников С. А., Піщенко К. А. «Зелена» металургія : проблеми, перспективи та прогнози. *Сучасні технології промислового комплексу – 2025* : міжнародна науково-практична конференція (Херсон-Хмельницький, 17–19 вересня 2025р.). Херсон, Хмельницький : ХНТУ, 2025. Вип. 9. С. 192–196.

26. Воденнікова О. С. Вплив «Зеленої» металургії на екологічну модернізацію промисловості України. *Інноваційні матеріали та технології* :

біотехнологія, прикладна хімія, екологія: збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 95-річчю Київського національного університету технологій та дизайну (Київ, 30–31 жовтня 2025 р.). Київ: КНУТД, 2025. С. 185.

27. Проєктування і обладнання електросталеплавильних і феросплавних цехів: підручник для ВНЗ/ В. А. Гладких та ін. Дніпропетровськ : Системні технології, 2004. 691 с.

28. Вахонєва Т. М. Основи охорони праці в Україні : навч. посіб. Київ : ВД «Дакор», 2019. 508 с.

29. Бердій Я. І. Основи охорони праці : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. Вид. 4-те перероб. і доп. Тернопіль : Навчальна книга-Богдан, 2014. 240 с.

30. Геврик Є. О. Охорона праці : навч. посіб. для студ. внз. Київ : Ельга, НікаЦентр, 2004. 280 с.

31. Козяр М.М., Бедрій Я.І., Станіславчук О.В. Основи охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту населення : навч. посібн. Київ : Конкор, 2025. 458 с. ISBN 978-966-351-348-5

32. Техногенна безпека. URL: https://ips.ligazakon.net/document/TM045661 (дата звернення: 18.05.2026)

33. Забезпечення техногенної безпеки на підприємстві. URL: https://pro-op.com.ua/article/933-pravila-tehnogenno-bezpeki (дата звернення: 18.05.2026).

34. Воденнікова О. С., Воденніков С.А. Сучасні підходи до стандартизації охорони праці в металургії: порівняльний аспект та перспективи гармонізації з міжнародними стандартами. *Металургія*. 2026. №1. С. 95–115.

35. НПАОП 27.0-7.04-21. Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров’я на роботі в металургійній промисловості ; прийнятий 26.11.2021 р. ; чинний від 26.11.2021 р.

36. НПАОП 27.1-1.01-09. Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві ; прийнятий 15.12.2009 р. ; чинний від 15.12.2009 р.

37. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів ; прийнятий 12.02.2007 р. ; чинний від 12.02.2007 р.

38. НПАОП 0.00-1.80-18. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання ; прийнятий 16.05.2018 р. ; чинний від 16.05.2018 р.

39. НПАОП 0.00-7.17-18. Мінімальні вимоги щодо безпеки і охорони здоров’я при використанні засобів індивідуального захисту працівниками ; прийнятий 27.11.2018 р. ; чинний від 27.11.2018 р.

40. НПАОП 0.00-7.23-23. Мінімальні вимоги щодо безпеки працівників у вибухонебезпечних середовищах ; прийнятий 12.07.2023 р. ; чинний від 12.07.2023 р.

41. НПАОП 27.1-1.09-09. Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії ; прийнятий 15.12.2009 р. ; чинний від 15.12.2009р.

42. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ; прийнятий 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

43. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої вібрації ; прийнятий 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

44. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; прийнятий 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

45. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми при роботі з електромагнітними полями ; прийнятий 18.12.2002 р. ; чинний від 18.12.2002 р.

46. ДСЕПіН 6.6.1-079/211.3.9-001-02. Радіаційна безпека при роботі з металобрухтом ; прийнятий 01.07.2002 р. ; чинний від 01.07.2002 р.

47. Воденніков С. А., Нестеренко Т. М., Воденнікова О. С. Бакалаврська робота : методичні вказівки до написання та оформлення випускної кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів ЗДІА спеціальності 136 «Металургія» (спеціалізації «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів») галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 68 с.