

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
(назва факультету)

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

*До гранту*  
*01.12.23*

**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти Другий (магістерський) рівень вищої освіти  
(другий (магістерський) рівень)

на тему «Дослідження електротермічного відновлення елементів і десульфурації сталі у процесі ВЕЛР»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1361- мчм

Радомський Віталій Валерійович  
(ПІБ)

*Radomskiy*  
(підпис)

спеціальності 136 «Металургія»  
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма «Металургія чорних металів»

(шифр і назва)

Керівник Воденнікова О.С.  
(прізвище та ініціали)

*Воденнікова*  
(підпис)

Рецензент Белоконь Ю.О.  
(прізвище та ініціали)

*Belokon*  
(підпис)

Запоріжжя - 2023 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
і.м. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136 «Металургія»

(шифр і назва)

Вітчизняно-професійна програма Металургія чорних металів

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

«01» 08 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

Радомському Віталію Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема проєкту (роботи) «Дослідження електротермічного відновлення елементів і сульфурзації сталі у процесі ВЕЛР»

Рівень роботи (проєкту) Воденнікова Оксана Сергіївна, канд. техн. наук, асистент

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

Затверджені наказом вищого навчального закладу від “09” 10 2023 року № 1581-с

Строк подання студентом роботи (проєкту) 01.12.2023р.

Вихідні дані до роботи (проєкту) Науково-технічна література, ДСТУ, патенти.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Аналіз доцільності вторинного електротермічного відновлення та рафінування сталі на установках піч-квіви. Матеріали та методика дослідження. Дослідження та розробка технології вторинного електротермічного відновлення та рафінування сталі. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових кресл)  
Титульний лист – 1. Реферат – 0. Розділ 1 – 3. Розділ 2 – 1. Розділ 3 – 1.  
Розділ 4 – 0. Висновки – 1. Додатки – 0.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1	Воденнікова О.С., доцент	<i>О.С. Воденнікова</i>
Розділ 2	Воденнікова О.С., доцент	<i>О.С. Воденнікова</i>
Розділ 3	Воденнікова О.С., доцент	<i>О.С. Воденнікова</i>
Розділ 4	Воденнікова О.С., доцент	<i>О.С. Воденнікова</i>
Нормоконтроль	Белоконь Ю.О. завідувач кафедри	<i>Ю.О. Белоконь</i>

7. Дата видачі завдання 07.05.2023р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Прим
1	Вступ	до 30.11.2023р.	<i>Світлана</i>
2	Реферат	до 30.11.2023р.	<i>Світлана</i>
3	Розділ 1	до 30.06.2023р.	<i>Світлана</i>
4	Розділ 2	до 19.11.2023р.	<i>Світлана</i>
4	Розділ 3	до 26.11.2023р.	<i>Світлана</i>
5	Розділ 4	до 30.11.2023р.	<i>Світлана</i>
6	Висновки	до 30.11.2023р.	<i>Світлана</i>

Студент

*Тарас*  
(підпис)

Радомський  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

*О.С. Воденнікова*  
(підпис)

Воденнікова  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 67 с., 5 табл., 14 рис., 24 джерел посилання, 1 додаток.

ВТОРИННЕ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНЕ ЛЕГУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ,  
ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ МЕТАЛУ, ПІЧ-КІВШ, РОЗПЛАВ МЕТАЛУ.

*Тема кваліфікаційної роботи* – дослідження електротермічного відновлення елементів і десульфурзації сталі у процесі ВЕЛР.

*Мета роботи* – розглянути параметри процесу вторинного електротермічного легування і рафінування сталі.

*Об'єкт дослідження:* процес вторинного електротермічного легування та рафінування сталі із залученням електричного обладнання.

*Предмет дослідження:* вплив часу витримки, сили току та напруги на швидкість процесів вторинного електротермічного легування і рафінування сталі.

*Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:*

1. Проаналізувати сучасний стан і напрямки розвитку теорії та практики металургійного виробництва, що стосуються даної теми.
2. Розробити експериментальну установку для проведення дослідів.
3. Дослідити вплив часу витримки, сили току та напруги на швидкість процесів вторинного електротермічного легування і рафінування сталі.
4. Провести порівняльний хімічний аналіз по вмісту речовин в металевих зразках.
5. Провести аналіз техніко-економічних показників процесу.

*Методи дослідження:* Плавка зразків металу і шлаку в печі Тамана за допомогою лабораторної експериментальної установки. Для хімічного аналізу використовували квантометр «Spectrolab». Для кількісної обробки результатів дослідів застосовували методи математичної статистики та пакет

прикладних програм Microsoft Excel.

*Наукова новизна одержаних результатів:*

1. Обґрунтована й експериментально підтверджена доцільність вторинного електротермічного легування та рафінування сталі в установках піч-ківш.

2. Розроблена технологічна схема ВЕЛР.

3. Досліджені електричні параметри процесу та їх вплив на вміст хімічних елементів в металі.

4. Показано, що застосування ВЕЛР для доведення сталі з вмістом кремнію до 0,75% є економічно виправданим.

*Практичне значення одержаних результатів:*

1. Встановлено оптимальні електричні режими процесів вторинного електротермічного легування та рафінування.

2. Запропоновано технологію виплавки сталі з підвищеним вмістом кремнію на основі використання методу вторинного електротермічного легування та рафінування.

3. Впровадження технології надасть можливість економити феросплави; утилізувати рядові конвертерні, мартенівські і доменні шлаки; проводити десульфурацію без введення реагентів, що підвищують вміст неметалевих включень; вводити в розплав високоактивні легуючі добавки з максимальним ступенем засвоєння; зменшити газовиділення і пилоутворення в порівнянні з існуючими методами легування і розкислення сталі.

*Апробація результатів роботи.* Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 1-й всеукраїнській конференції (Воденнікова О. С., Харченко О. В., Радомсткий В. В. Щодо питання вторинного електротермічного легування і рафінування сталі в установках піч-ківш. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України* : III Всеукраїнська науково-практична конференція за участю молодих науковців (Запоріжжя, 17–20 жовтня 2023р.). 2023. С. 637–638).

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ СТАЛІ В УСТАНОВКАХ ПЧ-КІВШ.....	10
1.1 Десульфуратія металу – передумова конкурентоспроможності металопродукції.....	10
1.2 Огляд методу хімічних потенціалів Гіббса .....	11
1.3 Модель конденсованої фази (металургійного розплаву). .....	18
1.4 Рівняння теплового балансу, розрахунок ентальпії. ....	19
1.5 Передумови та основи теорії ВЕЛР сталі .....	23
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ.....	33
3.1 Електричні параметри та техніко-економічних показники технології ВЕЛР .....	33
3.2 Огляд брацібенн елементів в металі.....	38
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	41
4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника електросталеплавильної лабораторії ЗНУ.....	41
4.2 Інженерна розробка захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці.....	42
4.3 Електробезпека.....	47
4.4 Пожежна безпека.....	50
4.5 Вимоги щодо роботи за ПК в умовах лабораторії.....	53
4.6 Розрахунок витяжного зонту для уловлювання ненаправленого потоку повітря.....	55

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	60
ДОДАТКИ.....	63
ДОДАТОК А НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....	63

## ВСТУП

Однією з головних завдань металургійної промисловості є постійний пошук можливостей підвищення якості виготовленої сталі з мінімальними витратами. Якісні показники металу залежать від ступеня забрудненості сталі неметалевими включеннями і вмісту шкідливих домішок, зокрема сірки. Підвищена кількість сірки обумовлює розвиток червоно крихкості при гарячій деформації литої сталі є непрямим підтвердженням незадовільного розкислення металу. Неметалічні включення погіршують якість сталі, зважаючи на те, що при гарячій і холодній пластичній деформації, а також експлуатації готових виробів можуть виступати концентраторами напруг, що викликають передчасне руйнування металу. Забрудненість сталі неметалевими включеннями і максимально допустимий розмір регламентує нормативна документація. Переважна частина наявності неметалічних включень – вони є продуктами розкислення, які утворюються при взаємодії дії скиснем, азотом, сіркою і матеріалами футерівок сталеплавильного агрегату і сталі розливальних ковшів [1-3].

На сьогодні відомий ефективний спосіб десульфурзації сталі, що дозволяє забезпечити зниження вмісту сірки у готовому прокаті до 0,002-0,003 %. Видалення значного відсотка сірки відбувається в сталеплавильному агрегаті (дуговій сталеплавильній печі або кисневому конвертері), а наднизький вміст сірки вже досягається за рахунок створення високоосновного шлаку рафінуючого в процесі позапічної обробки сталі на установці ківш-піч. Запропонований на сьогодні технологічний спосіб підвищує якісні показники металу (вміст сірки та фосфору), що відбувається за рахунок регламентованого введення відповідних реагентів, таких як вапно та плавиковий шпат. Встановлено, що додаткове введення в сталь силікокальцієвого дроту в кінці позапічної обробки дозволяє знизити вміст сірки в сталі до 0,002 %.



Вторинне електротермічне легування й рафінування сталі є новим процесом, що заснований на останніх здобуттях теорії металургійних процесів, яка в своєму розвитку пройшла достатньо довгий шлях, починаючи від фундаментальних робіт Дж. Гіббса і закінчуючи роботами професора А.Г. Пономаренка та його учнів. В основі цих робіт лежить метод хімічних потенціалів, що розробив Гіббс. Послідовний виклад цього метода, застосований до металургійних систем «метал-шлак» та «метал-шлак-газ», є предметом даного літературного огляду.

Процес вторинного електротермічного легування та рафінування сталі надає переваги техніко-економічній стороні та екологічній безпеці, а також кінцевому складу продукту. Отже процес гідний розгляду і можна припустити, що процес буде широко використовуватися в металургійному виробництві.

# 1 АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ ТА РАФІНУВАННЯ СТАЛІ В УСТАНОВКАХ ПІЧ-КІВШ

## 1.1 Десульфурція металу – передумова конкурентоспроможності металопродукції

В сьогоденних умовах якість сталі залишається однією з найважливіших характеристик для виробників металопродукції, зокрема для сталей з низьким вмістом сірки. Якість сталі головним чином залежить від параметрів, що характеризують роботу сталеплавильних агрегатів у процесі виплавки та доведення сталі. Так відомо, що для виплавки сталі певного сортаменту необхідно дотримуватись діючих на металургійних підприємствах вимог технологічної інструкції: підтримувати необхідну температуру розплаву, стежити за її хімічним складом, забезпечувати режим продування та інше.

Якість сталі зумовлює контроль в ній вмісту сірки та фосфору. Тому процеси десульфурції та дефосфорації є на сьогодні важливими та обов'язковими в сталеплавильному процесі.

У промислових масштабах для десульфурції чавуну в різний час широко використовують магній, кальційвмісні матеріали та соду (таблиця 1.1). Схема установки для десульфурції чавуну з вдуванням різних реагент-десульфураторів представлена на рис. 1.1.

Аніліз українських та закордонних технологій позапічної десульфурції чавуну показав на різноманіття сучасних видів реагент-десульфураторів (таблиця 1.2):

- вдування суміші на основі магнію (ступінь десульфурції 95–99 %);
- застосування технології глибинного дугового відновлення (ступінь десульфурції 90–98 %);
- вдування сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфурції

95–98 %);

– використання обробки екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %) та інші.

Більш детально процес десульфурації металу розглянуто в роботах [4-10].

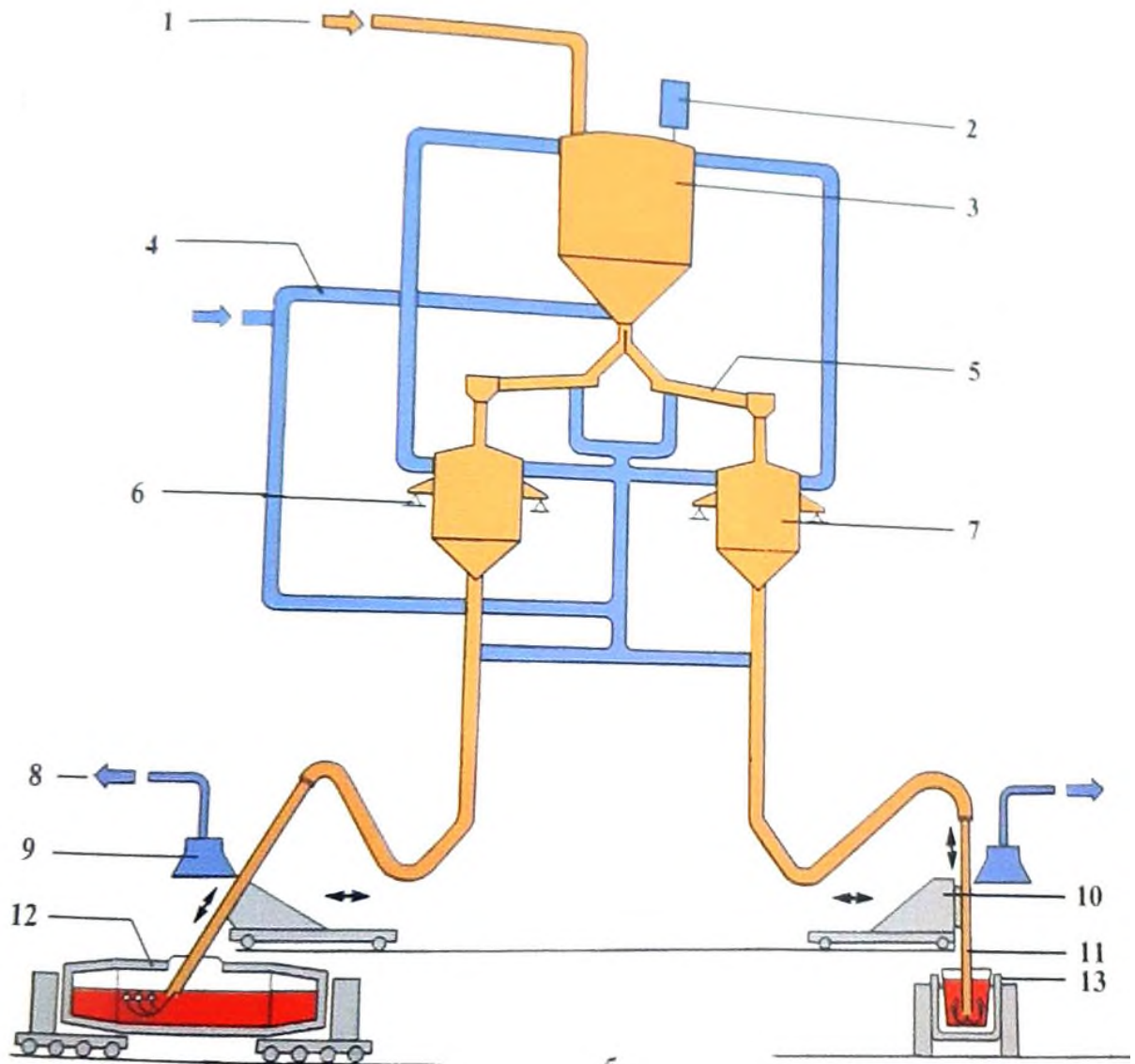
Таблиця 1.1 – Сучасні види реагент-десульфураторів для позадоменної десульфурації чавуну

№ п/п	Гранульований магній та магнієвмісні суміші	Інші види сумішей
1	Шматки магнію зі спеціальними ізоляційними обмазками, що вміщують глину, рідке скло, оксиди.	Суміш з обпаленого вапна (90%), плавикового шпату (5%) та нафтяного коксу (5%).
2	Гранульований магній в струмені природного газу.	Шлаки позапічної обробки сталі.
3	Суміш вапно-магній.	Ціанамід кальцію.
4	Порошок магнію, покритий шаром, що складається з хлоридів натрію, калію, магнію, кальцію.	Вдування флюсів на основі вапняку.
5	Спосіб обробки чавуну введенням дроту, що вміщує в порошкоподібному стані магній та рідкоземельні метали.	Суміш на основі $\text{CaO}$ , $\text{CaC}_2$ , $\text{CaCO}_3$ , Сода $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
6	Введення магнію сумісно з коксом.	Карбід кальцію $\text{CaC}_2$ .
7	Суміш магнію з карбідом кальцію або алюмінієм та глиноземом.	Вапно та вапняк.
8	Суміш гранул магнію з гранульованим основним шлаком.	Розкислення металу гранулами алюмінію.

## 1.2 Огляд методу хімічних потенціалів Гіббса

Використовуємий в сталеплавильному виробництві метод Гіббса дозволяє описувати хімічні процеси в будь-яких системах без попереднього їх представлення у вигляді стехіометричних реакцій. Термодинаміка Гіббса дає можливість найбільш просто пояснити сутність будь-якої задачі виключно в термінах величин, що безпосередньо вимірюються - температура,

тиск, хімічний склад металу, обсяг металу, маса металу та інші, тобто величин, якими керується інженер-технолог в умовах сталеплавильного виробництва.



1 – система подання реагент-десульфураторів; 2 – пиловий фільтр;  
 3 – бункер; 4 – подання стислого повітря; 5 – транспортний жолоб; 6 –  
 зважуючий пристрій; 7 – розподілювач пиловидних матеріалів; 8 –  
 пилоуловлювання; 9 – витяжний зонт; 10 – візок фурми; 11 – фурма,  
 що занурюється; 12 – ківш сигароподібної форми; 13 – відкритий ківш

Рисунок 1.1 – Сучасна схема установки для десульфурації чавуну з

вдуванням різних видів реагент-десульфураторів

Таблиця 1.2 – Порівняння ступіні десульфурації сучасних технологій позапічної десульфурації чавуну

№ п/п	Технологія	Особливості технологічного процесу	Хімічний склад реагент-десульфуратора, %	Витрата реагент-десульфуратора, кг/т розплаву	Ступінь десульфурації, %
1	Обробка твердими шлаковими сумішами	Вводять на поверхню розплаву при наповненні заливного ковша	CaO = 65–85; CaF <sub>2</sub> = 10–25; Al = 5–10	15–20	30–75
2	Обробка рідкими синтетичними шлаками	Вводять в рідкому стані в ківш перед його наповненням	CaO = 50–65; SiO <sub>2</sub> < 3; CaF <sub>2</sub> < 10; MgO = 3–5; FeO < 1; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 30–45;	10–50	60–80
3	Обробка Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Порошок Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> вдувають в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці газу-носія	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> = 100	5–10	80–90
4	Обробка порошкоподібною сумішшю, що містить вапно	Суміш подають на поверхню розплаву, який переміщується роторною мішалкою та інертним газом	CaO = 90; CaF <sub>2</sub> = 5; кокс = 5	5–10	60–80
5	Інжекція сумішей на основі вапна та магнію	Реагент інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці інертного газу-носія.	Mg = 30; CaO = 70	5–8	95–98
6	Інжекція сумішей на основі магнію	Гранульований магній, покритий солями натрію, інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці природного газу	Металевий магній = 100	0,3–0,5	95–99
7	Введення магнію в кусках	Куски магнію вводять у випарниках дзвоноподібної форми в об'єм рідкого розплаву	Металевий магній = 100	1,0–8,0	50–60
8	Технологія дугового глибинного відновлення	Активний реагент вводять у формі оксиду, який відновлюється безпосередньо в об'ємі розплаву за рахунок теплоти електричної дуги	Al = 15–25; MgO = 25–65; CaO = 25–50	1,5–3,0	90–98
9	Обробка магнієм, що відновлений за рахунок тепла суміжних хімічних реакцій у об'ємі рідкого металевого розплаву	Із суміші, що містять оксиди магнію, оксиди кальцію, оксиди заліза та металевий алюміній, формують брикети, які вводять у ківш при наповненні	MgO = 10–20; CaO = 5–10; Al = 20–30; FeO = 40–65	1,5–2,0	65–85
10	Обробка порошковим дротом	Порошковий дріт, що містить активний реагент, вводять безпосередньо в об'єм розплаву за допомогою трайбапарата	Mg = 78; CaC <sub>2</sub> = 22	0,3–0,6	50–60

За своєю математичною структурою термодинаміка Гіббса - це класична механіка (статика суцільних середовищ) з тією різницею, що механіка вивчає системи, що здатні обмінюватися лише роботою і речовиною, а термодинамічні системи обмінюються ще й теплом.

Вихідні рівняння механіки Гіббс треба вводити змінну величину (додаткову). Це буде характеризувати здатність системи віддавати або поглинати тепло. Також термодинаміку Гіббса можна розглядати і як узагальнення механіки на реальні системи, переміщення яких завжди супроводжується явищами з виділенням тепла.

Для формулювання задачі про рівновагу гетерогенних і багатокомпонентних термодинамічних систем Гіббс ввів поняття фази, тобто сукупності гомогенних (однорідних) частин гетерогенної (неоднорідної) системи, однакових за всіма фізичними і хімічними властивостями незалежно від кількості речовини і існування або відсутності поділяючих поверхонь між окремими фазами. Фаза може бути охарактеризована її ентропією або внутрішньою енергією, що залежать лише від властивостей і стану фази. Речовини, з яких складається система, являються її незалежними складовими частинами - компонентами, які можуть зворотньо переходити з однієї фази в іншу. Внутрішня енергія кожної фази може змінюватися не тільки за рахунок зміни її ентропії  $S$  і обсягу  $V$ , а й за рахунок змінення числа молей її компонентів.

Застосовуючі загальний критерій рівноваги при додатковій умові постійності ентропії, об'єму і маси кожного з компонентів, отримують умову повної рівноваги гетерогенної системи: рівність у всіх фазах системи температури, тиску та хімічних потенціалів для кожного компонента. Якщо хімічні потенціали не рівні, то речовина прагне перейти у фазу з більш низьким хімічним потенціалом; таким чином, хімічний потенціал відіграє таку ж роль для рівноваги фаз, як і температура для теплової рівноваги термодинамічної системи.

При цьому виявляється, що багато емпіричних законів та законів загальної хімії (зокрема закон діючих мас) закономірно впливають з первинних постулатів термодинаміки у вигляді різних часних випадків, але вже у формі строгих математичних залежностей. Саме тому і спостерігається некоректність думки про те, що існуюча класична термодинаміка описує лише рівновагу, а розрахунок швидкостей та інших характеристик процесів потребує особливої системи уявлень та понять.

Механіка виходить з положення, що стан (повна сукупність властивостей) системи взаємозалежних тіл при відсутності зовнішніх полів повністю визначена в будь-який момент її руху (існування), якщо відомий вид зв'язку між тілами, що утворюють систему, й задані значення двох параметрів, що характеризують загальну кількість речовини системи та її здатність обмінюватися роботою – в простому випадку маса  $V$  – в один з моментів.

Математично цей постулат виражається рівнянням

$$f(V, m) = 0. \quad (1.1)$$

При переході до більш загального випадку термодинамічних систем вводиться ентропія  $S$  як певний параметр, що характеризує здатність системи віддавати або отримувати тепло

$$f(S, V, m) = 0. \quad (1.2)$$

Цей вираз лежить в основі технічної термодинаміки, що має справу з речовиною постійного складу. Термодинаміка Гіббса стає хімічною в результаті заміни загальної маси  $m$  масами  $k$  компонентів, що утворюють систему:

$$f(S, V, m_1, m_2, \dots, m_k). \quad (1.3)$$

Іншими словами такі параметри як ентропія, обсяг і маса, що входять в ці вирази, представляють мінімально необхідний набір первинних понять. Ці поняття не інтерпретуються на рівні феноменологічної (макроскопічної) теорії, а усі відмінні (інші) властивості, що розглядаються в термодинаміці, є їх похідними величинами.

Так, внутрішня енергія системи (як і будь-яка інша її властивість) є деякою функцією цих змінних:

$$U = U(S, V, m_1, m_2, \dots, m_k). \quad (1.4)$$

При цьому диференціал внутрішньої енергії у вигляді функції декількох змінних має наступний вигляд:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial S} dS + \frac{\partial U}{\partial V} dV + \sum_{i=1}^k \frac{\partial U}{\partial m_i} dm_i. \quad (1.4)$$

Похідні данного виразу можуть розглядатися у вигляді визначення таких параметрів, як температура, тиск та хімічний потенціал компонентів:

$$\frac{\partial U}{\partial S} = T, \quad \frac{\partial U}{\partial V} = -P, \quad \frac{\partial U}{\partial m_i} = \mu_i. \quad (1.5)$$

Точно так само визначається теплоємність  $c_p = \frac{\partial U}{\partial T}$ , модуль пружності  $K_T = -V \frac{\partial U}{\partial V}$  та інші поняття, що становлять мову термодинаміки. З урахуванням позначень (1.5) вираз (1.4) набуває вигляду:

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dm_i. \quad (1.6)$$

Представлений вираз являє одну із загальних форм фундаментального рівняння. Це рівняння при певному вигляді функції (1.4) дозволяє виконувати



практичні розрахунки. Перетворенням рівняння (1.6) можна отримати іншу його форму у вигляді:

$$SdT - VdP + \sum_{i=1}^k m_i dm_i = 0 \quad (1.7)$$

Вирази (1.6) та (1.7) можна представити у вигляді:

$$\frac{dU}{dt} = T \frac{dS}{dt} - P \frac{dV}{dt} + \sum_{i=1}^k m_i \frac{dm_i}{dt}, \quad (1.8)$$

$$S \frac{dT}{dx} - V \frac{dP}{dx} + \sum_{i=1}^k m_i \frac{dm_i}{dx} = 0, \quad (1.9)$$

де  $t$  – час;  $x$  – просторова координата.

Ці вирази пов'язують узагальнені потоки і сили, що дозволяє систематизувати завдання кінетики і термодинаміки незворотних процесів в термінах єдиної макроскопічної мови.

Щоб перейти до вирішення практичних завдань, потрібно визначити конкретний вид функцій (1.4) для фаз, що беруть участь в процесі. Для цього необхідно використати знання про властивості частинок, що утворюють речовину, хімічного зв'язку, про форми існування компонентів у металі і шлаку, дифузійної рухливості частинок та інші, що призводить до практично необмеженого обсягу інформації, який представляє погано організовану безліч фактів, їх тлумачень, гіпотез, специфічних понять та інші. Знову виникає проблема систематизуючої мови, оскільки поняття класичної термодинаміки (температура, тиск, ентропія тощо) у застосуванні до явищ мікросвіту, що позбавлений сенсу, а також проблематика варіації результатів мікроскопічного розгляду властивостей речовини за допомогою термодинаміки.

### 1.3 Модель конденсованої фази (металургійного розплаву)

Обчислення коефіцієнтів активності компонентів в металі  $g$  шлаку  $Y_i$ , що входять у вирази для хімічних потенціалів (Ошибка! Источник ссылки не найден.) і (Ошибка! Источник ссылки не найден.), є, з одного боку, складовою частиною методу Гіббса, а з іншого боку – однією з основних задач теорії металургійних процесів. Цьому питанню присвячені тисячі експериментальних і теоретичних робіт, виконаних у ХХ і початку ХХІ століть. З точки зору точності відповідності розрахункових і експериментальних даних найбільш кращою представляється термодинамічна модель конденсованої фази. Автори виходять із припущення про парну взаємодію в розчині і обчислюють його термодинамічні функції на підставі статистичної суми, отриманої з розподілу Гіббса:

$$Q = \exp(-e_0 / RT) \frac{N!}{\prod_{i=1}^k n_i!} \prod_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_j \exp(-e_{ij} / RT)^{n_i}, \quad (1.11)$$

де  $e_0$  – мінімальна енергія, яка приймається за точку відліку всіх енергій взаємодії  $e$ ;  $R$  – універсальна газова постійна;  $T$  – абсолютна температура;  $n_i$  – число часток (молей)  $i$ -го елемента;  $e_{ij}$  – енергетичні параметри взаємодії  $i$ -го елемента з  $j$ -тим елементом.

З використанням відомих співвідношень між статистичною сумою і термодинамічними функціями отримують вираз для енергії Гіббса фази. Хімічний потенціал  $i$ -го компонента має вигляд:

$$m_i = m_i^0 + RT \ln(x_i y_i) + 1 - \sum_{j=1}^k x_j y_j b_{ji}, \quad (1.12)$$

де  $x_i$  – мольна частка  $i$ -го елемента;

$$y_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^k x_j b_{ij}}; \quad b_{ij} = \exp\left(-\frac{e_{ij}}{RT}\right)$$

$m_i^0$  – хімічний потенціал  $i$ -го елемента в стандартному стані.

Рівняння Гіббса-Дюгема не накладає ніяких обмежень на енергетичні параметри  $e_{ij}$  у виразі для статистичної суми, допускаючи в загальному разі їх будь-який знак і асиметрію ( $e_{ij} \neq e_{ji}$ ), однак для виконання граничного закону Рауля необхідно і достатньо, щоб,  $e_{ii} = 0$ , тобто  $b_{ii} = \exp(-e_{ii}/RT) = 1$ . З точки зору мікростану фази це означає невідличимість однойменних атомів за їх енергетичним станом. Якщо ж фаза складається з атомів різних сортів з однаковими енергетичними мікростанами ( $e_{ij} = 0$ ), то утворюється ідеальний розчин. В бінарних неідеальних системах з позитивною ентальпією змішання завжди  $e_{12} > 0$ , а з негативною  $e_{12} < 0$ .

Цікаво відзначити також, що заміна експоненти під знаком підсумовування у статистичній сумі (1.) на перший член розкладу її в ряд Тейлора призводить до загальновідомих виразів для регулярного розчину.

Розрахункові та експериментальні значення термодинамічних функцій змішання системи Fe-Mn свідчать про гарну точність моделі багатокомпонентної конденсованої фази.

#### 1.4 Рівняння теплового балансу, розрахунок ентальпії

Точне визначення коефіцієнтів активності та інших термодинамічних функцій поряд з вирішенням рівнянь, що визначають рівновагу в системі «метал-шлак» або «метал-шлак-газ» дає шукані величини рівноважних мас елементів у металі, шлаку і газі, якщо зафіксовані тиск і температура системи. При цьому розподіл елементів між фазами істотно залежить від температури у відповідності з цими ж рівняннями. У свою чергу, кінцева температура системи залежить від теплових ефектів хімічних реакцій, які супроводжують перерозподіл елементів між фазами, наприклад, при додаванні в систему окислювачів або розкислювачів. Крім того, ця температура залежить від теплофізичних властивостей елементів

(стандартних ентальпій і теплоємностей) і визначається рівнянням теплового балансу. Тому знайти рівноважний склад і кінцеву температуру системи можна лише шляхом спільного розв'язання рівнянь матеріального і теплового балансу.

Мають місце дослідження, в яких запропоновано вирішення цієї задачі шляхом додавання рівняння теплового балансу до системи рівнянь, що визначають рівновагу, що дозволяє перевести температуру  $T_3$  розряду заданих в розряд шуканих величин, поряд з рівноважними масами хімічних елементів у фазах.

Рівняння теплового балансу ґрунтується на I і II початках термодинаміки, згідно з якими, зокрема, при ізобарному процесі зміна ентальпії системи дорівнює кількості теплоти  $Q$ , що поглинулася:

$$DH_p = H(T) - H_0 = Q_E - Q_L, \quad (1.13)$$

де  $H(T)$  – ентальпія системи в кінцевому стані при температурі  $T$ ;  $H_0$  – ентальпія системи в початковому стані;  $Q_E$  – прихід тепла від енергоносіїв;  $Q_L$  – теплові втрати;

Ентальпія при обчислюваннях підляда рівнянням:

1) Гіббса-Гельмгольца:

$$H = G - T(\partial G / \partial T)_p; \quad (1.14)$$

2) Вант-Гоффа:

$$H = (\partial(G/T) / \partial(1/T))_p. \quad (1.15)$$

Щодо обчислення парціальної мольної ентальпії змішування, то її можна представити:

1) За відомою активністю:

$$h_i^M = -RT^2(\partial \ln a_i / \partial T)_p; \quad (1.16)$$

2) За відомим коефіцієнтом активності:

Теплоємності (у тому числі стандартна і змішання) обчислюються за рівнянням:

$$C_p(T) = -T \frac{\partial^2 G(T)}{\partial T^2} = \frac{\partial H(T)}{\partial T}. \quad (1.17)$$

Таким чином, ентальпійна теплова модель є невід'ємною і узгодженою частиною будь-якої термодинамічної моделі, що лежить в основі рівноважних розрахунків і заснованої на методі хімічних потенціалів Гіббса.

Підсумкова система 4-х рівнянь, що описує рівноважний розподіл елементів в багатокомпонентній системі «металл-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу, отримана еквівалентними перетвореннями вище перелічених рівнянь, має такий вигляд:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i n_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_2 = \frac{N}{1 + \exp(Y)[1 + \exp(-Z)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_3 = \frac{N}{1 + \exp(Z)[1 + \exp(-Y)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i B_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_4 = H(T) - H_0 + Q_L - Q_E = 0. \end{cases} \quad (1.18)$$

де  $N_m, N_s, N_g, N$  – числа молей в металі, шлаку, газі і в системі в цілому;

$A_i = \frac{n_{(i)}}{n_{[i]}} = \frac{K_{[i]} g_{[i]}}{g_{(i)}} \exp\left(\frac{\mu_i}{RT} - Y\right)$  – коефіцієнт розподілу  $i$ -го елемента між

металом і шлаком;  $B_i = \frac{n_{\{i\}}}{n_{[i]}} = \frac{K_{[i]} g_{[i]}}{g_{\{i\}}} \exp(-Z)$  – коефіцієнт розподілу  $i$ -го

елемента між металом і газом;  $Y = \ln(N_m / N_s)$ ;  $Z = \ln(N_m / N_g)$ ;

$\ln K_{[i]} = (\mu_{[i]}^\circ - \mu_{(i)}^\circ) / RT$ ;  $\ln K_{\{i\}} = (\mu_{[i]}^\circ - \mu_{\{i\}}^\circ) / RT$ ;  $\mu_{[i]}^\circ, \mu_{(i)}^\circ, \mu_{\{i\}}^\circ$  – стандартні хімічні потенціали (мольні енергії Гіббса)  $i$ -го елемента в металі, шлаку і газі;

$g_{[i]}, g_{(i)}, g_{\{i\}}$  – коефіцієнти активності  $i$ -го елемента в металі, шлаку і газі;  $n_i,$

$n_{[i]}, n_{(i)}, n_{\{i\}}$  – числа молей  $i$ -го елемента в системі, в металі, шлаку і газі.

Перше рівняння в системі (1.) є перетвореним рівнянням електронейтральності, а останнє – рівнянням теплового балансу.

Слід особливо відзначити, що можливість практичного застосування методу хімічних потенціалів Гіббса для вирішення завдання про рівноважний розподіл елементів в багатокомпонентній системі «металл-шлак-газ» з'явилася тільки після кардинального спрощення системи  $3k+2$  нелінійних рівнянь з такою ж кількістю невідомих і приведення її до системи лише чотирьох рівнянь (1.) з чотирма невідомими  $Y, Z, m_e, T$ , за якими, з урахуванням виразів для коефіцієнтів розподілу  $A_i$  і  $B_i$ , знаходяться числа молей елементів в металі, шлаку і газі:

$$n_{[i]} = \frac{n_i}{1 + A_i + B_i}; \quad (1.19)$$

$$n_{(i)} = n_{[i]} A_i = \frac{n_i A_i}{1 + A_i + B_i}; \quad (1.20)$$

$$n_{(i)} = n_{[i]} B_i = \frac{n_i B_i}{1 + A_i + B_i}. \quad (1.21)$$

На цьому завершується рішення рівноважної задачі. Розбиваючи плавку на періоди між добавками і повторюючи розрахунок, можна простежити за змінами складу металу і шлаку протягом всієї плавки в рівноважному наближенні.

Межі зміни вмісту елементів в масиві плавки наведені в таблиці 1.3.

В якості ілюстрації на рис. 1.2 показана відповідність експериментальних і розрахункових мольних концентрацій заліза, кисню, марганцю, фосфору, сірки в металі і ряду елементів шлаку для пари моделей «метал МКЕ– шлак МКЕ».

Мають місце дослідження, в яких зроблено висновок про адекватність моделі, що використовується, та її потенційної здатності працювати в якості

інтелектуального ядра систем управління металургійними процесами в реальному масштабі часу.

Таблиця 1.3 – Межі зміни змісту елементів і сполук (мас.%) в металі і шлаку експериментальних плавів

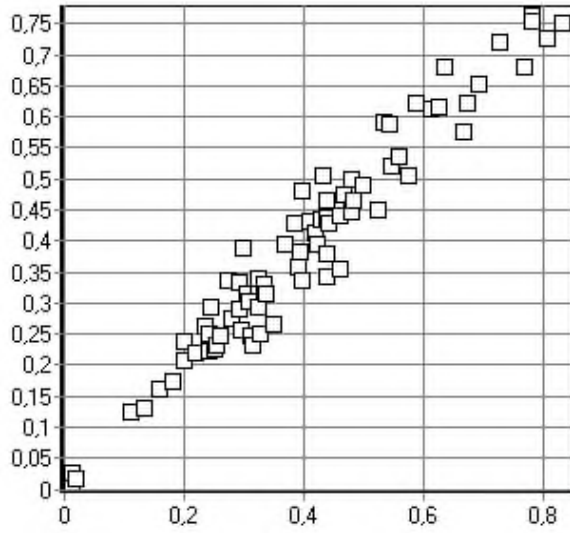
Межі	[O]	[Mn]	[P]	[S]	(FeO)	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(MnO)	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(S)	(CaO)	(MgO)	(SiO <sub>2</sub> )	(CaF <sub>2</sub> )
Верхня	0,24	0,52	0,298	0,077	76,94	8,67	39,24	19,24	0,268	47,98	30,38	40,34	17,59
нижня	0,0034	0,002	0,002	0,015	0,68	0,1	0,79	0,019	0,005	0,08	1,5	0,56	3,99

Застосування в моделі системи «метал-шлак-газ» ентальпійного теплового балансу з використанням невід'ємної розрахункової кінцевої температури і нової термодинамічної моделі конденсованих розчинів практично завершило теоретичну розробку «каркаса» фізико-хімічної моделі. Модель в свою чергу придатна як для побудови повністю автоматизованих систем управління існуючими сталеплавильними процесами, але й відкрило практичні можливості для розробки теоретичних основ і технології принципово нових процесів, таких як вторинне електротермічне легування і рафінування (ВЕЛР) в процесі обробки металу в печі-ковші.

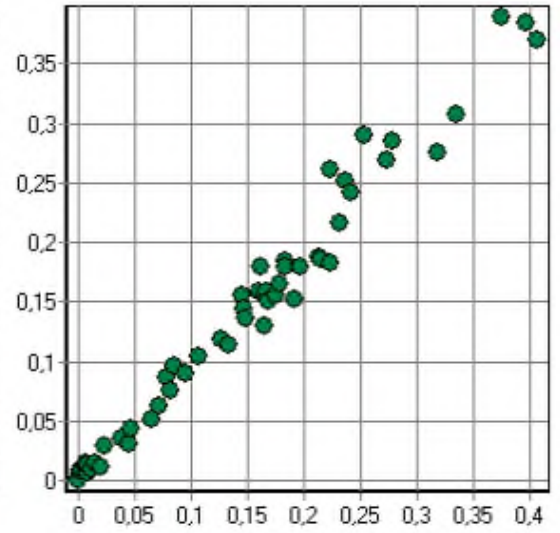
### 1.5 Передумови та основи теорії ВЕЛР сталі

Питання про можливість використання установок піч-ківш для вторинного легування і рафінування сталі неодноразово виникало при аналізі розподілу сірки між металом і шлаком в процесі електрошлакового переплаву постійними струмом. Так було показано, що коефіцієнт розподілу сірки  $(S)/[S]$  змінювався більш ніж у два рази при зміні полярності прикладеної до електродів напруги.

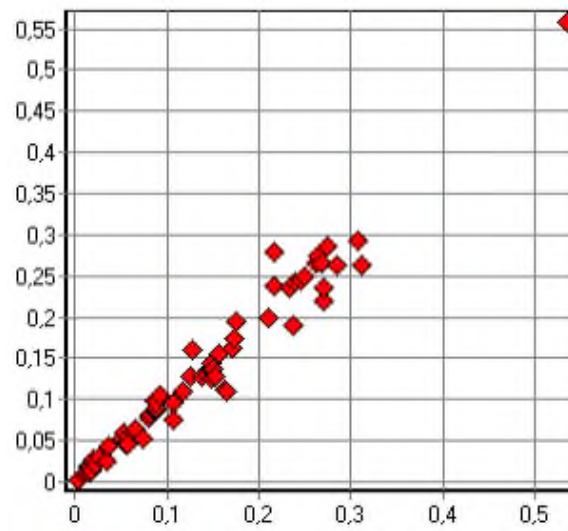
Ключовим елементом теорії ВЕЛР є поняття про криву електронейтральності (КЕ), типовий вигляд якої наведено на рис.1.2.



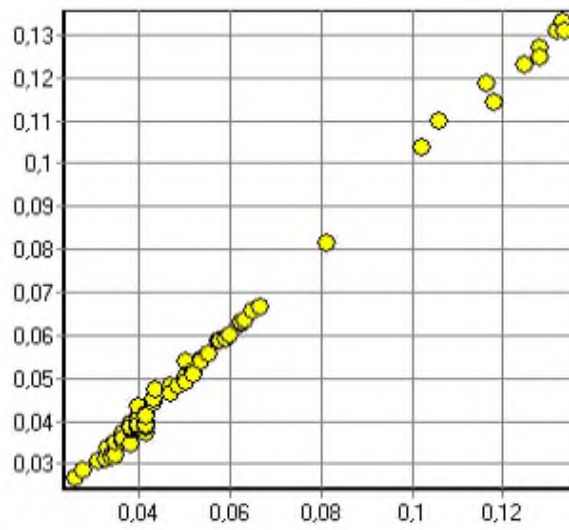
a) [O]



б) [Mn]

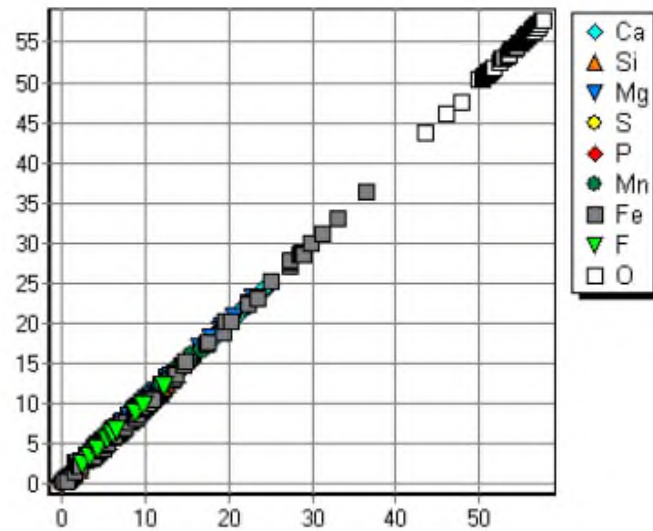


в) [P]



r) [S]





д)

Рисунок 1.2 – Відповідність експериментальних ( $X$ ) і розрахункових ( $Y$ ) мольних концентрацій (%) кисню (а), марганцю (б), фосфору (в), сірки (г) в металії ряду елементів в шлаці (д) для пари моделей «метал МКЕ – шлак МКЕ»

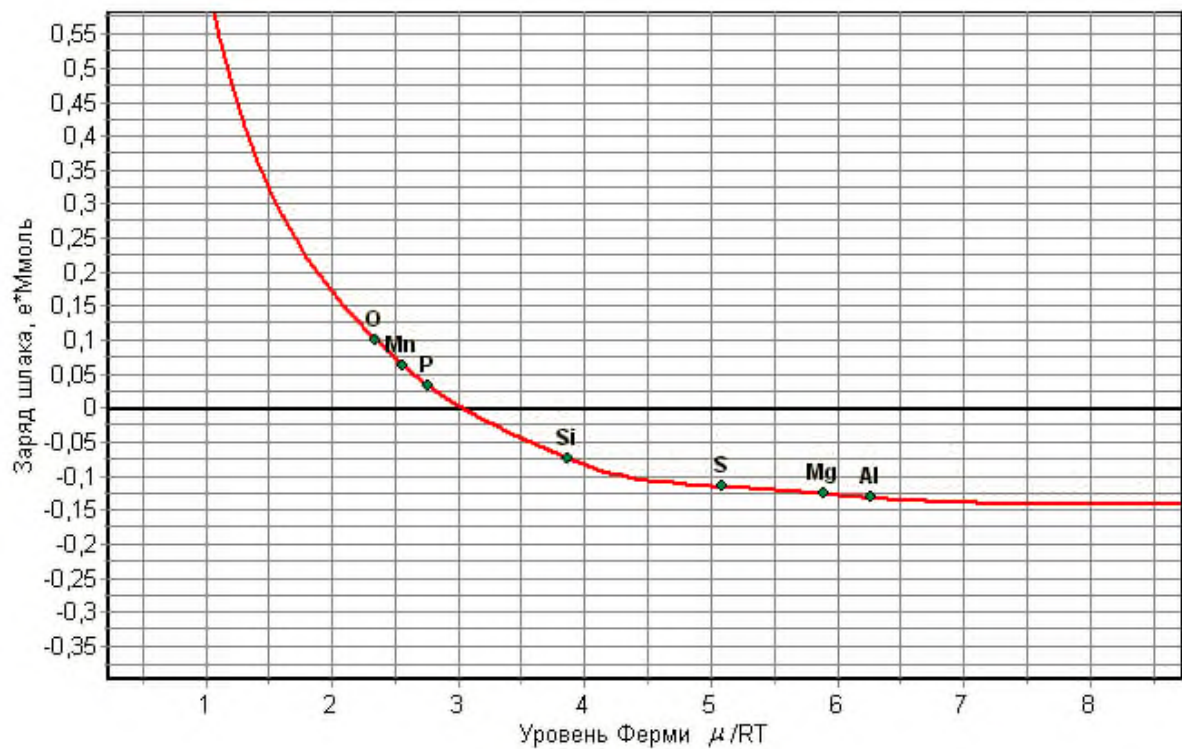


Рисунок 1.3 – Фрагмент кривої електронейтральності

У координатах «Заряд шлаку,  $e^*M_{\text{моль}}$ » – «Рівень Фермі електронів в шлаці, од.  $RT$ » КЕ будується як функція  $F_1(m_e)$  з рівнянь (1.), що описують стани системи «метал-шлак-газ»:

$$F_1 = \mathring{a} \frac{n_i n_i A_i(m_e)}{1 + A_i(m_e) + B_i} \quad (1.22)$$

КЕ відображає поточний рівноважний стан елементів у системі. Вона перетинає ось абсцис у точці рівноважного значення  $m_e$ . Ця точка відповідає електрично нейтральному шлаку.

У точках перегину кривої нанесені точки, що відповідають окремим елементам. У позначеннях системи рівнянь (27) координати цих точок розраховується таким чином:

$$\text{Координата X: } X_E = \frac{A_i - Y - \ln[1 + \exp(B_i - Z)]}{n_i} \quad (1.23)$$

$$\text{Координата Y: } Y_E = \mathring{a} \frac{n_i n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + X_E n_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} \quad (1.24)$$

Положення крапок окремих елементів на кожному оці алфавіту відображає здатність шлаку поглинати елемент у заданих умовах. Якщо точка елемента з позитивним значенням нижче цього ока, елемент, як правило, перетворюється на шлак. В іншому випадку цей елемент має тенденцію перетворюватися на метал або газ. Елементи з негативним значенням стають шлаку, коли відповідна точка вище ока абсциси.

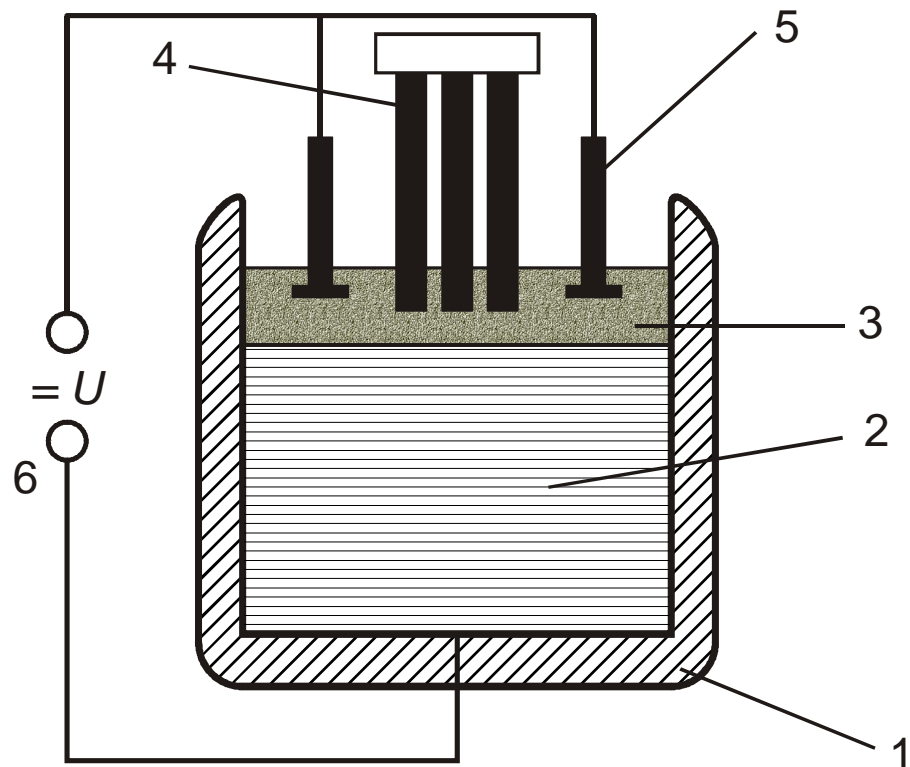
Відносне положення точок елементів на КЕ відображає порядок окислення або відновлення елементів, якщо потенціал рівності окислення змінюється на число.

Залежність від річки. 1,3 вказує на те, що фосфор, марганець та цинк прагнуть до металу, тоді як кремній, магній та алюміній повинні залишатися в шлаку. Якщо ступінь диксидування збільшується, кремнію спочатку відновлюється, то цинк починає поглинати шлак, і нарешті магній та

алюміній відновлюються. Якщо ступінь окислення збільшується, фосфор, а потім окислюється марганець.

Таким чином, КЕ дозволяє окислювати та регенерувати здатність елементів в цих рівноважних умовах. Знання якісних та кількісних властивостей КЕ та здатності контролювати їх за допомогою зовнішнього електричного поля дає можливість організації принципово нового процесу VELR на практиці.

Діаграма найпростішого велосипедного пристрою показана на рис. 1.4. Графітові електроди спеціальної форми 5 постачаються з позитивною напругою джерелом 6. Залежно від полярності, елементи на КЕ переміщуються вгору або вниз по напрузі на електродах 5. Передбачається, що метал у сковороній духовці постійно зміщується з інертним газом шляхом видування.



1 – кожух установки піч-ковш; 2 – розплав металу; 3 – рідкий шлак;  
4 – електродопідігріву; 5 – електроди ВЕЛР; 6 – джерело постійної напруги

Рисунок 1.4 – Принципова схема ВЕЛР

Якщо додати шлаку позитивний заряд (електрод 5 - анод), то рівновага в системі зміститься в бік збільшення величини  $m_e$ , як якщо б нульова ось абсцис на рис. 1.2 змістилася вниз. Практично це буде еквівалентно збільшенню ступеня розкислення системи, що призведе до відновлення елементів з позитивною валентністю з шлаку. Одночасно буде відбуватися десульфуріяція, тобто видалення сірки з металу і поглинання її шлаком, оскільки сірка має негативну валентність. Якщо ж електрод 5 є катодом, створюються умови для дефосфорації металевого розплаву.

Ординати елементів на КЕ дозволяють оцінити величину напруги, необхідну для створення відновних або окисних умов по відомій геометричній конфігурації шлакового шару і електропровідності шлаку. Оскільки електричний опір шлаку має кінцеву величину, для проведення процесу ВЕЛР необхідні певні енергетичні витрати, які в результаті теплового ефекту частково компенсують витрати електроенергії, що подається на електроди підігріву 4.

Попередні розрахунки показують, що для відновлення одного моля кремнію зі шлаку методом ВЕЛР потрібно на порядок менша кількість електроенергії, ніж її потрібно було б для виробництва такої ж кількості кремнію у вигляді феросиліцію, доставки феросплаву на завод, введення його в розплав, розплавлення і підігріву до температури розплаву, навіть з урахуванням екзотермічної реакції, що супроводжує процес. Подібний ефект досягається також при відновленні марганцю і алюмінію.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

При дослідження електротермічного відновлення елементів і десульфурації сталі у процесі ВЕЛР була проведена серія дослідницьких плавок на печі Тамана (рис. 2.1).



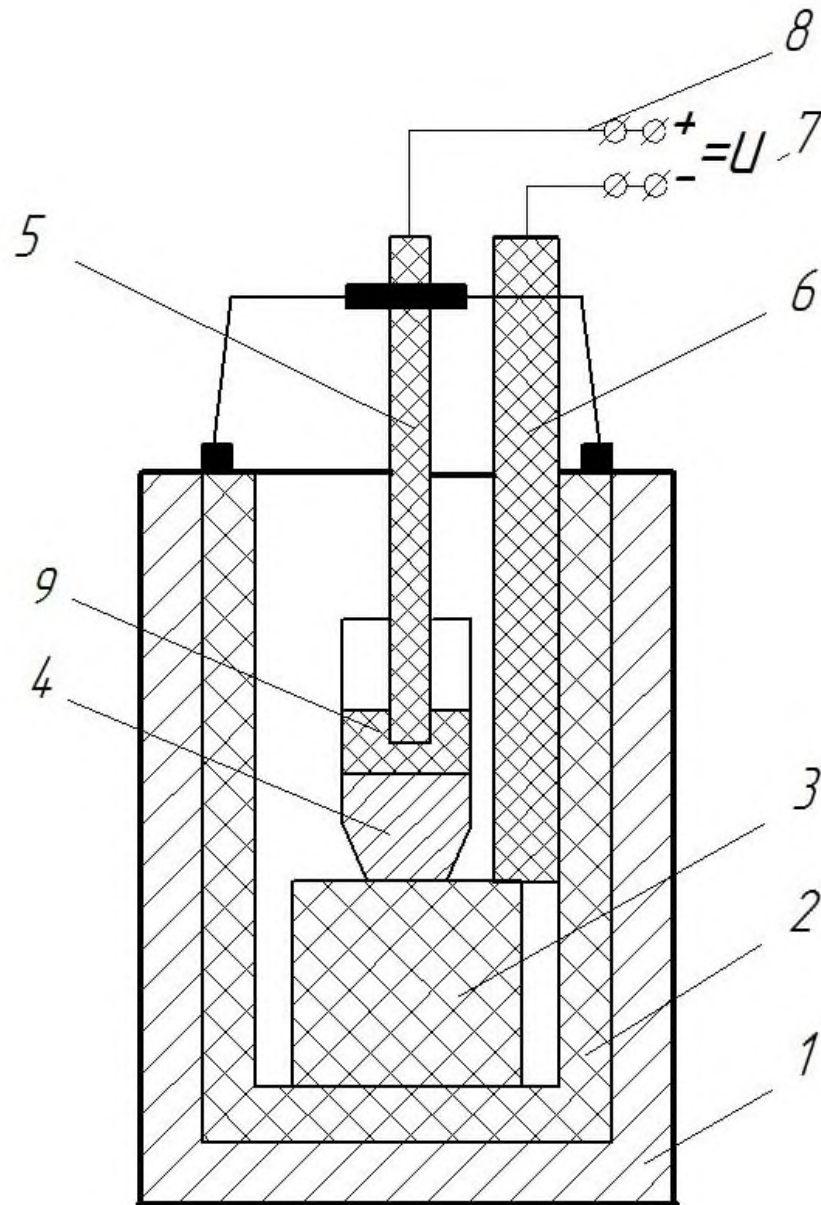
Рисунок 2.1 – Загальний вигляд лабораторної печі Тамана

Схема експериментальної установки наведена на рис. 2.2.

Для проведення плавок використовували флюс АНФ-28 (хімічний склад якого:  $\text{CaF}_2$  – 44%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 5%,  $\text{CaO}$  – 29%,  $\text{SiO}_2$  – 22%).

Шихту розміщували в графітових тиглях (4) діаметром 40 мм, висотою 60 мм з конічним звуженням в донній частині. Склад шихти: 75 г вуглецевої конструкційної сталі марки Ст3 (97 % Fe; 0,14-0,22 % C; не більше 0,3% Ni, Cu, Cr; 0,4-0,65% Mn; 0,05-0,17% Si; менше 0,08% миш'яку; не більше 0,05

% S; менше 0,04% P), 75 г залізного порошку (ЧДА), додавали 50 г флюсу.



1 – піч Тамана; 2 – шахта печі (графіт); 3 – підставка (графіт); 4 – тигель з розплавом (графіт); 5 – електрод-анод (графіт); 6 – електрод-катод (графіт); 7 – джерело постійного струму; 8 – сталевий дріт; 9 – шлаковий розплав

Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки

Піч Тамана (1) попередньо прогрівали на потужності 50-60% від номінальної, а потім збільшували до 90% для досягнення заданої температури  $t=1550^{\circ}\text{C}$  в робочому просторі. Піч витримували 20 хвилин до

повного розплавлення шихти і приведення системи до рівноваги. Після цього підключали джерело постійного струму (7): «+» до графітового електрода (5), що занурений в шлаковий розплав, а «-» на струмопровідний графітовий тигель (4) через графітовий електрод (6) і підставку (3) (рис. 2.2). Джерело постійного струму підключали до електрода-анода (5) за допомогою сталевого дроту (8). Для зменшення попадання летючих компонентів шлаку в повітря шахту печі під час проведення дослідних плавок накривали листами азбесту.

Варіювали напругу, що подається, від 12 до 30 В та силу струму від 1,5 до 5 А. Знімали вольт-амперну характеристику експериментальної установки з розплавленим металом і шлаком (рис. 2.3).

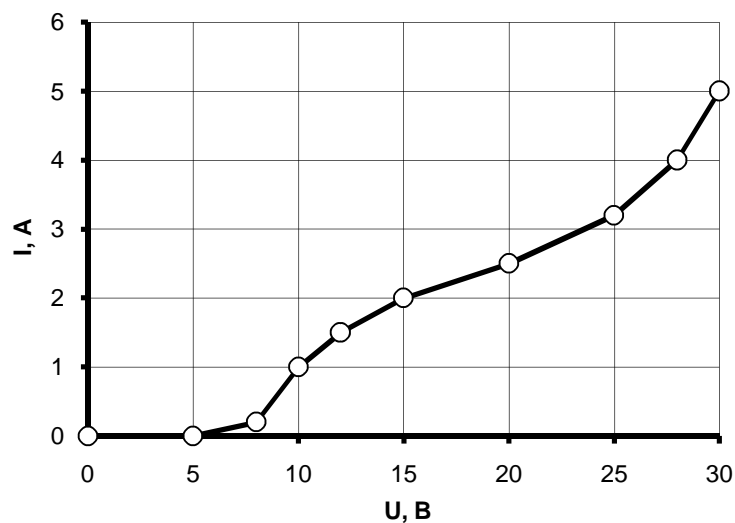


Рисунок 2.3 – Вольт-амперна характеристика експериментальної установки з розплавленим шлаком

Як видно, залежність сили струму від напруги є нелінійною. При напругах менше 8 В сила постійного струму, що протікає в ланцюзі:

- електрод-анод (5),
- шлаковий розплав (9),
- металевий розплав,
- графітовий тигель (4),

- електрод-катод (6)

є незначним. Тому мінімальна робоча напруга склала 12 В при силі струму 1,5 А.

Розплав витримували під струмом від 20 до 35 хв. Заряд, що проходив через систему «метал-шлак» склав, таким чином, від 1800 до 10500 Кл при потужності від 18 до 150 Вт. Після відключення напруги від електродів піч Тамана вимикали, витягували графітовий електрод, а після охолодження й зразки металу та шлаку. Зразки метала зачищали з донної частини та направляли на хімічний аналіз.

Результати хімічного аналізу були виконані на квантометрі «Spectrolab».

Аналіз процесу вторинного легування і рафінування сталі проводиться за допомогою навчально-дослідницького програмного комплексу «EXCALIBUR».



### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ

#### 3.1 Електричні параметри та техніко-економічних показники технології ВЕЛР

Результати хімічного аналізу проб вмісту елементів на протязі п'яти дослідів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати хімічного аналізу

Вміст елементів	Од. вим.	№ дослідів				
		1	2	3	4	5
C	%	2,2	2,15	1,67	1,55	1,3
Mn	%	0,17	0,19	0,22	0,22	0,24
Si	%	0,088	0,57	0,64	0,84	0,98
Al	%	0	0,002	0,016	0,02	0,023
S	%	0,043	0,035	0,027	0,019	0,018
P	%	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005

Електричні параметри та техніко-економічні показники дослідницьких експериментів наведені в таблиці 3.2.

Розрахунок електричних параметрів та техніко-економічних показників:

1. Розрахунок потужності  $P$ , Вт:

$$P = U \cdot I, \quad (3.1)$$

де  $U$  – напруга, В;

$I$  – сила струму, А.

$$P_2 = 12 \cdot 1,5 = 18$$

$$P_3 = 15 \cdot 2 = 30$$

$$P_4 = 28 \cdot 4 = 112$$

$$P_5 = 30 \cdot 5 = 150.$$

Таблиця 3.2 – Технологічні показники дослідних плавок

Параметри та показники	Од. вим.	№ досліду				
		1	2	3	4	5
Витримка	хв	20	20	30	30	35
Сила струму	А	-	1,5	2	4	5
Напруга	В	-	12	15	28	30
Потужність	Вт	-	18	30	112	150
Опір	Ом	-	8	7,5	7	6
Заряд	Кл	-	1800	3600	7200	10500
Витратае/е	кВтг	-	0,006	0,015	0,056	0,0875
Вартістье/е	коп	-	0,21	0,53	1,96	3,06
Вихід Si факт	г	-	0,723	0,828	1,128	1,338
Вихід Siза Фарадеєм	г	-	0,131	0,261	0,522	0,762
ЦінаSi (65%)	грн/т	-	<b>1888</b>	<b>4121</b>	11294	14878

2. Розрахунок опору  $R$ , Ом:

$$R = U/I \quad (3.2)$$

$$R_2 = \frac{12}{1,5} = 8$$

$$R_3 = \frac{15}{2} = 7,5$$

$$R_4 = \frac{28}{4} = 7$$

$$R_5 = \frac{30}{5} = 6.$$

3. Розрахунок заряду  $Q$ , Кл:

$$Q = I \cdot \Delta\tau \cdot 60, \quad (3.4)$$

дет – витримка, хв.

$$Q_2 = 1,5 \cdot 20 \cdot 60 = 1800$$

$$Q_3 = 2 \cdot 30 \cdot 60 = 3600$$

$$Q_4 = 4 \cdot 30 \cdot 60 = 7200$$

$$Q_5 = 5 \cdot 35 \cdot 60 = 10500.$$

4. Розрахунок витрат електроенергії  $W, кВтг$ :

$$W = P \cdot \Delta\tau \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} \quad (3.5)$$

$$W_2 = 18 \cdot 20 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,006$$

$$W_3 = 30 \cdot 30 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,015$$

$$W_4 = 112 \cdot 30 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,056$$

$$W_5 = 150 \cdot 35 \cdot \frac{1}{60 \cdot 1000} = 0,0875.$$

5. Розрахунок вартості електроенергії  $Z, коп.$ :

$$Z = W \cdot C, \quad (3.6)$$

де  $C=0,35$  грн/кВтг

$$Z_2 = 0,006 \cdot 35 = 0,21$$

$$Z_3 = 0,015 \cdot 35 = 0,53$$

$$Z_4 = 0,056 \cdot 35 = 1,96$$

$$Z_5 = 0,0875 \cdot 35 = 3,06.$$

6. Розрахунок фактичного виходу кремнію,  $z$ :

$$\text{факт. вих. } Si = (Si\% - Si_0\%) \cdot 150/100 \quad (3.7)$$

$$\text{факт. вих. } Si_2 = (0,57 - 0,088) \cdot \frac{150}{100} = 0,723$$

$$\text{факт. вих. } Si_3 = (0,64 - 0,088) \cdot \frac{150}{100} = 0,828$$

$$\text{факт. вих. } Si_4 = (0,84 - 0,088) \cdot \frac{150}{100} = 1,128$$

$$\text{факт. вих. } Si_5 = (0,98 - 0,088) \cdot \frac{150}{100} = 1,338.$$

7. Розрахунок виходу кремнію за Фарадеєм,  $z$ :

$$M = \frac{\mu \cdot Q}{\nu \cdot F} \quad (3.8)$$

$$M_2 = \frac{28 \cdot 1800}{4 \cdot 96485} = 0,131$$

$$M_3 = \frac{28 \cdot 3600}{4 \cdot 96485} = 0,261$$

$$M_4 = \frac{28 \cdot 7200}{4 \cdot 96485} = 0,522$$

$$M_5 = \frac{28 \cdot 10500}{4 \cdot 96485} = 0,762.$$

8. Розрахунок ціни кремнію (65%),  $грн./т$ :

$$\text{ціна } Si (65\%) = \frac{Z}{\text{факт.вих.}} \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{10000}$$

(3.9)

$$\text{ціна Si (65\%)}_2 = \frac{0,21}{0,723} \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{10000} = 1888$$

$$\text{ціна Si (65\%)}_3 = \frac{0,53}{0,828} \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{10000} = 4121$$

$$\text{ціна Si (65\%)}_4 = \frac{1,96}{1,128} \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{10000} = 11294$$

$$\text{ціна Si (65\%)}_5 = \frac{3,06}{1,338} \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{10000} = 14878.$$

Згідно даних таблиці 3.1 побудовано залежність впливу заряду, що пропущений через шлак, на вміст елементів в металі (рис. 3.4).

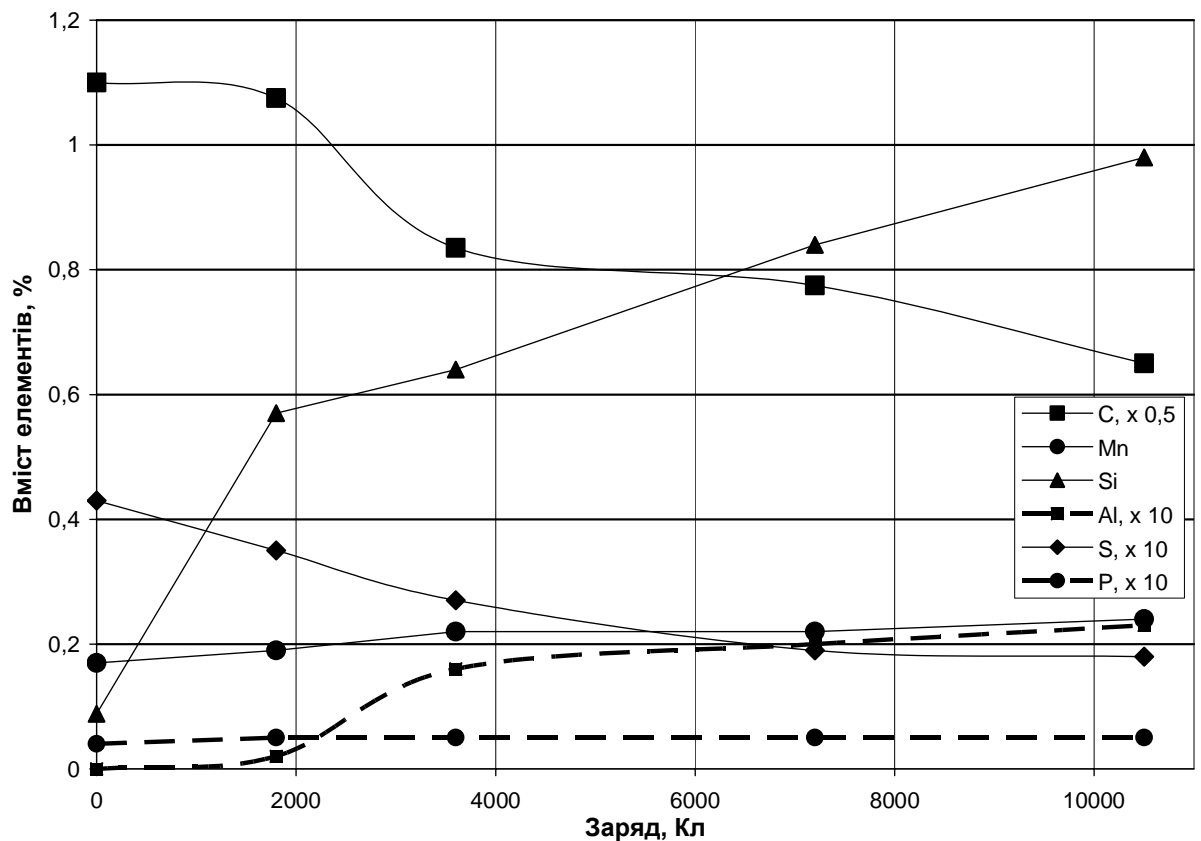


Рисунок 3.4 – Вплив заряду, що пропущений через шлак, на вміст елементів в металі

### 3.2 Огляд поведінки елементів в металі

Розглянемо поведінку кожного елемента згідно з таблицею 3.1 та рис. 3.4.

Вуглець. При витримці розплаву протягом 20 хв. метал насичується вуглецем до рівня 2,2% при взаємодії з пористим графітовим тиглем. При пропусканні струму через шлак вміст вуглецю в металі помітно знижується за рахунок зворотнього процесу. Це пояснюється позитивною валентністю вуглецю та позитивною полярністю електрода, що занурений в шлак.

Марганець при витримці металу без струму (20 хв.) частково окислюється та переходить до шлаку у вигляді  $MnO$ . При подачі струму цей же марганець відновлюється. Однак зміни невеликі за рахунок малого вмісту оксиду марганцю в шлаці.

Алюміній починає відновлюватися до рівня порядку 0,02% при пропущеному заряді більше 3000Кл. Однак у зв'язку з тим, що алюміній на кривій електронейтральності знаходиться нижче за кремній, кількість алюмінію, що відновився, порівняно невелика.

Сірка має негативну валентність в шлаці, тому при пропусканні струму позитивної полярності через шлак вона прагне перейти з металу в шлак. В результаті вміст сірки в металі в дослідах 4 та 5 зменшився більш ніж в 2 рази. Таким чином, процес відновлення елементів з позитивною валентністю супроводжується додатковою десульфуріацією металу.

Фосфор. Зміна вмісту фосфору в металі незначна. Тому що, по-перше, на кривій електронейтральності він знаходиться вище за кремнійта алюміній, і зсув кривої електронейтральності при подачі позитивної напруги на електрод майже не впливає на цей елемент. По-друге, вміст фосфору в флюсі АНФ-28, що використовували, дуже малий.

Кремній. Для детальшого розгляду поведінки кремнію розглянемо графік з нанесеною теоретичною кривою в результаті електролізу з відповідністю до закону Фарадея (рис. 3.5).

Закон Фарадея:

$$M = \frac{\mu}{\nu} \cdot \frac{I \cdot \Delta\tau}{F}, \quad (3.10)$$

де  $M$  – маса елемента, що виділився, г;

$\mu$  – атомна маса елемента, г/моль;

$\nu$  – валентність елемента;

$I$  – сила струму, А;

$\Delta\tau$  – час витримки, с;

$F$  – постійна Фарадея,  $F=96485 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$ .

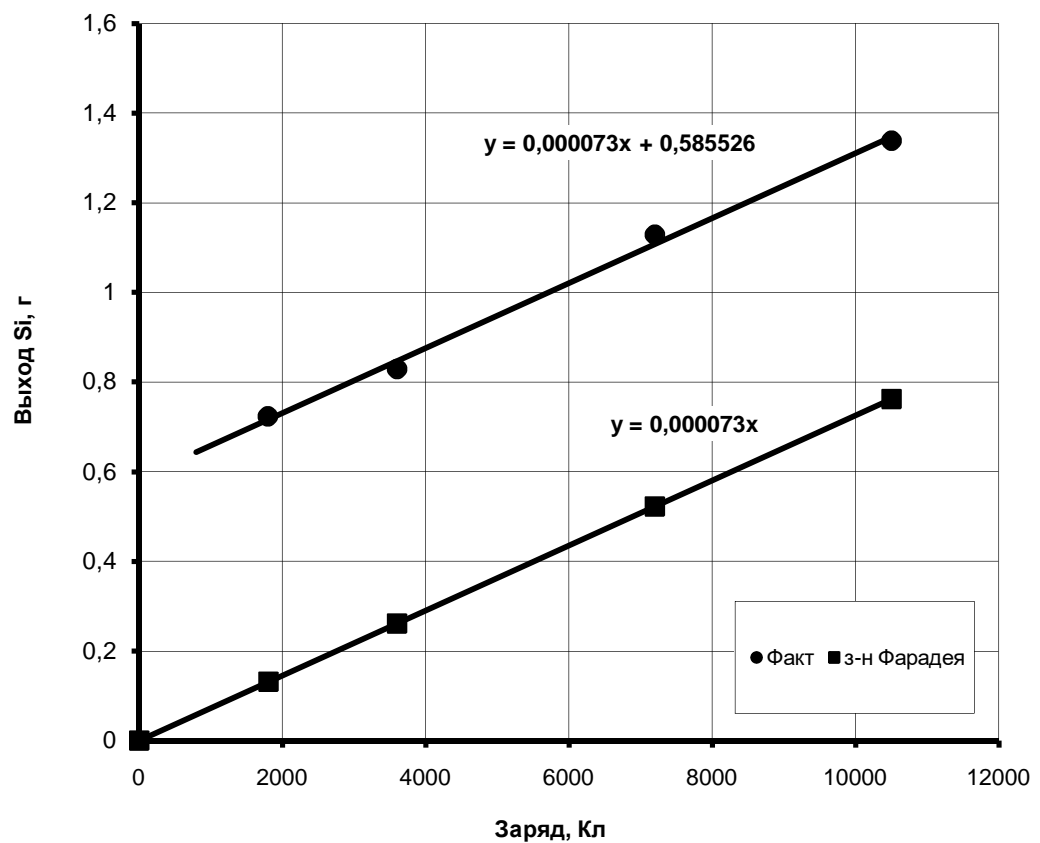


Рисунок 3.5 – Залежність виходу кремнію, що відновився, від електричного заряду, що пропущений через шлак

Як і очікувалось, зі збільшенням заряду згідно закону Фарадея кількість кремнію, що відновився, збільшується. Однак, порівняння

фактичної кривої з теоретичною, що розрахована по закону Фарадея, показує систематичне перевищення кількості кремнію, що відновився, на 0,39% в порівнянні з законом Фарадея. Це вказує на те, що вихід кремнію, що відновився, має 2 складові: електролізну (по Фарадею) та рівноважну відповідно до кривої електронейтральності.

В таблиці 3.2 на підставі фактичної кількості Si, що відновився, та фактичної витрати електроенергії наведена ціна гіпотетичного матеріалу з 65% кремнію, що можна зіставити з феросиліцієм ФС 65 по вмісту кремнія. Як видно з наведених даних (таблиця 3.2), при кінцевому вмісті Si до 0,70% ціна даного матеріалу значно нижча за ціну ФС 65, що склала в квітні 2012 р. 7200 грн/т згідно даних Української асоціації виробників феросплавів.

Таким чином, застосування вторинного електротермічного легування і рафінування для доведення сталі з вмістом кремнію до 0,75% є економічно виправданим. Більш того, вторинне електротермічне легування і рафінування при вмісті кремнію більше 0,75% також може бути економічно вигідним, якщо враховувати супутню десульфуріацію металу [15-18].



## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника електросталеплавильної лабораторії ЗНУ

Дослідження отримання металевих зразків проводилися у електросталеплавильній лабораторії (10 корпус, ауд. 016) кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Для аналізу параметрів процесу вторинного електротермічного легування та рафінування сталі була використана піч Тамана, технічні характеристики якої наступні:

1. Споживана потужність – 40 кВт.
2. Напруга в мережі – 380 В.
3. Максимальна напруга на шинах печі – 15 В.
4. Максимальна допустима температура – 1800 °С.
5. Час розігріву до максимальної температури – 0,5 час.

Всі види негативних впливів, що формуються при проведенні відповідного дослідження, поділяють на основні дві групи:

– рухомі машини і механізми; пересувні вироби, заготовки, матеріали; підвищені рівні шуму і вібрацій; підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони; підвищена температура поверхонь устаткування, матеріалів; електромагнітні випромінювання, недостатня освітленість, підвищений рівень статичної електрики, підвищене значення напруги в електричному ланцюзі та інші.

– речовини та сполуки, різні за агрегатним станом і володіючи токсичною, дратівливою, канцерогенною та мутагенною дією на організм людини і впливають на його репродуктивну функцію.

Основними шкідливими чинниками в приміщенні

електросталеплавильної лабораторії при проведенні дослідів є загазованість, та небезпека враження електричним струмом.

Електросталеплавильна лабораторія є приміщенням легкої категорії важкості праці (виконуються легкі фізичні роботи), тому повинні дотримуватися такі вимоги:

- оптимальна температура повітря – 22 °С (допустима – 20–24 °С);
- оптимальна відносна вологість – 40–60% (допустима – не більше 75 %);
- швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с;
- допустимий рівень звукового тиску 80 дБ(а);
- загальне освітлення 50 лк;
- категорія важкості праці – легка;
- категорія напруженості праці – мало напружена.

Нещасні випадки, пов'язані з ураженням електричним струмом (рис. 4.1) , найчастіше трапляються в системах низької напруги і зазвичай поділяються на дві категорії: ураження прямим і непрямим контактом. Удар від прямого контакту виникає, коли торкаються провідників, які повинні бути під напругою, наприклад оголених проводів або клем. Непрямий контактний удар виникає, коли торкаються відкритої провідної частини, яка опинилася під напругою в умовах несправності. При наданні першої допомоги потерпілому від ураження електричним струмом першочергово слід усунути причину, вимкнувши живлення або іншим чином порушивши контакт між постраждалим і струмоведучим провідником. Може знадобитися серцево-легенева реанімація. Якщо поранений страждає від фібриляції шлуночків, єдиним ефективним способом відновлення нормального серцевого ритму є використання дефібрилятора.

## **4.2 Інженерна розробка захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці**

Видалення з приміщення забрудненого повітря здійснюється витяжною вентиляцією (витяжкою). При видаленні шкідливостей безпосередньо з місця їхнього виділення досягається найбільший ефект дії вентиляції, тому що при цьому не відбувається забруднення великих обсягів повітря і можна видалити малими обсягами повітря виділені шкідливості. Такий спосіб вентилявання носить назву місцевої витяжної вентиляції.

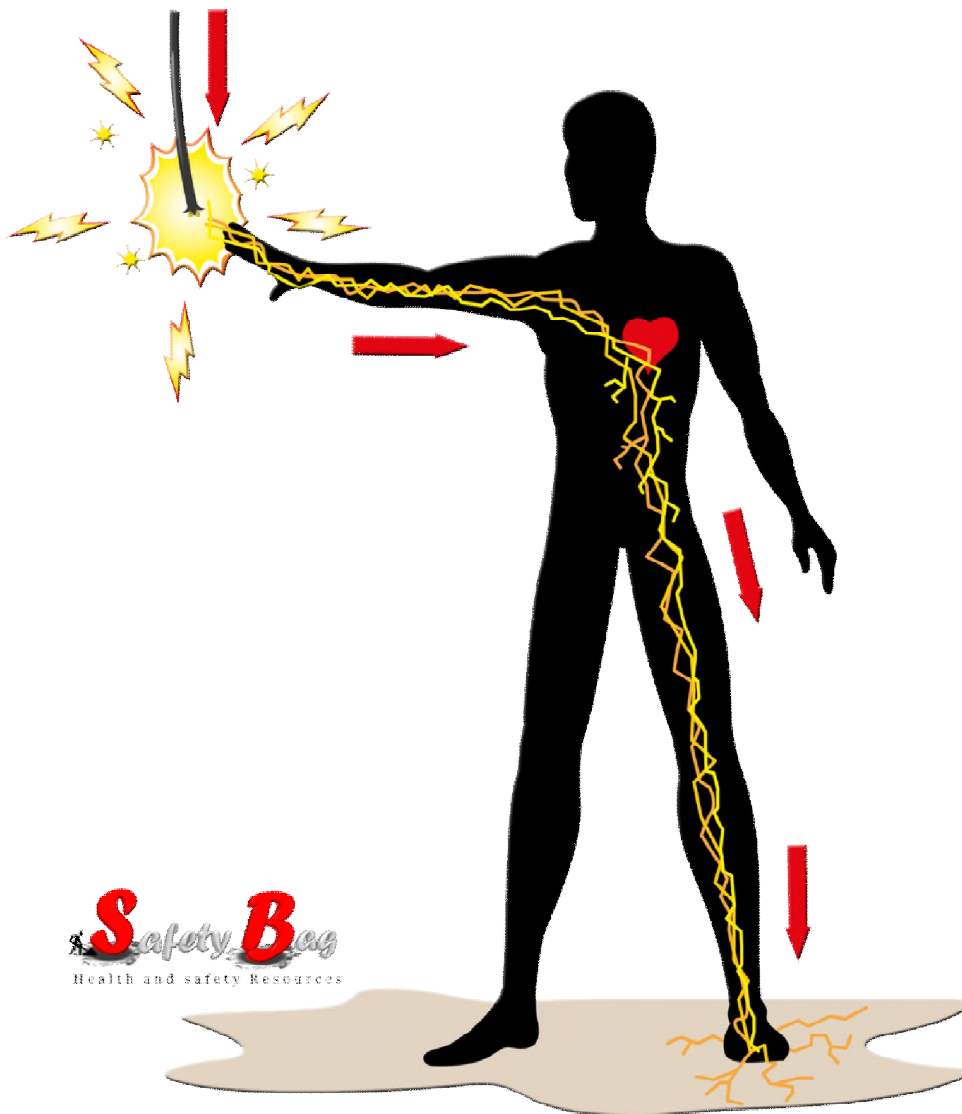


Рисунок 4.1 – Схема ураження людини електричним струмом

Уловлювання шкідливостей у місці їхнього утворення виробляється за допомогою так званих місцевих відсмоктувачів.

Вони попереджають поширення шкідливостей по приміщенню, і, тим

самим ефект дії вентиляції досягається при мінімальному повітрообміні і мінімальних капітальних витратах. Застосування місцевих відсмоктувачів дозволяє вирішувати основну задачу вентиляції - санітарно-гігієнічну.

Конструктивне оформлення місцевих відсмоктувачів визначається характером виділення шкідливостей і особливістю технологічного процесу. При розташуванні місцевого відсмоктувача поза джерелом виділення шкідливості, над ним чи збоку, він конструктивно виконується у виді витяжних зонтів.

Витяжний зонт являє собою металевий ковпак, розташований над джерелом шкідливих виділень. Всмоктувальний перетин ковпака має форму, що геометрично подібна горизонтальній проекції дзеркала шкідливих виділень. Зонт повинен уловити всю кількість повітря, що підтікає до нього. Чим далі прийомний отвір від джерела виділення шкідливих речовин, тим більший обсяг повітря потрібно видаляти. Через зонт повинна віддалятися сумарна кількість повітря, що складається з початкової маси, що виділяється джерелом, і маси повітря, що приєдналося, по шляху від джерела до зонту. Якщо кількість повітря, що видаляється зонтом, буде меншою, то зонт буде переповнятися і частина забрудненого повітря буде надходити в приміщення. Тому необхідно, щоб швидкості всмоктування в просторі між поверхнею джерела виділень і приймальним отвором зонту були достатніми для захоплення газу під зонт (без вибивання в приміщення), швидкості по всій площині вхідного отвору зонту - рівномірні, а обсяг повітря, що відсмоктується - більше обсягу струменя, що підтікає. Для уловлювання зонтом забрудненого нагрітого повітря необхідно правильно визначити його обсяг на рівні зонту. Рішення цього питання ґрунтується на знанні закономірностей конвективних (теплових) струменів.

Парасолька досить ефективна при сильних конвективних потоках, які мають очну швидкість на рівні забірною отвору не менше 1 м/с.

Кут розкриття парасольки є важливою умовою роботи парасольки, яка впливає на рівномірність швидкості демпфування в приймальній секції

парасольки. Забезпечити рівномірну швидкість наповнення можливо тільки при куті відкриття до 60°.

Основна вимога, яка висувається до парасольок, - вловлювати максимальну кількість шкідливих речовин при мінімальній витраті повітря; їх конструктивні елементи не повинні заважати виконанню робочих операцій.

З метою запобігання або зменшення впливу на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів в лабораторії здійснюються захисні заходи. У кожному конкретному випадку вибір таких заходів здійснюється відповідно до вимог безпеки при виконанні даного виду робіт.

Заходи колективного захисту працівників, які фінансуються залежно від їх призначення, поділяються на кілька класів:

- Заходи захисту від впливу механічних факторів - захисні, захисні та гальмівні пристрої; засоби автоматичного керування, сигналізації та дистанційного керування; знаки безпеки.

Призначення захисних засобів - запобігання механічного впливу на людину фізичних небезпечних факторів. За конструкцією захисні пристрої бувають стаціонарні і пересувні.

Обмежувальні пристрої - це конструкції, що обмежують зону, де можливий вплив на людину небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Найпоширенішими видами обмежувальних пристроїв є шлагбауми, перила, поручні та ін. Профілактичні пристрої призначені для запобігання виникненню небезпечних виробничих факторів у разі перевантажень або перевищення встановлених параметрів шляхом нормалізації технологічних параметрів або відключення обладнання.

- Засоби нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і працівників; засоби опалення, вентиляції, прибирання, кондиціонування повітря, а також засоби локалізації шкідливих факторів і пристрої контролю та сигналізації.

Для створення нормальних метеорологічних умов і видалення

шкідливих речовин встановлюється вентиляція – організований повітрообмін. Вентиляція буває природною (аерація), механічною або місцевою.

Кондиціонування – це подача повітря із заданими параметрами (температура, вологість, швидкість руху).

Нормалізація метеорологічних умов у виробничих приміщеннях безпосередньо пов'язана з необхідністю підтримувати певну температуру повітря за допомогою опалення. У тих приміщеннях, де температура повітря підтримується за рахунок тепловиділень від технологічного обладнання та металу, передбачається резервне опалення, що дозволяє підтримувати в холодний період року температуру не нижче 5 оС.

- Засоби захисту від інфрачервоного випромінювання - екрануючі, ущільнювальні та теплоізоляційні пристрої; засоби автоматичного контролю та керування.

Найбільш поширеним і ефективним способом захисту від теплового випромінювання є екранування. Екрани використовуються для захисту джерел радіації або працівників від впливу променистої енергії.

- Заходи захисту від шуму – екрануючі, звукопоглинальні та звукоізоляційні пристрої, а також шумоглушники.

Звукопоглинання. Торкаючись огорожувальної поверхні, звукові хвилі втрачають частину своєї енергії, яка втрачається, викликаючи коливання огороження; при цьому частина механічної енергії перетворюється в тепло в порах облицювального матеріалу.

Звукоізоляція - це здатність огорож знижувати рівень звуку, що проходить через них.

- Засоби захисту від ураження електричним струмом - автомати контролю та сигналізації; ізоляційні пристрої та покриття; улаштування захисного заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів, захисного відключення.

- Засоби захисту від високих і низьких температур - захисні,

теплоізоляційні пристрої; засоби променевого обігріву та охолодження.

- Засоби нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць - джерела світла, освітлювальні прилади, світлові прорізи, світлозахисні пристрої та фільтри.

До засобів індивідуального захисту належать пристрої та приладдя для захисту органів дихання, зору, слуху, голови, рук, ніг, шкіри.

Спеціальний одяг служить для захисту працівника від несприятливих впливів виробничого середовища і небезпечних виробничих факторів, не порушуючи нормальної життєдіяльності організму. Для виготовлення спеціального одягу, який використовується для захисту від термічного впливу, використовують лляні тканини.

Для захисту рук використовуються рукавички.

Для захисту очей від впливу енергії випромінювання використовують окуляри зі світлофільтрами.

Для захисту органів дихання використовують респіратори. Найбільш ефективним є респіратор «пелюсток». Опір диханню цих приладів повинен бути не великим (до  $50 \text{ Н/м}^2$ ).

Для захисту органів слуху застосовують зовнішні і внутрішні противошуми (антифони). Як зовнішні противошуми рекомендують використовувати шумозахисні навушники, які покривають вушну раковину, як внутрішні противошуми – заглушки, вкладиші, які вставляють в зовнішній слуховий прохід.

### **4.3 Електробезпека**

Навіть маючи розвинену систему захисних заходів, не слід вважати, що вони створюють умови абсолютної безпеки. У всіх випадках вкрай необхідні якісне виготовлення електротехнічних пристроїв і їх періодичний контроль, підтримання якісної ізоляції стіни, висока дисциплінованість персоналу і дотримання правил техніки безпеки.

Вогні в електричних пристроях, що нагріваються, відбуваються за рахунок:

- деструкції ізоляції від старіння;
- деструкції електричних ізолюючих елементів від зовнішньої механічної дії;
- електричної поломки ізоляції структурних елементів із-за був підвищений напругу постачання;
- окислення і ослабляє контактного тиску в місцях, де елементи, що проводять, сполучені, який викликає, істотні підвищені в швидкоплинний опір;
- википання води або іншої рідини, яка призводить до деформації і деструкції нагрівача;
- нашаровування забруднення, що проводить, між структурними елементами, що проводять.

При експлуатації електрообладнання в умовах лабораторії велике значення мають умови виробництва, які характеризуються особливостями навколишнього середовища, ступенем доступності електрообладнання, напругою електрообладнання.

Основними заходами захисту від ураження блискавкою на сьогодні є: забезпечення недоступності для випадкового дотику струмоведучих частин, які знаходяться під напругою; електричний розподіл мережі; усунення небезпеки виходу з ладу при появі напруги на різних ділянках електрообладнання, що досягається зниженням низьких напруг, застосуванням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалів, блокуванням захисного заземлення, зануленням, захисним відключенням тощо; встановлення спеціальних електрозахисних засобів - нічних пристроїв і препаратів.

Залежно від тривалості та тяжкості ураження електричним струмом (рис. 4.1) травми можуть включати:

- опіки шкіри;



- опіки внутрішніх тканин;
- електричні перешкоди або пошкодження (або те й інше) серця, що може призвести до зупинки або нестабільного серцебиття.

Важливо звернутися за медичною допомогою у випадку легкого ураження електричним струмом, щоб визначити, чи було уражене серце.

Правила електробезпеки в лабораторії можуть бути відображені на плакаті “Електробезпека при напрузі до 1000 В” (рис. 4.2).

## ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА при напрузі до 1000 В

**НЕБЕЗПЕКА ОДНОФАЗНОГО І ДВОФАЗНОГО ДОТИКІВ**

СТРУМ, ЩО ПРОХОДИТЬ ЧЕРЕЗ ТІЛО ЛЮДИНИ ОДНОФАЗНИЙ ДОТИК

$$I_n = \frac{U_n}{R_n + r_n + r_n} \quad I_n = \frac{\sqrt{3} U_n}{R_n}$$

$U_n, U_n$  - фазна і лінійна напруга;  
 $R_n$  - опір тіла людини (1000 Ом);  
 $r_n, r_n$  - опір вуха і підлога.

ПІД ЧАС РОБІТ З ПРИКОВАНОЮ ЕЛЕКТРОПРОВОДКОЮ ОБОВ'ЯЗКОВО КЕРУЙТЕСЯ ЇЇ СХЕМОЮ

**ЗАПОБІЖНИКИ**

ВИКОРИСТОВУЙТЕ ТІЛЬКИ ТІ КАЛІБРОВАНІ ВСТАВКИ, ЯКІ ВІДПОВІДАЮТЬ НОМІНАЛЬНОМУ СТРУМУ!

**ПРАВИЛЬНО**      **НЕПРАВИЛЬНО**

**ПАМ'ЯТАЙТЕ ПРО ТРИ ОСНОВНІ ПРАВИЛА ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБІТ:**

1. ВІДІМКНІТЬ ЗНИЖТИ НАПРУГУ
2. ПЕРЕВІРТЕ ВІДСУТНІСТЬ НАПРУГИ
3. ВСТАНОВІТЬ ЗАХИСНЕ ЗАЗЕМЛЕННЯ

**НЕ ВМКАТИ ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ**

**ПОЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНИКІВ**

- PE - захисний захисний заземлювальний
- N - нульовий робочий (нейтральний)
- PEN - об'єднаний: нульовий захисний і нульовий робочий

**ПРАВИЛЬНО**      **НЕПРАВИЛЬНО**

ВСТАНОВЛЮВАТИ ЗАПОБІЖНИК В НУЛЬОВИЙ ПРОВІД ЗАБОРОНЕНО

**ПРИТРИМУЙТЕСЯ ПРАВИЛ ВІВІДУ ПРОВІДІВ В ПРИМІЩЕННЯ**

1. Ізолятор
2. Затискач глухий
3. Монета стручча
4. Втулка порцелянова
5. Воронка порцелянова
6. Провід АПВ
7. Труба ізоляційна

Не менше 200 мм

**НЕБЕЗПЕКА УРАЖЕННЯ СТРУМОМ ПІД ЧАС УСТАНОВКИ ВИМКАЧА В НУЛЬОВИЙ ПРОВІД**

**СХЕМА ЗАНУЛЕННЯ В МЕРЕЖІ З ГЛУХОЗАЗЕМЛЮЄНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

1. Гвинт приєднання заземлення або занулення
2. Вимикач
3. Світильник
4. Захисний апарат
5. Однофазний електроприймач
6. Повторне заземлення

Рисунок 4.2 – Плакат “Електробезпека при напрузі до 1000 В”

#### 4.4 Пожежна безпека

Будівлю, в якій знаходиться лабораторія, по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Д, оскільки в лабораторії є горючі (книги, документи, меблі) і важкоспалимі речі (різне лабораторне устаткування), які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху. За конструктивними характеристиками будівлю можна віднести до будівель з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону, де для перекриттів допускається використання дерев'яних конструкцій, захищених штукатуркою або важко горючими листовими, а також плитковими матеріалами. Отже, ступінь вогнестійкості будівлі можна визначити як третю (III).

Причинами виникнення пожежі в лабораторії можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів, які можуть призвести до короткого замикання або пробією ізоляції;
- використання пошкоджених (несправних) електроприладів;
- використання в приміщенні електронагрівальних приладів з відкритими нагрівальними елементами;
- виникнення пожежі внаслідок попадання блискавки в будинок;
- загоряння будівлі внаслідок зовнішніх впливів;
- неакуратне поводження з вогнем та недотримання заходів пожежної безпеки.

В наукових або навчальних лабораторіях існує ймовірність виникнення пожежі, особливо якщо там використовуються та зберігаються розчинники. Раптові пожежі, вибухи, швидке розповсюдження вогню та висока токсичність легкозаймистих речовин є можливими наслідками надзвичайної ситуації в лабораторії, і запобігання пожежі є ключовим для мінімізації цих ризиків.

Знаходячись в лабораторних умовах треба переконатися, що хімікати належним чином зберігаються, для цього треба дивитися на :

- Правильне маркування хімікатів, щоб уникнути плутанини під час експериментів.
- Датування хімічних речовин після їх отримання та відкриття.
- Своєчасне контролювання ведення поштучного обліку
- Зберігання розчинників у належних місцях, наприклад у пожежобезпечних шафах
- Процес зберігання скляних хімічних пляшок на підлозі чи в коридорах.
- Процес зберігання легкозаймистих рідин у нормативному обсязі 50 літрів і менше.
- Розміщення або зберігання газових балонів біля дверей виходу з лабораторії
- Процес зведення до мінімуму кількості легкозаймистих хімікатів у робочих зонах.
- Забезпечення безпечного кріплення газових балонів. Також у лабораторії одночасно має бути лише один циліндр і один запасний

Навчальна лабораторія повинна відповідати вимогам пожежної безпеки згідно з ГОСТ 12.1, 004-91 і мати засоби пожежогасіння згідно з ГОСТ 12.4.009-83) (рис. 4.3):

1. Лабораторія повинна бути обладнана пожежними кранами з пожежними рукавами та вогнегасником.
2. На видному місці в лабораторії повинен бути вивішений план евакуації науково-педагогічних працівників, здобувачів вищої освіти та допоміжного персоналу ЗНУ на випадок виникнення пожежі.
4. Усі науково-педагогічні працівники, здобувачи вищої освіти та допоміжний персонал ЗНУ, що працює в данній лабораторії, повинні бути навчені правилам поведіння з небезпечними матеріалами (легкозаймистими та вибухонебезпечними), газовими приладами, а також

повинні вміти поводитися з наявними в лабораторії протигазом, вогнегасником та іншими засобами пожежогасіння.



Рисунок 4.3 – Плакат «Пожежна безпека»

5. В лабораторії та в коридорах, під сходами забороняється зберігати горючі матеріали та встановлювати предмети, що перекривають проходи та доступ до засобів пожежогасіння.

6. Без дозволу завідуючого кафедрою металургійних технологій, екології та техногенної безпеки в лабораторії забороняється встановлювати

лабораторні та нагрівальні прилади для випробувань, використовувати їх, перемонтувати електропроводку. Усі опалювальні прилади повинні бути встановлені на теплоізоляційних підставках.

7. Після закінчення роботи в умовах лабораторії треба провести наочний її огляд та відключити усі електричні прилади, закрити воду перевірити розетки та інше.

8. У випадку спостереження пожежі, диму або інших ознак пожежі необхідно: негайно викликати пожежну охорону за телефоном 102; повідомити завідувача кафедрою металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, який у свою чергу повинен повідомити працівників, вжити заходів щодо їх евакуації та ліквідації пожежі; вжити заходів щодо обмеження поширення вогню та гасіння пожежі.

#### **4.5 Вимоги щодо роботи за ПК в умовах лабораторії**

Вимоги щодо роботи за ПК (рис. 4.4) в умовах лабораторії: належне освітлення приміщення лабораторії та робочого місця, відсутність зашліплення; оптимальні параметри мікроклімату; правильні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця; врахування небезпечних та шкідливих факторів (шуму та вібрації, рентгенівського випромінювання, електромагнітного випромінювання, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, електростатичного поля між екраном і оператором, наявність пилу, озону, оксидів азоту та аероіонізація).

Слід зазначити, що висота робочого столу повинна бути в межах від 0,65 до 0,8 м, а ширина повинна забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності. Стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною не менше 450 мм (на рівні колін), не менше 650 мм на рівні витягнутої ноги. Клавіатуру слід розміщувати на поверхні столу на відстані 200 мм від краю, зверненого до працюючого.



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд робочого місця з ПК в лабораторії

#### 4.6 Розрахунок витяжного зонту для уловлювання ненаправленого потоку повітря

В даному розділі роботи приводиться озрахунок витяжного зонту для уловлювання ненаправленого потоку повітря шляхом визначення наступних параметрів: швидкіс  $v$  у зоні утворення шкідливостей, обсягу повітря, що відсмоктується, що забезпечують задовільну роботу зонту.

Даними для розрахунку є: габаритні розміри джерела виділення шкідливостей; швидкість поширення їх у приміщенні; висота установки зонту; форма, основні розміри ( $a$ ,  $b$ ) і кут розкриття зонту ( $\alpha$ ).

Установка має такі розміри  $b \times z = 1,5 \times 1,5$  м; швидкість поширення газу CO складає  $0,15$  м/с; швидкість всмоктування газу в поверхні установки  $U_{xy}$  приймаємо  $0,25$  м/с (від краю установки, у крапці А); габарити зонт приймаємо на  $0,2$  м більше габаритів установки з кожної сторони :  $a \times b = 1,9 \times 1,9$  м; висота від краю установки до зонт  $0,7$  м; кут розкриття зонт  $\alpha = 60^\circ$ ; висота витяжного зонт  $H = 1,51$  м.

Розрахункова схема витяжного зонт представлена на рис. 4.5.

Еквівалентний діаметр зонту прямокутної форми визначаємо по формулі:

$$d_{\text{эк}} = 2ab / (a + b), \quad (4.1)$$

де  $a$  – ширина,  $b$  – довжина зонту.

$$d_{\text{эк}} = 2ab / (a + b) = 2 \cdot 1,9 \cdot 1,9 / (1,9 + 1,9) = 1,9\text{м}. \quad (4.2)$$

Визначаємо відносні величини  $\bar{x}_0$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}_1$ ,  $\bar{H}$  у частках еквівалентного діаметра наступним чином:

$$\bar{x}_0 = x_0 / d_{\text{эк}}; \quad (4.3)$$

$$\bar{x} = x / d_{\text{эк}}; \quad (4.4)$$

$$\bar{y}_1 = y_1 / d_{\text{эк}}; \quad (4.5)$$

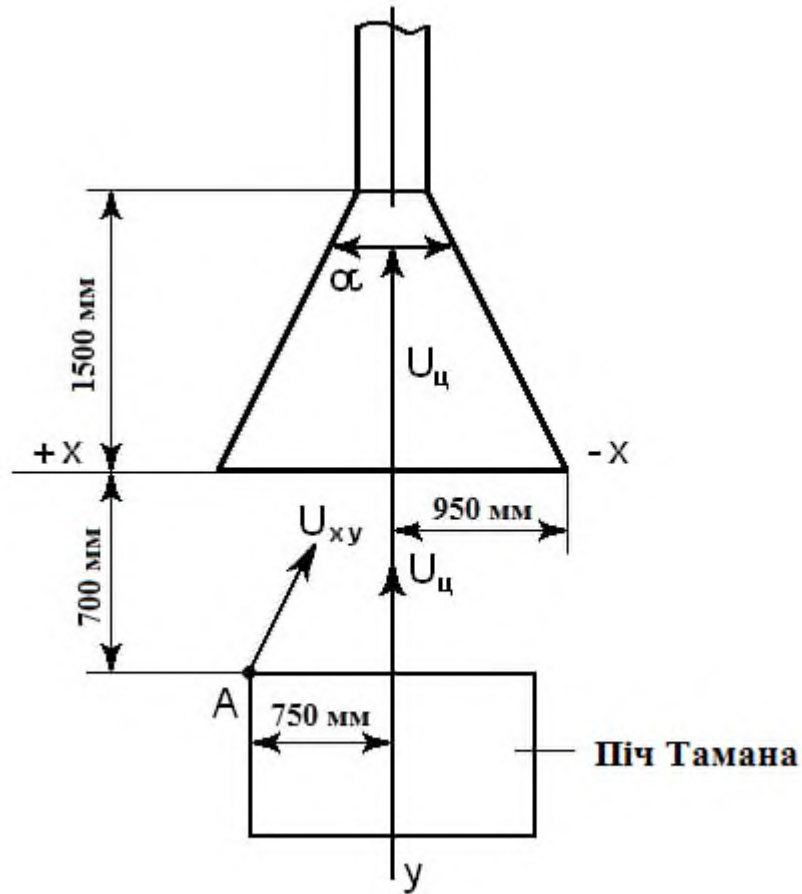


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема витяжного зонту

$$\bar{H} = H / d_{\text{эк}}, \quad (4.6)$$

де  $d_{\text{эк}}$  – еквівалентний діаметр зонту прямокутної форми;

$\bar{x}_0$  – відносна відстань від осі зонту до його крайки;

$x_0$  – відстань від осі зонту до його крайки;

$\bar{x}$  і  $\bar{y}_1$  – координати точки, для якого визначається відносна швидкість  $U_{xy}/U_y$ ;

$x$  – відстань від осі зонту до краю шкідливих виділень (тобто половина  $b$ );

$y_1$  – відстань по вертикалі від крайки зонту до оцінки виділення шкідливості;



$\bar{H}$  – відносна висота витяжного зонта;

$H$  – висота витяжного зонта.

$$\bar{x}_0 = x_0 / d_{\text{ЭК}} = 0,95 / 1,9 = 0,5; \quad (4.7)$$

$$\bar{x} = x / d_{\text{ЭК}} = 0,75 / 1,9 = 0,39; \quad (4.8)$$

$$\bar{y}_1 = y_1 / d_{\text{ЭК}} = 0,7 / 1,9 = 0,37; \quad (4.9)$$

$$\bar{H} = H / d_{\text{ЭК}} = 1,51 / 1,9 = 0,8. \quad (4.10)$$

За графіком знаходимо для  $\bar{y}_1 = 0,37$  значення  $\frac{U_y}{U_u} = 0,425$ . За

формулою знаходимо значення  $U_u$  :

$$U_u = U_{xy} / \left( \frac{U_y}{U_u} - 0,1 \frac{\bar{x}^2}{x_0^2 \times (\bar{y}_1 + 0,27) \times \sqrt{\bar{H}}} \right), \quad (4.11)$$

де  $U_u$  – швидкість в середині зонту;

$\frac{U_y}{U_u}$  – відносна швидкість, в якій  $U_y$  – швидкість повітря на відстані  $y_1$

від зонту до відмітки виділення шкідливостей;

$\bar{x}$  і  $\bar{y}_1$  – координати точки, для котрої визначається відносна швидкість  $U_{xy} / U_u$ ;

$\bar{x}_0$  – відносна відстань від осі зонту до його кромки;

$\bar{H}$  – відносна висота зонта.

$$U_u = U_{xy} / \left( \frac{U_y}{U_u} - 0,1 \frac{\bar{x}^2}{x_0^2 \times (\bar{y}_1 + 0,27) \times \sqrt{\bar{H}}} \right) = 0,25 / \left( 0,425 - 0,1 \frac{0,39^2}{0,5^2 \times (0,37 + 0,27) \times \sqrt{0,8}} \right) = 0,8 \text{ м/с} \quad (4.12)$$

Середня швидкість всмоктування визначається за формулою:

$$U_o = \eta \cdot U_y, \quad (4.13)$$

де  $\eta$  – поправочний коефіцієнт, який визначається за графіком, залежний від кута розкриття зонту  $\alpha$ ;

$U_y$  – швидкість в центрі зонта.

$$U_o = \eta \cdot U_y = 1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ м/с} \quad (4.14)$$

Обсяг відсмоктування повітря розраховуємо за формулою:

$$L = a \cdot b \cdot U_o \cdot 3600,$$

де  $a, b$  – габарити зонту;

$U_o$  – середня швидкість всмоктування зонта.

Прийнято при  $\alpha = 60^\circ$   $\eta = 1$ . Об'єм відсмоктуваного повітря розраховується так:

$$L = abU_o \cdot 3600 = 1,9 \cdot 1,9 \cdot 0,8 \cdot 3600 = 10396,8 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Такий обсяг повітря, що відсмоктується, буде забезпечений за рахунок застосування вентилятора.

Підбор вентилятора здійснювався відповідно до аеродинамічної характеристики вентиляторів. За результатами технічних даних вентилятора був обраний вентилятор типу Ц 14–46 № 4, який має наступну характеристику: потужність – 4 кВт, частота обертання - 1450 об/хв, електродвигун серії - АТ2 - 41 - 4, продуктивність – від 4500 до 10500 м/год [19-24].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто сьогоденний стан та перспективи розвитку процесу

вторинного електротермічного легування та рафінування сталі. Показано можливість застосування вторинного електротермічного легування та рафінування сталі як сучасного процесу позапічної обробки сталі (з застосуванням установки піч-ківш).

2. Запропоновано технологічну схему процесу вторинного електротермічного легування та рафінування сталі. Показано оптимальні електричні режими процесу ВЕЛР з використанням запропонованої експериментальної установки.

3. Встановлено закономірності впливу часу витримки, сили струму та напруги на хімічний склад металу та швидкість процесу вторинного електротермічного легування та рафінування сталі.

4. Встановлено, що при позапічній обробці сталі (з застосуванням процесу ВЕЛР на установці піч-ківш) можлива економія феросплавів, зменшується газовиділення і пилоутворення в порівнянні з існуючими методами легування і розкислення сталі, має місце проведення десульфурзації без введення реагентів, що підвищують вміст неметалевих включень та інше.

## **ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Мельник Я. В. Енергозберігаючі технології як основа для

підвищення конкурентоспроможності гірничо-металургійної продукції. Інвестиції : практика та досвід. 2011. №14. С. 72–76.

2. Хижняк О. С. Сучасний стан металургійних підприємств України : проблеми і перспективи розвитку. *Молодий вчений*. 2017. № 5 (45). С. 762–767.

3. Проблеми чорної металургії України. URL: <http://www.novageografia.com/vogels-1723-1.html> (дата звернення: 15.10.2023).

4. Lindström David. A Study on Desulfurization of Hot Metal Using Different Agents : Doctoral thesis. School of Industrial Engineering and Management. Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology. SE-100 44 Stockholm. 2014. 43 p.

5. Kumar R. V., Liu J. Research for Using Iron & Steelmaking Zinc Laden Dust to Desulphurize Hot Metal. *Steel research international*. 2010. Vol. 81. No. 10. pp. 847–851. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201000175>

6. Kumar R. V., Liu J. Opportunity for using steelmaking/EAF of BOF laden dust to desulfurise hot metal. *2nd International Slag Valorisation Symposium Leuven*. 2011. pp. 287–298.

7. Kumar R.V., Tailoka F. On the possibility of utilizing zinc oxide for desulphurising hot metal. *Waste Processing & Recycling in Mineral Metallurgical Industries : Conf. of Metallurgists, Canadian Inst. Of Metals. Waste Processing V ed. by Sr. Rao et al.* 2004. pp. 667–674.

8. Schrama Frank, Hattum Guido van, Berg Bart van den. The leading not metal desulfurization methods: a comparison between KR, MMI and Co-injection. *Technical contribution to the 46<sup>o</sup> Seminário de Aciaria – Internacional* (August 17th-21st, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil). 2015. pp. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.5151/1982-9345-26624>

9. Schrama Frank Nicolaas Hermanus, Beunder Elisabeth Maria, Berg Bart Van den, Boom Rob. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2017. Vol 44. No 5. pp. 333–343. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>

10. Buğra Şener, Rainer Hüskén, Jürgen Cappel. Desulfurization Strategies in Oxygen Steelmaking. *Association for Iron & Steel Technology* (April 2013). 2013. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289440578\\_Desulphurization\\_strategies\\_in\\_oxygen\\_steelmaking](https://www.researchgate.net/publication/289440578_Desulphurization_strategies_in_oxygen_steelmaking)
11. Kruh R. F. Diffraction studies of the structure of liquids. *Chem. Rev.* 1962. V.62. pp. 319-342.
12. Wagner C. Thermodynamic Investigations on Ternary Amalgams. *Journal of Chemical Physics.* 1951. V. 19. pp. 626-631.
14. Hultgren R., Orr R. L., Anderson P. D. and Kelley K. K. Selected Values of Thermodynamic Properties of Metals and Alloys . *New York - J. Wiley.* 1963.
14. Winkler T. B., Chipman J. *Trans. AIME.* 1946. V. 167. P. 111.
15. Харченко О. В., Щетінін О. В. Економія феросплавів з використанням технології ВЕЛР. Матеріали XVIII науково-технічної конференції студентів, магістрантів і викладачів ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА. 2013. Т1. С. 12.
16. Асаулова Ю. О. Оптимізація параметрів розкислення-легування сталі з використанням технології ВЕЛР. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/1614?locale-attribute=en> (дата звернення: 19.10.2023).
17. Спосіб позапічної обробки сталі : пат. 132087 Україна : МПК С21С 7/06 (2006.01) ; заявл. 06.09.2018 ; опубл. 11.02.2019.
18. Харченко О. В. Навчально-дослідницький програмний комплекс «EXCALIBUR». Версія 2.00. URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1133179/mod\\_resource/content/1/Excalibur.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1133179/mod_resource/content/1/Excalibur.pdf) (дата звернення: 19.10.2023).
19. Пожарова О. В. Охорона праці : навч. посіб. Одеса, 2022. 86 с.
20. Вахонєва Т. М. Основи охорони праці в Україні : навч. посіб. Київ : ВД «ДАКОР», 2019. 505 с.

21. Изгородін В. А. Охорона праці на підприємстві : практич. посіб. з розробки та ведення документації. Київ : Видавництво «ФОРТ», 2019. 440 с.

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

23. Пістун І. П., Катренко Л. А., Кіт Ю. В. Охорона праці : навч. посіб. з практикумом. Київ : Університетська книга, 2020. 540 с.

24. Левченко О. Г., Полукаров О. І., Зацарний В. В., Полукаров Ю. О., Землянська О. В. Охорона праці та цивільний захист : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 420 с.

## **ДОДАТКИ**

### **ДОДАТОК А**

# НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні



III ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»

17-20 жовтня 2023 року



<b>Верьовкін Л.Л., Сушко А.А.</b> Мікроелектронна система аналізу фотометричної інформації.....	604
<b>Кісельов Є.М., Кісельов В.Є.</b> Розробка датчика озону з бездротовим каналом передавання даних.....	606
<b>Кісельов Є.М., Постернак О.С.</b> Аналіз особливостей сучасних датчиків для вимірювання концентрації озону у рідині.....	608
<b>Критська Т.В., Гаґошидзе А.Ю., Науменко М.С.</b> Деградація сонячних елементів та шляхи її зниження.....	610
<b>Критська Т.В., Грідін О.С., Баженов Є.В.</b> Нові напрями модернізації промислової технології кремнію напівпровідникової чистоти.....	612
<b>Світанько М.В., Костик О.В., Ніколаско Д.Ю., Пішуков С.В.</b> Підсилювач лазерного випромінювача для дистанційного керування БПЛА.....	613

### **СЕКЦІЯ «МЕТАЛУРГІЯ. ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ»**

<b>Бєлоконь Ю.О., Немкіна І.Г.</b> Аналіз моделей зміцнення низьколегованих сталей при холодній деформації.....	615
<b>Бєлоконь Ю.О., Плюц І.А.</b> Отримання алюмінідів нікелю при термохімічному пресування.....	616
<b>Бєлоконь Ю.О., Шавкуненко А.В.</b> Формування поверхні металу в процесі холодної пластичної деформації.....	617
<b>Бєлоконь Ю.О., Шошов А.В.</b> Аналіз поперечної різновшчинності та дефектів форми штаби при прокатці в нерегульованих клітях.....	618
<b>Бєлоконь Ю.О., Булігін М.В.</b> Оптимізація прокатки круглого профілю з високолегованих сталей на блвмінгу.....	619
<b>Бєлоконь Ю.О., Можаров О.В.</b> Оптимізація режимів прокатки вуглецевих сталей при гарячій деформації.....	620
<b>Бєлоконь Ю.О., Федько М.В.</b> Поверхнєве зміцнення титанових сплавів в умовах нестационарних процесів обробки.....	621
<b>Бондаренко Ю.В., Зайцев Д.О.</b> Аналіз процесу прокатування слябів на слябінгу 1150.....	622
<b>Бондаренко Ю.В., Іванченко Д.С.</b> Визначення показників коефіцієнта положення рівнодіючих сил при прокатуванні штаб.....	623
<b>Бондаренко Ю.В., Клименко М.Д.</b> Аналіз переходних зон композиційних матеріалів в системі сталь-бронза отриманих імпульсними методами обробки тиском.....	624
<b>Бондаренко Ю.В., Клименко Д.Є.</b> Вплив технологічного мастила на якість металу при прокатуванні штаб на неперервних станах.....	625
<b>Бондаренко Ю.В., Кривцов О.О.</b> Аналіз розширення металу при прокатуванні штаб в лабораторних умовах.....	626
<b>Бондаренко Ю.В., Ткаченко О.В.</b> Аналіз технології та режиму обтиснення на станах холодної прокатки на натягіння штаби.....	627
<b>Бондаренко Ю.В., Бєлоконь О.С.</b> Формування структури та властивостей високолегованих сталей при гарячій деформації.....	628



<b>Бондаренко Ю.В., Гальченко А.О.</b> Аналіз технологічних особливостей прокатки штаб на реверсивному стані 1680.....	629
<b>Бондаренко Ю.В., Лобко Д.С.</b> Аналіз процесів поверхневого зміцнення та визначення жаростійкості поверхневого шару на титанових сплавах.....	630
<b>Воденнікова О.С., Бондаренко Я.В.</b> Техніко-економічне обґрунтування доцільності модернізації агломераційної фабрики ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».....	631
<b>Воденнікова О.С., Кольчак Д.Р., Піщенко К.А.</b> Аналіз сучасних способів отримання карбїду бора.....	633
<b>Воденнікова О.С., Фоцан В.О.</b> Технологія виробництва феросилікоалюмінію з застосуванням вторинних матеріалів.....	635
<b>Воденнікова О.С., Головков П.В.</b> аналіз можливості застосування криогенного бластингу як методу підготовки виливниць до розливки сталі.....	636
<b>Воденнікова О.С., Харченко О.В., Радомський В.В.</b> Щодо питання вторинного електротермічного легування і рафінування сталі в установках піч-ківш.....	637
<b>Воляр Р.М., Паламаренко А.Ю.</b> Дослідження впливу схеми підвищування Al прутків у виливниці на характер кипіння сталі.....	639
<b>Воляр Р.М., Жмурков П.В.</b> Обробка червоних шлаків для металургійної переробки.....	641
<b>Воляр Р.М., Жмуркова К.І., Жмурков П.В.</b> Стабілізація фізико-хімічних характеристик глинозему шляхом управління параметрами декомпозиції.....	642
<b>Воляр Р.М., Куц В.В., Норченко В.В.</b> Леговані сталі для низьких температур.....	643
<b>Кириченко О.Г., Гузенко Р.І., Піщенко К.А.</b> Сучасні підходи до збільшення частки залізовмісних відходів у балансі сировини металургійного виробництва.....	646
<b>Кириченко О.Г., Дьомін О.С., Норченко В.В.</b> Варіанти обробки металу в сталерозливних ковшах інертними газами.....	647
<b>Кириченко О.Г., Ісенко О.В., Борсук С.А.</b> Основні технології виплавки колісної сталі.....	649
<b>Кириченко О.Г., Калюга О.А., Іванніков С.В.</b> Обґрунтування необхідності використання ПВП в доменних цехах металургійних підприємств України.....	651
<b>Кириченко О.Г., Кузьменко Р.С., Калиновський М.С.</b> Особливості високотемпературної обробки розплаву для постійних магнітів зі сплаву ЮНДК24.....	654
<b>Кириченко О.Г., Хвостов В.Р., Євтушенко Д.С.</b> Дослідження технології виплавки безкремністої конвертерної сталі.....	656
<b>Кругляк Д.О., Сенік В.О.</b> Визначення оптимальних параметрів волочіння, з метою зменшення зносу робочих поверхонь та зменшення обривності дроту.....	658

2. Техніко-економічне обґрунтування сучасних технологій виробництва : навч. посібн. / Ф. В. Новіков, Д. Ф. Новіков, О. А. Єрмоленко та ін. Дніпро : ЛІРА, 2022. 256 с.

3. Тарасов В. К., Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Манідіна Є. А. Удосконалення методів підготовки виливниць до розливки сталі. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 3. С. 28–35.

4. Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Манідіна Є. А. Застосування криогенного бластингу як сучасного методу очищення від забруднень виливниць для розливки сталі. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 4. С. 85–91.

УДК 669.046.582.2

Воденнікова О.С., к.т.н., доц., Харченко О.В., к.т.н., доц.,  
 Радомський В.В., магістрант 2 курсу,  
 Наукові керівники – к.т.н., доцент Воденнікова О.С.,  
 к.т.н., доцент Харченко О.В.

### **ЩОДО ПИТАННЯ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ В УСТАНОВКАХ ПІЧ-КІВШ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Відомо, що перехід на безперервну розливку сталі та підвищення вимог до її якості привели до необхідності створення спеціальної установки доведення сталі – установки піч-ківш, за допомогою якої передбачається можливість завершення процесу розкислення-легування сталі в більш сприятливих умовах, ніж у сталеплавильному агрегаті під час випуску плавки, і регулювання температури металу шляхом його охолодження [1].

Безпосередньо питання можливості використання установки піч-ківш для вторинного легування і рафінування сталі (процес ВЕЛР) [2–4] неодноразово виникав під час аналізу розподілу сірки між металом і шлаком у процесі електрошлакового переплаву постійним струмом. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей багатокомпонентних систем «метал-шлак-газ» не дозволяло ефективно керувати цим процесом. Введення «електрохімічної» поправки в парціальні термодинамічні функції шлаку, використання ентальпійного теплового балансу і нової статистичної моделі конденсованої фази істотно покращило передбачувальні здібності моделей і відкрило практичні можливості для розробки теоретичних основ і технології принципово нових процесів, таких як вторинне електротермічне у процесі обробки металу в піч-ковші. Аналіз процесу вторинного легування і рафінування сталі проводиться за допомогою навчально-дослідницького програмного комплексу «EXCALIBUR» [5].

Використання методу вторинного електротермічного легування і рафінування для обробки сталі в модернізованих установках піч-ківш дозволяє отримати такі основні переваги:

1. Економія дороговартісних феросплавів, синтетичних шлаків та порошкоподібних модифікаторів сталі.
2. Можливість утилізації рядових конвертерних, мартенівських та доменних шлаків.
3. Можливість проведення процесу десульфурації та дефосфорації металу без запровадження реагентів, що підвищують вміст неметалевих включень.
4. Можливість введення у розплав високоактивних легуючих добавок з максимальним ступенем засвоєння.
5. Зменшене газовиділення та пилоутворення порівняно з існуючими методами легування та розкислення сталі.

Таким чином, ВЕЛР є новим процесом позапічної обробки сталі. Його можливості та особливості технологічної реалізації перебувають у стадії вивчення та розробки. Однак перелічені переваги ВЕЛР дозволяють припустити, що цей процес, поряд з іншими методами позапічної обробки сталі, знайде широке застосування у металургійному виробництві.

#### **Список використаних джерел**

1. Пристрій та призначення агрегату позапічної обробки сталі типу піч-ківш. URL: <http://surl.li/oaesa> (дата звернення: 19.10.2023).
2. Харченко О. В., Щетинін О. В. Економія феросплавів з використанням технології ВЕЛР. *Матеріали XVIII науково-технічної конференції студентів, магістрантів і викладачів ЗДІА*. Запоріжжя : ЗДІА. 2013. Т1. С. 12.
3. Асаулова Ю. О. Оптимізація параметрів розкислення-легування сталі з використанням технології ВЕЛР. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/1614?locale-attribute=en> (дата звернення: 19.10.2023).
4. Спосіб позапічної обробки сталі : пат. 132087 Україна : МПК С21С 7/06 (2006.01) ; заявл. 06.09.2018 ; опубл. 11.02.2019.
5. Харченко О. В. Навчально-дослідницький програмний комплекс «EXCALIBUR». Версія 2.00. URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1133179/mod\\_resource/content/1/Excalibur.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1133179/mod_resource/content/1/Excalibur.pdf) (дата звернення: 19.10.2023).