МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

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

Кваліфікаційна робота

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

на тему_____ Мікролегування сталі лужноземельними металами з ____
використанням технології ВЕЛР _____
_____
_____

Виконав: студент __4__курсу, групи *6.1362-м-з*

_Анохін А.Б._____
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
___*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
Спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
_____*Металургія*_____
(шифр і назва)

Керівник _Харченко О.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _Нестеренко Т.М._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2026 року

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

Кафедра ___*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти ___*перший (бакалаврський) рівень*_____
(перший (бакалаврський) рівень)

Спеціальність _____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

_____*Ю.О. Бєлоконь*

"_ _" ____2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

_____*Анохін Андрій Борисович*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)__*Мікролегування сталі лужноземельними металами з використанням технології ВЕЛР*_____
_____
_____

керівник роботи (проєкту)_____*Харченко Олександр Вікторович__ к.т.н, доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" 12 2025 року № 1831-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*15.05.2026*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) __*Визначення закономірностей та оптимальних режимів електротермічного легування сталей 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 35CrSiMn5-5-4 лужноземельними металами за технологією ВЕЛР*
_____
_____
_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)__*Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина, Металургійна частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки, Перелік джерел посилань, Додатки.*_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентаційний матеріал на 12 слайдах _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Загальна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Технологічна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Металургійна частина	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., завідувач кафедри*		

7. Дата видачі завдання__*29.01.2026*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*10.02.2026*	
2	*Реферат*	*20.02.2026*	
3	*Загальна частина*	*01.03.2026*	
4	*Технологічна частина*	*30.03.2026*	
4	*Металургійна частина*	*15.04.2026*	
5	*Охорона праці та техногенна безпека*	*30.04.2026*	

Студент __ _____ *А.Б. Анохін*
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____ *О.В. Харченко*
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Ю.О. Бєлоконь*
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 99 сторінок, 43 рисунка, 40 таблиць, 30 джерел.

КРИВА ЕЛЕКТРОНЕЙТРАЛЬНОСТІ, СТАЛЬ, ШЛАК, ШИХТА, ЛЕГУВАННЯ, ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ, МОДИФІКУВАННЯ, РАФІНУВАННЯ.

У загальній частині кваліфікаційної роботи розглянуто метод хімічних потенціалів Гіббса, основи процесів легування і модифікування сталі, термохімічний аналіз і математичну модель розчинення лужноземельних металів у сталі.

У технологічній частині зроблено розгляд передумов розробки технології вторинного електротермічного легування і рафінування металу (ВЕЛР), викладено концепцію кривої електронейтральності, наведено принципові схеми експериментальної та промислової установки ВЕЛР.

У металургійній частині розглянуті можливості використання навчально-дослідницького програмного комплексу «Excalibur в якості інструмента обчислювально-експериментального дослідження термо-динамічної системи «метал-шлак-газ». Наведено об’єкт і методику дослідження. Досліджено можливість легування сталей 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 35CrSiMn5-5-4 лужноземельними металами за технологією ВЕЛР. Розглянуті характеристики поведінки лужноземельних металів, що залежать від зміни питомого заряду шлаку при високому тиску. Підтверджено практичне значення теми роботи в металургійній галузі.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуто характеристики потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника киснево-конвертерного цеху.

ABSTRACT

Bachelor's qualification work contains 99 pages, 43 figures, 40 tables, 30 sources.

ELECTRONEUTRALITY CURVE, STEEL, SLAG, CHARGE, ALLOYING, ALKALINE EARTH METALS, MODIFICATION, REFINING.

The general part of the qualification work considers the Gibbs chemical potential method, the basics of steel alloying and modification processes, thermochemical analysis and a mathematical model of alkaline earth metals dissolution in steel.

In the technological part, the prerequisites for the development of the technology of secondary electrothermal alloying and metal refining (SETAR) are considered, the concept of the electroneutrality curve is outlined, and the schematic diagrams of the experimental and industrial SETAR installation are given.

In the metallurgical part, the possibilities of using the educational and research software complex “Excalibur” as a tool for computational and experimental research of the thermo-dynamic system “metal-slag-gas” are considered. The object and methodology of the study are presented. The possibility of alloying steels 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 and 35CrSiMn5-5-4 with alkaline earth metals using SETAR technology are investigated. The characteristics of the behavior of alkaline earth metals, which depend on the change in the specific charge of the slag at high pressure, are considered. The practical significance of the topic of work in the metallurgical industry is confirmed.

In the section "Occupational safety and technogenic safety", the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting the worker of the oxygen converter shop are considered.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕРМОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ 9
1.1 Ентальпійна термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ» 9
1.2 Основи процесу легування сталі 11
1.3 Модифікування сталі 12
1.3.1 Модифікування неметалевих включень у сталі, обробленій лужноземельними металами 14
1.3.2 Математична модель процесу розчинення лужноземельних металів у сталі 16
1.3.3 Математичні моделі для розрахунку характеристик кінетики розчинення лужноземельних металів у сталі 18
1.4 Висновки 21
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЕЛР 22
2.1 Передумови розробки технології ВЕЛР 22
2.2 Крива електронейтральності 23
2.3 Схема експериментальної установки ВЕЛР 26
2.4 Принципова схема промислової установки ВЕЛР 27
2.4 Висновки 28
3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВЕЛР 29
3.1 Програмне забезпечення «Excalibur» 29
3.2 Об'єкти дослідження 34
3.2.1 Сталь 12MnSi4-3 - конструкційна сталь для зварних конструкцій 34
3.2.2 Сталь 30MnSi4-3 - низьколегована сталь для виливків 34
3.2.3 Сталь 9MnSi6-3 - конструкційна сталь для зварних конструкцій 35
3.2.4 Сталь 35CrSiMn5-5-4 - низьколегована конструкційна сталь 35
3.3 Побудова кривої електричної нейтральності 35

3.4 Результати дослідження 37
3.4.1 Вміст кальцію і магнію в металі і шлаку 37
3.4.2 Оптимізація кількості легуючих матеріалів для низьколегованих сталей 54
3.4.3 Хімічний склад металу і шлаку 65
3.5 Висновки 77
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 78
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища киснево-конверторного цеху 78
4.2 Заходи пожежної безпеки 80
4.3 Заходи з електробезпеки 81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 84
Додаток А 88

ВСТУП

В електрометалургії широко застосовуються електротермічні процеси. Електротермічні технології забезпечують видобування металів із руд і концентратів, виробництво чорних та кольорових металів, а також їхніх сплавів. У таких процесах електрична енергія грає роль джерела тепла, необхідного для реалізації технологічних задач. У даних процесах електрична енергія сприяє окислювально-відновним реакціям, які виникають на межі розділу фаз під час проходження електричного струму через електроліт.

Електротермічні процеси охоплюють такі операції, як плавка сталі у дугових і індукційних печах, спеціалізована електрометалургія, рудовідновна плавка (зокрема виробництво феросплавів і штейнів), виплавка чавуну у шахтних електропечах, отримання нікелю, олова та інших металів.

Мета роботи полягає у вивченні впливу питомого заряду шлаку і тиску газової фази на вміст лужноземельних металів кальцію та магнію у процесі вторинного електротермічного легування й рафінування металу. Крім того, необхідно визначити оптимальні параметри технологічного процесу ВЕЛР та дослідити поведінку цих елементів.

Об'єкт дослідження – система «метал-шлак-газ» при позапічній обробці низьколегованих сталей у установках типу ківш-піч. Предмет дослідження – термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» в процесі ВЕЛР з урахуванням можливого газовиділення, маса і склад газової фази, маса й склад шлаку, фізико-хімічні властивості металу і молекулярний склад газу. Досліджуються також можливості зменшення втрат легуючих елементів при збільшенні позитивного заряду шлаку. Актуальність теми зумовлена тим, що у процесі легування сталі лужноземельними металами методика ВЕЛР з використанням підвищеного тиску дає змогу замінювати дорогі порошкові дроти на металургійні шлаки. Ця технологія також забезпечує практично повне видалення сірки і кисню з металу, що значно покращує його якість.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕРМОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ

1.1 Ентальпійна термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ»

У загальному випадку пряма задача представлена у вигляді системи рівнянь, які описують рівноважні маси елементів у металах, шлаках та газах:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \overline{\mathbf{m}}_{\square}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}, p, T) = \mathbf{0}, \tag{1.1}$$

де $\mathbf{m}$ – вектор маси елементів в системі;

$\overline{\mathbf{m}}_{\square}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}$ – вектори рівноважних мас елементів у металі, шлаку і газовій фазі;

p, T - тиск і температура в системі.

Розв’язання рівняння (1.1) дозволяє визначити очікувані значення рівноважної маси елементів у металі, шлаку та газі за фіксованих значень тиску та температури системи. Водночас розподіл елементів між фазами суттєво залежить від температури, що випливає з цього ж рівняння. Температура, у свою чергу, змінюється внаслідок теплових ефектів, супроводжуючих хімічні реакції, які призводять до перерозподілу елементів між фазами. Це може статися, наприклад, при додаванні в систему окислювачів чи розкислювачів. Окрім того, кінцеве значення температури системи визначається теплофізичними властивостями елементів, такими як стандартна ентальпія та теплоємність, і обчислюється згідно з рівнянням теплової рівноваги. Отже, рівноважний склад і кінцеву температуру системи можна визначити, одночасно розв’язуючи рівняння матеріального та теплового балансу.

Додавання рівняння теплової рівноваги до системи рівнянь (1.1) дає змогу включити температуру T та рівноважні маси хімічних елементів у кожній фазі до списку шуканих величин. Таким чином, у загальному вигляді пряма задача формулюється наступним чином [1]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \overline{\mathbf{m}}_{\square}, \overline{\mathbf{m}}_{0}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}, p, T, Q) = \mathbf{0}, \tag{1.2}$$

де Q – теплова енергія, що надходить в систему у вигляді електроенергії та інших енергоносіїв за вирахуванням втрат тепла.

Система рівнянь (1.2) представляє собою загальний вигляд системи матеріального і теплового балансів.

Рівняння теплового балансу ґрунтується на першому та другому законах термодинаміки. Відповідно до цього рівняння, зокрема в ізобарних процесах, зміна ентальпії системи дорівнює кількості поглинутого тепла Q.

$$\Delta H_P = H(T) - H_0 = Q_E - Q_L, \tag{1.3}$$

У формулі $H(T)$ — ентальпія кінцевого стану системи; H_0 - ентальпія початкового стану системи; Q_E - надходження теплоти від енергоносіїв; Q_L - втрати тепла;

У всіх розрахунках ентальпія визначається одним із таких рівноцінних методів:

1) За рівнянням Гіббса-Гельмгольца: $H = G - T(\partial G/\partial T)_P$;

2) За рівнянням Вант-Гофа: $H = (\partial(G/T)/\partial(1/T))_P$.

Додатково, парціальну молярну ентальпію змішування можливо розрахувати двома іншими перевіреними методами [2]:

3) За відомою активністю: $h_i^M = -RT^2\left(\partial \ln a_i / \partial T\right)_P$;

4) За відомим коефіцієнтом активності: $h_i^M = R\left(\partial \ln \gamma_i / \partial(1/T)\right)_P$.

Формула для обчислення теплоємності, яка включає як стандартну, так і змішану теплоємність, має наступний вигляд:

$$C_P(T) = -T\frac{\partial^2 G(T)}{\partial T^2} = \frac{\partial H(T)}{\partial T}. \tag{1.4}$$

Відтак, ентальпійна теплова модель виступає невід'ємною та логічно узгодженою складовою будь-якої термодинамічної моделі, слугує підґрунтям для розрахунків рівноваги й ґрунтується на методі хімічних потенціалів Гіббса [3].

1.2 Основи процесу легування сталі

Легування металів – це процес додавання до сталі легуючих елементів, який дозволяє отримати леговану сталь з покращеними фізичними, хімічними та механічними властивостями.

Під час легування до складу сталі вводять спеціальні домішки, які можуть бути як новими для стандартних сталей елементами, так і компонентами, що вже присутні у сталі в малих кількостях, наприклад, вуглець (C), марганець (Mn), кремній (Si), фосфор (P), сірка (S).

Операції легування часто супроводжуються розкисленням, особливо коли додаються такі елементи, як марганець, кремній чи алюміній.

За впливом на властивості сталі легуючі компоненти розділяють на дві основні категорії:

1. Елементи, що розширюють γ-зону твердого розчину (наприклад, нікель, марганець, кобальт).

2. Елементи, що звужують γ-зону або утворюють сплави з вузьким діапазоном γ (такі як берилій, алюміній, кремній, фосфор, титан, ванадій, хром, молібден, вольфрам, ніобій, тантал, цирконій, церій).

За спорідненістю до кисню легуючі елементи також поділяють на дві групи:

1. Елементи з меншою спорідненістю до кисню порівняно із залізом (нікель, кобальт, молібден, мідь).

2. Елементи з більшою спорідненістю до кисню в порівнянні із залізом (кремній, марганець, алюміній, хром, ванадій, титан).

Існують також домішки сплавів, що можуть бути небезпечними для здоров’я через токсичність їх парів чи сполук. Серед них – сірка, свинець, селен, телур і барій. Ці елементи додаються безпосередньо в метал під час його розливання із застосуванням спеціальних заходів безпеки. Домішки вводять у метал в чистому вигляді (наприклад, злитки чистої міді, алюмінію чи нікелю), у формі сплавів на кшталт ферросиліцію чи ферромарганцю або

ж у складному вигляді (зразки оксиду ванадію, марганцевої руди чи молібдату кальцію).

З метою здешевлення виробництва сталі часто застосовують дешеві матеріали – такі як шлаки або руда – які містять необхідні компоненти. Іноді для процесу легування та розкислення використовують екзотермічні брикети, що складаються з оксидів легуючих елементів (наприклад, оксид хрому або марганцева руда), порошкових розкислювачів і відновників (алюмінію чи магнію), а також окислювачів (як селітра). Коли метал потрапляє в ємність з такими брикетами, вони вступають у реакцію з виділенням тепла. Внаслідок цієї реакції відновлюються домішки сплаву з оксидів і підтримується температура металу на оптимальному рівні.

1.3 Модифікування сталі

Різноманітні методи очищення металів або видалення неметалевих включень, які утворюються в їх складі, не завжди демонструють високу ефективність. Крім того, досягнення позитивних результатів часто супроводжується значними фінансовими витратами, що може знижувати економічну доцільність процесів позаагрегатної обробки металів. У таких випадках рекомендовано вдатися до модифікування сталі та неметалевих включень. Це передбачає вплив на кристалічну структуру металу, а також зміну складу, морфології та розміру включень. При цьому видалення неметалевих включень із розплаву не є обов’язковим, що дозволяє суттєво знизити питомі витрати на обробку. Для модифікування використовуються спеціальні речовини – модифікатори на основі лужноземельних і рідкоземельних металів (ЛЗМ і РЗМ). Їх основна функція полягає в нейтралізації негативного впливу кисневмісних і сірковмісних включень.

У більшості випадків модифікування спрямоване на сфероїдизацію неметалевих включень, а також на зменшення їх розмірів і рівномірний розподіл всередині металу. Сфероїдизація дозволяє знизити концентрацію

напруги навколо нерегулярних (переважно гострих) включень, що зменшує ризик передчасного пошкодження сталевих виробів.

У результаті модифікування утворюються сульфіди, оксиди та оксисульфіди ЛЗМ і РЗМ, які мають підвищені температури плавлення порівняно з залізовмісними аналогами. Завдяки цьому вони не деформуються під час гарячого пресування, що виключає ймовірність розтріскування або розшарування металу при високих температурах (явище червоноламкості).

На підставі практичного досвіду можна запропонувати кілька рекомендацій щодо технології модифікування сталі:

1. Модифікатор слід додавати у попередньо розкислений метал, щоб уникнути прямої взаємодії активних елементів (ЛЗМ і РЗМ) з киснем у розплаві. Для більш ефективного застосування ці речовини можна подавати на певну глибину у вигляді порошкового проводу або інертним газовим потоком, що мінімізує їх миттєве випаровування або втрату.

2. Питома витрата модифікатора залежить від його складу, способу введення, рівня окислення й забрудненості металу, а також від особливостей обробки. Для деяких елементів (Ca, РЗМ, Ti, V тощо) існує оптимальна концентрація в металі, яка забезпечує найкращі механічні та експлуатаційні характеристики готового продукту. Наприклад, численні дослідження підтверджують існування оптимального вмісту РЗМ, величина якого визначається вмістом кисню та сірки в металі. Зазвичай витрата крупнозернистих або колотих модифікаторів складає 2,0-4,0 кг на 1 т сталі. При додаванні модифікатора під час розливання металу ця норма може знизитися до 1,0-1,5 кг/т. Використання порошкових дротів для введення реагенту в ковші дозволяє досягти ще більшої економії – на рівні 0,5-0,7 кг/т.

3. При тривалому перебуванні розкисленого металу в ковші, особливо за умов кислого футерування печі та присутності окисленого шлаку, хімічний склад металу наприкінці розливання може суттєво змінитися порівняно з початком процесу. Зокрема, підвищення концентрації азоту спричиняє значне зниження вмісту алюмінію та марганцю. Крім того, може

спостерігатися зменшення концентрації активних елементів, таких як кальцій (Ca), рідкісноземельні метали (PZM), титан (Ti) тощо, що призводить до зниження ефективності модифікування та його нестабільності.

Обробка металу модифікатором дозволяє зменшити кількість неметалевих включень, підвищити його рідкоплинність, що дає можливість знизити температуру заливки на 20-30 °C і скоротити тривалість заливання до 20%.

У цілому процес модифікування сталевих і неметалевих включень демонструє значну ефективність під час позаагрегатної обробки металів, забезпечуючи мінімальні витрати, які складають лише невелику частину собівартості готової продукції.

1.3.1 Модифікування неметалевих включень у сталі, обробленій лужноземельними металами

У багатьох випадках основним завданням при обробці сталі ЛЗМ є не лише видалення сірки, а й модифікація хімічного складу, фізичної форми та властивостей неметалевих включень. Ця процедура, відома як модифікування неметалевих включень, спрямована на поліпшення характеристик матеріалу.

Наразі алюміній має широке застосовування для розкислення сталі. Однак значне залишкове накопичення алюмінію призводить до появи оксидних включень, аналогічних за складом чистому оксиду алюмінію, що небажано. Наприклад, у процесі лиття включення оксиду алюмінію можуть осідати на стінках форм, спричиняючи їх обмеження чи повне закупорювання. Під час прокатки такі включення мають властивість руйнуватися внаслідок своєї крихкості, при цьому їх частини вирівнюються вздовж ліній деформації. Це може спричинити небажану анізотропію механічних властивостей сталі. Тому перед розливкою часто виникає потреба у заходах, що спрямовані на зміну властивостей неметалевих включень у рідкому металі та після охолодження чи гартування сталі. Одним із

ефективних методів вирішення цієї проблеми є застосування технології обробки лужноземельними металами.

Серед сучасних способів модифікування включень у розкисленій алюмінієм сталі найбільш поширеним є використання кальцієвого розплаву. Кальцій активно взаємодіє з киснем у сталі, частково замінюючи алюміній в оксидних включеннях. За достатньо високої концентрації кальцію неметалеві оксидні включення стають переважно кальцієвими алюмінатами змінного складу. У певних випадках ці алюмінати покриваються оболонками сульфідів і оксисульфідів.

Результатом такого модифікування має бути формування кальцієвих алюмінатів, збагачених оксидом кальцію, таких як $CaO•2AlO_3$, $CaO•Al_2O_3$ або навіть фаз із вищим вмістом оксиду кальцію. Як показано на графіку стану системи $CaO – Al_2O_3$ (див. рисунок 1.1), температура плавлення цих сполук значно вища температури обробки сталі тиском після її виплавки. Завдяки цьому кальцієвий алюмінат певного складу залишається у твердому стані під час виробництва. Утворені включення набувають сферичної форми, що зберігається в загартованому матеріалі.

Сферична форма таких включень забезпечує мінімальний ризик зміни форми чи розмірів при термопластичній деформації сталі. Це позитивно позначається на механічних та експлуатаційних характеристиках готового матеріалу, підвищуючи його якість та довговічність.

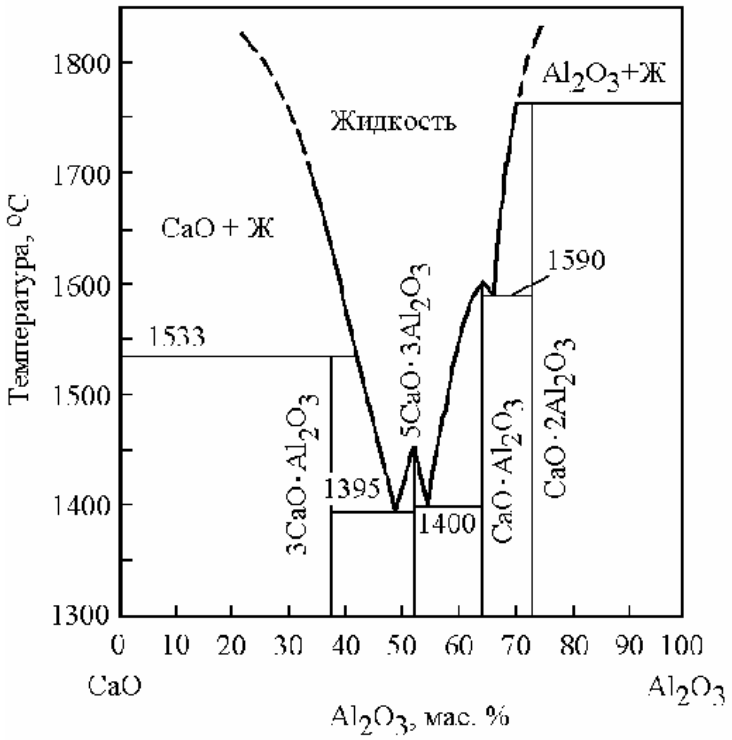


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи CaO – Al_2O_3

Багато дослідників зазначають, що для отримання оксидних неметалевих включень із заданим складом у сталі, розкисленій алюмінієм, необхідно забезпечити вміст алюмінію в сталі перед розливанням понад 0,02%. Окрім цього, слід дотримуватися таких співвідношень: [%Ca]/[%Al] більше 0,15, а [%Ca]/[%S] – у межах 0,2-0,3 [6].

1.3.2 Математична модель процесу розчинення лужноземельних металів у сталі

Експериментальні дослідження показали, що попереднє розкислення та глибока десульфурація металу є важливими умовами для розчинення значної кількості ЛЗМ у сталі. Водночас спостерігається різке зменшення швидкості хімічної взаємодії між парами реагентів і домішками у розплаві. Це вказує на те, що зміна маси парових бульбашок ЛЗМ, які плавають у металі, переважно обумовлена процесом розчинення реагентів у сталі.

Як приклад можна розглянути зміну маси бульбашок пари кальцію, що знаходяться в сталі. Якщо концентрацію кальцію, який розчинився у металі, позначити у відсотках від загальної маси металу, тоді процес розчинення бульбашки масою *m* описується наступним рівнянням:

$$dm = -\frac{\beta_{Ca}\rho}{100}([Ca]_n - [Ca])Fdt, \quad (1.5)$$

де β_{Ca} – коефіцієнт масопередачі кальцію в сталі, м/с; $[Ca]_n$ і $[Ca]$ – концентрація кальцію біля поверхні бульбашок пари кальцію в сталі та в об'ємі металу, %.

Вираз (1.5) можна звести до наступної форми:

$$dm = -\frac{\beta_{Ca}\rho amRT([Ca]_n-[Ca])dx}{100\mu\nu[P_O+\rho g(H-x)]}. \quad (1.6)$$

Розв'язок рівняння (1.6) можна отримати у вигляді:

$$\eta = 1 - e^{-\psi([Ca]_n-[Ca])}, \quad (1.7)$$

$$\psi = \frac{\beta_{Ca}aRT}{100\mu\nu g} ln \frac{P_O+pgH}{P_O}.$$

Для визначення середнього ступеня розчинення та засвоєння кальцію в сталі під час обробки, рівняння (1.7) потрібно представити у такій формі:

$$\bar{\eta} = 1 - e^{-\psi([Ca]_n-[\overline{Ca}])}, \quad (1.8)$$

де $[\overline{Ca}]$ – середній вміст кальцію в сталі при обробці, %.

Під час обробки сталі кальцієм процеси надходження кальцію в розплав від підіймаючихся бульбашок пари та його видалення через окислення й випаровування відбуваються одночасно. Відомо, що швидкість видалення кальцію з металу описується кінетичним рівнянням реакції першого порядку, яке залежить від концентрації розчиненого кальцію в металі. З огляду на це, загальну зміну вмісту кальцію в сталі можна представити у вигляді залежності:

$$d[Ca] = dq\left[1 - e^{-\psi([Ca]_n-[Ca])}\right] - k[Ca], \quad (1.9)$$

де k – константа швидкості реакції видалення кальцію з розплаву.

Розв'язок рівняння (1.9) неможливо отримати аналітично. Аналіз залежності ступеня засвоєння кальцію під час десульфурації металу від концентрації сірки в сталі показує, що окислення частково утворених сульфідів можна врахувати шляхом коригування коефіцієнта масопередачі сірки. Аналогічно допускається можливість врахування втрат кальцію з розплаву. Це досягається шляхом заміни коефіцієнта масопередачі кальцію на його еквівалентне значення, яке одночасно враховує швидкість надходження та втрати кальцію. У результаті рівняння (1.9) набуває наступної форми:

$$dq = \frac{d[Ca]}{1-e^{-\psi([Ca]_n-[Ca])}} \tag{1.10}$$

З рівняння (1.10) можна отримати формулу для розрахунку витрати кальцію за умови заданого початкового та кінцевого вмісту кальцію в сталі:

$$q = ([Ca]_к - [Ca]_п) + \frac{1}{\psi} ln \frac{1-e^{-\psi([Ca]_n-[Ca]_п)}}{1-e^{-\psi([Ca]_n-[Ca]_к)}}, \tag{1.11}$$

де $[Ca]_п$ і $[Ca]_к$ – початкова та кінцева концентрації кальцію в сталі, % [15].

1.3.3 Математичні моделі для розрахунку характеристик кінетики розчинення лужноземельних металів у сталі

Практичне використання рівнянь (1.8) та (1.11) можливе лише за умови, що відома концентрація кальцію в сталі поблизу поверхні парових бульбашок, які спливають. Варто враховувати, що під час руху бульбашок крізь метал тиск пари кальцію всередині них змінюється, що впливає на рівноважний вміст кальцію в сталі. Згідно із законом Генрі, цей вміст знаходиться в пропорційній залежності від парціального тиску пари кальцію в газовій фазі, яка контактує з металом.

Отже, розрахунки за рівняннями (1.8) і (1.11) повинні враховувати концентрацію кальцію саме на межі розділу фаз у сталі, що відповідає середньому значенню протягом руху бульбашок крізь метал. Припускаючи,

що між парами кальцію в бульбашці та вмістом кальцію в металі поблизу її поверхні встановлюється термодинамічна рівновага, середню концентрацію кальцію у зазначеній ділянці можна визначити наступним чином:

$$[Ca]n = \frac{[Ca]_H - [Ca]_O}{ln\left(\frac{[Ca]_H}{[Ca]_O}\right)}, \quad (1.12)$$

де $[Ca]_H$ та $[Ca]_O$ – концентрації кальцію в сталі на глибині H біля поверхні бульбашки та на виході з об'єму металу, %.

Дослідження, що стосується застосування співвідношень (1.8) і (1.11) для моделювання кінетики розчинення магнію в чавуні, свідчить про більш глибоке розуміння цього процесу. Результати показують, що під час явища метаморфізму металу середня концентрація бульбашок ЛЗМ поблизу поверхні металу може бути узгоджена з рівнянням (1.9). Проте розраховані параметри демонструють значну розбіжність. Цю невідповідність можна пояснити тим, що в розрахунках не завжди враховують вплив поверхнево-активного компонента розплаву на величину градієнта концентрації ЛЗМ у прикордонному шарі поблизу бульбашок.

Відомо, що адсорбційні місця на поверхні рідини, придатні для фіксації атомів домішок, мають обмежену кількість. У процесі сумісної адсорбції декількох домішкових елементів розподіл атомів на цих місцях визначається взаємним впливом усіх частинок, що утворюють адсорбційний шар. У випадку кальцію його розчинення в сталі здійснюється через механізм адсорбції атомів на поверхні рухомих бульбашок із подальшим перенесенням маси в об'єм металу. Згідно з рівнянням Гіббса, рівень адсорбції кальцію на межі розділу фаз корелює з концентрацією цього елемента біля поверхні бульбашки. Для цього зв'язку застосовне наступне співвідношення:

$$\Gamma = -\frac{[Ca]}{RT}\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta[Ca]}\right), \quad (1.13)$$

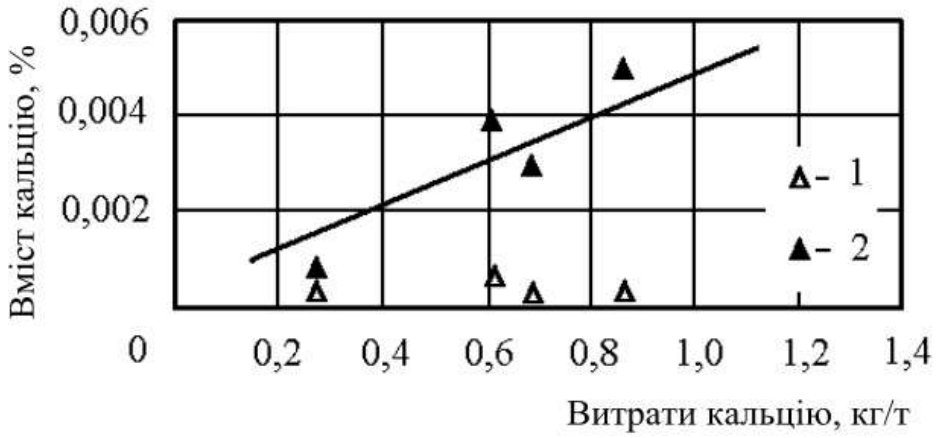
де $\Delta\sigma$ – зміна поверхневого натягу металу під час розчинення кальцію, Дж/м^2.

З рівняння (1.10) видно, що зміна умов адсорбції кальцію на поверхні розділу фаз неодмінно призводить до зміни швидкості розчинення кальцію в сталі. Це пояснюється варіацією кількості кальцію, що адсорбувався на межі фаз. При цьому формується градієнт концентрації кальцію в металі поблизу поверхні бульбашки.

Домішки, які мають високу поверхневу активність у розплавленому чавуні, включають кисень, сірку й окремі елементи кольорових металів. Отже, середня концентрація кальцію поруч із поверхнею бульбашки може істотно змінюватися залежно від хімічного складу сталі, що піддається обробці. У зв'язку з цим доцільно оцінювати значення $[Ca]_n$ у рівняннях (1.8) та (1.11) на підставі експериментальних даних про ступінь засвоєння кальцію під час його розчинення в сталі. Для цього необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\ln(1-\bar{\eta}_1) = -\psi([Ca]_n - [\overline{Ca}]_1); \qquad (1.14)$$
$$\ln(1-\bar{\eta}_2) = -\psi([Ca]_n - [\overline{Ca}]_2),$$

де $[\overline{Ca}]_1$ і $[\overline{Ca}]_2$ – середній вміст кальцію в сталі під час обробки, %.



1 - вихідна концентрація кальцію; 2 - кінцева концентрація

Рисунок 1.2 – Розрахункові та експериментальні дані кінетики розчинення кальцію в сталі 20

На рисунку 1.2 наведено результати моделювання кінетики розчинення кальцію в сталі марки 20, коли кальцій вводиться у вигляді порошку. Отримані дані порівнюються з результатами експериментального дослідження. Аналіз експериментальних даних із застосуванням рівняння (1.11) дозволив отримати значення концентрації $[Ca]_n$, яке становить 0,0215%. Розрахунки виконувалися із використанням кінетичного коефіцієнта ψ, рівного 2,6 [6].

1.4 Висновки

1. Легування металу включає додавання в сталь легуючих елементів з метою отримання матеріалу із специфічними фізико-хімічними властивостями. Зазвичай вміст таких елементів, як вуглець, марганець, кремній, фосфор і сірка, є в сталі у невеликих кількостях і виступає основою для створення сплавів. Процес легування часто поєднують із розкисленням, особливо при використанні марганцю, кремнію або алюмінію як легуючих компонентів.

2. У випадках, коли методи рафінування металу або видалення неметалічних включень не забезпечують належного результату, застосовують операції модифікування сталі та неметалевих включень. Ці процеси передбачають зміну складу та кристалічної структури металу і/або неметалевих включень. Найбільш поширеними модифікуючими добавками є лужноземельні й рідкісноземельні метали, оскільки їхній вплив спрямований на нейтралізацію шкідливого впливу включень, що містять сірку та кисень.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЕЛР

2.1 Передумови розробки технології ВЕЛР

Питання щодо застосування технології вторинного електротермічного легування та рафінування сталі (ВЕЛР) неодноразово порушувалося під час досліджень розподілу сірки між металом і шлаком у процесі електрошлакового переплаву на постійному струмі. У дослідженні [7] було продемонстровано, що коефіцієнт розподілу сірки (S)/[S] суттєво змінювався – більш ніж удвічі – залежно від зміни полярності прикладеної до електродів напруги. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей для багатокомпонентних систем «метал-шлак-газ» ускладнювала ефективне управління цим процесом. Внаслідок цього наукові дослідження в основному обмежувалися емпіричними підходами, які дозволяли створювати лише окремі технологічні рішення, пристосовані до конкретного металургійного агрегату, певної технології виплавки, заданої марки сталі та складу шлаку.

У роботі О. Г. Пономаренка [8] вперше була запропонована електрохімічна поправка, також названа «електронним внеском», яка впливає на логарифм активності шлаку через додавання $\mu\nu_i$, де ν_i – валентність елемента *i* в шлаку. У цій статті, а також у багатьох наступних дослідженнях, розглядається фізичний сенс величини μ. Зокрема, її запропоновано визначати як «рівень Фермі електронів у шлаку» [8] або «окисно-відновний потенціал системи метал-шлак» [9]. В інших роботах зазначалося, що величина μ фактично є невизначеним множником Лагранжа [10], який виникає при розв’язанні задачі мінімізації енергії Гіббса системи «метал-шлак» за умовою електронейтральності фази шлаку. Також було показано [11], що забезпечення електронейтральності шлаку є необхідною умовою для виконання рівняння Гіббса-Дюгема, якщо в моделі враховується «електронний внесок» до активності будь-якої фази. У підсумку електрохімічна поправка $\mu\nu_i$ суттєво підвищує прогнозну точність фізико-

хімічних моделей системи «метал-шлак», наближаючи їх до рівня інтелектуального ядра сучасних промислових автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Система управління сталеплавильним виробництвом, розроблена на основі зазначених принципів, успішно впроваджена на багатьох металургійних підприємствах, зокрема на Молдавському металургійному заводі [10], Білоруському металургійному заводі [13], Запоріжсталі [14] та інших. Однак фізико-хімічні моделі, що використовуються, мають обмеження – вони не враховують компонент теплових розрахунків. Це ускладнює точне моделювання та прогнозування процесів виробництва сталі. Для вирішення цієї проблеми була представлена модель системи «метал-шлак-газ» [15] і нова термодинамічна модель конденсованого розчину [11], що дозволило завершити теоретичну розробку системи «метал-шлак-газ».

Структура фізико-хімічної моделі не лише дає змогу створювати повністю автоматизовані системи керування на основі існуючих металургійних процесів, але й відкриває перспективи для розробки теоретичних основ і технологій для інноваційних процесів, таких як вторинне електротермічне легування та рафінування (ВЕЛР) під час обробки металу в ковші-печі.

2.2 Крива електронейтральності

Ключовим елементом теорії ВЕЛР є концепція кривої електричної нейтральності (КЕ), типова форма якої показана на рисунку 2.1.

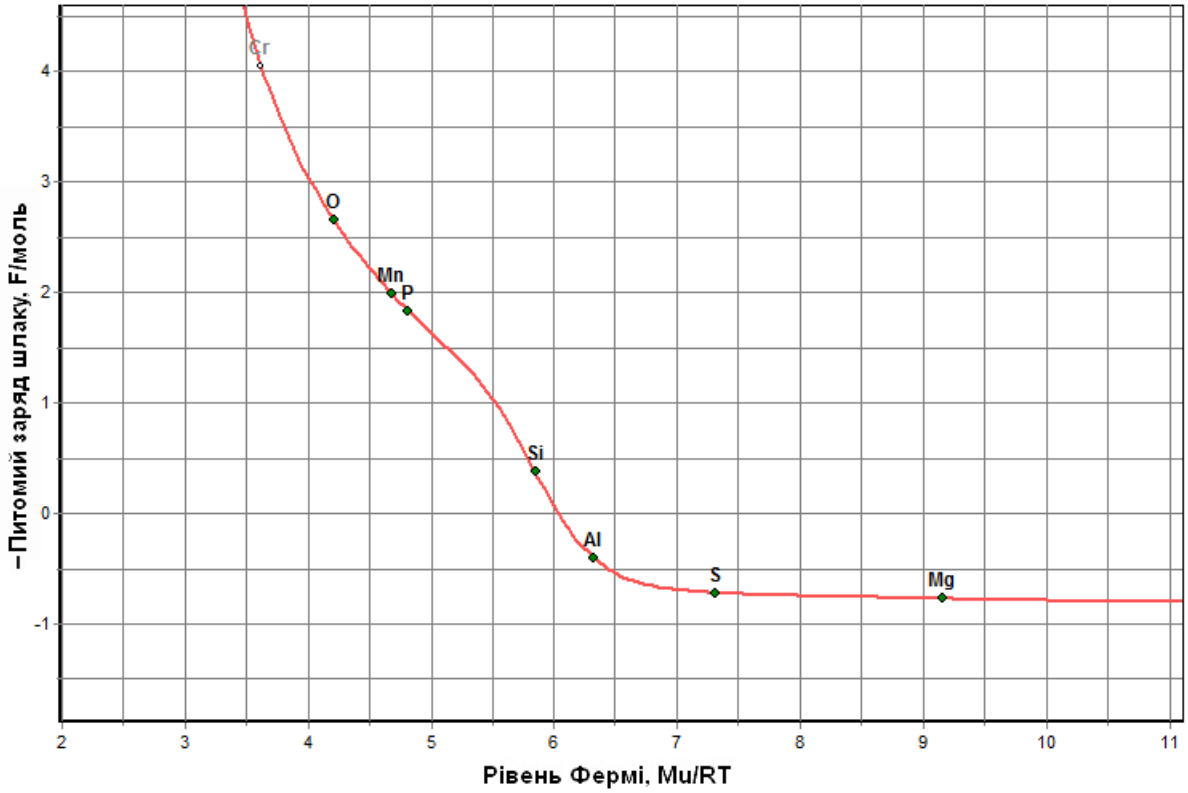


Рисунок 2.1 – Фрагмент кривої електронейтральності

Крива електронейтральності (КЕ) в координатах «*Заряд шлаку*» – «*Рівень Фермі електронів у шлаку, в одиницях RT*» визначається як функція $F_1(\mu_e)$ із системи рівнянь (2.1) рівноважного стану у термодинамічній системі «метал-шлак-газ». Вона відображає поточний стан рівноваги кожного елемента системи. Крива перетинає вісь абсцис у точці, що відповідає рівноважному значенню μ_e та електрично нейтральному шлаку [16].

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)[1+\exp(B_i - Z)]} = 0; \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)[1+\exp(B_i - Z)]} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)[1+\exp(-Z)]} = 0; \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu\nu_i)[1+\exp(B_i - Z)]} - \dfrac{N}{1+\exp(Z)[1+\exp(-Y)]} = 0; \end{cases} \quad (2.1)$$

де $A_i = \ln(K_{[i)}\gamma_i/\psi_i)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак»; $B_i = \ln(K_{[i}\gamma_i/\lambda_i)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак-газ»; n_i – кількість молей і-го елемента в системі; $Y = \ln(N_m / N_s)$

– логарифм зворотного значення молярної кратності шлаку; $Z = \ln(N_m / N_g)$ – логарифм зворотного значення молярної кратності газу.

Розв'язання нелінійної системи рівнянь (2.1) дає набір значень μ, Y, Z, що визначають рівноважний вміст (кількість молей) елементів у шлаку, газі та металі.

У місцях перегину кривої розташовуються точки, які відповідають окремим хімічним елементам. У позначеннях системі рівнянь (2.1) координати цих точок визначаються наступним чином:

$$\text{Координата X: } X_E = \frac{A_i - Y - \ln[1+\exp(B_i - Z)]}{v_i} \tag{2.2}$$

$$\text{Координата Y: } Y_E = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i v_i}{1+\exp(-A_i + Y + X_E v_i)[1+\exp(B_i - Z)]} \tag{2.3}$$

Розташування точок для кожного елемента відносно осі абсцис відображає здатність шлаку поглинати чи виділяти елементи за заданих умов. Якщо точка, що відповідає елементу з позитивною валентністю, розташована нижче нульової осі, то цей елемент має тенденцію переходити до шлаку. У разі, якщо точка знаходиться вище цієї осі, елемент прагне перейти до металу або газоподібного стану. Для елементів із негативною валентністю процес є зворотним: вони переходять до металу, коли точка розташована нижче осі абсцис.

Взаємне розташування цих точок на КЕ дає змогу визначити порядок окислення та відновлення елементів зі зміною окисно-відновного потенціалу параметра μ системи. Як видно на рис. 2.1, фосфор, марганець, кремній і сірка мають тенденцію переходити до металевої фази, тоді як магній і алюміній залишаються у складі шлаку. В процесі збільшення ступеня розкислення спочатку відновлюється кремній, пізніше сірка починає активно поглинатися шлаком, і на завершення відновлюються магній та алюміній. При поступовому збільшенні ступеня окислення першими вступають у реакцію і окислюються фосфор і марганець.

Таким чином, КЕ виступає дієвим інструментом для оцінки здатності елемента до окислення або відновлення за заданих умов рівноваги. Розуміння якісних і кількісних характеристик КЕ та можливість їхнього регулювання шляхом впливу на шлак зовнішнім електричним полем можуть стати базою для впровадження принципово нових процесів ВЕЛР у виробничу практику позаагрегатної обробки сталі.

2.3 Схема експериментальної установки ВЕЛР

На рисунку 2.2 наведено схему експериментальної установки ВЕЛР.

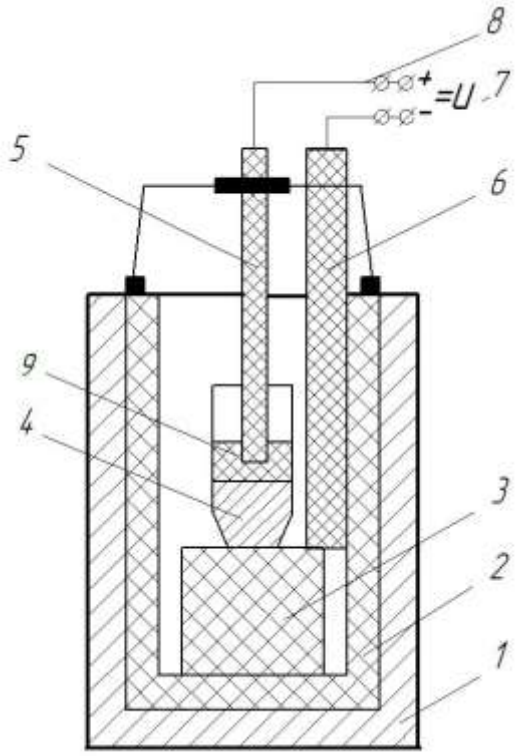


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної установки ВЕЛР:
1 – піч Тамана; 2 – шахта печі (графіт); 3 – підставка (графіт); 4 – тигель з розплавом (графіт); 5 – електрод-анод (графіт); 6 – електрод-катод (графіт); 7 – джерело постійного струму; 8 – сталевий дріт; 9 – шлаковий розплав.

Піч витримували 20 хвилин до повного розплавлення шихти і приведення системи до рівноваги. Після цього підключали джерело постійного струму (7): плюс до графітового електроду (5), зануреного в шлаковий розплав, а мінус – на струмопровідний графітовий тигель (4) через

графітовий електрод (6) і підставку (3). Джерело постійного струму підключали до електрода-анода (5) за допомогою сталевого дроту (8).

2.4 Принципова схема промислової установки ВЕЛР

Найпростіша версія промислової установки ВЕЛР представлена на рисунку 2.3.

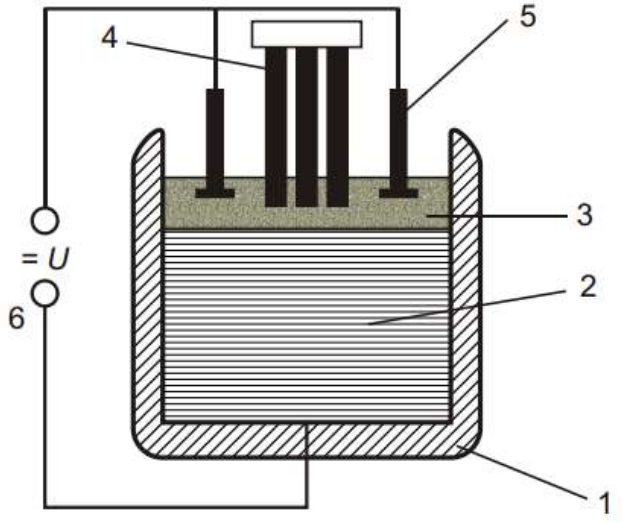


Рисунок 2.3 – Принципова схема промислової установки ВЕЛР:
1 – корпус печі-ковша; 2 – розплав металу; 3 – рідкий шлак; 4 – нагрівальний електрод; 5 – електрод ВЕЛР; 6 – джерело постійної напруги

Графітовий електрод, позначений як елемент 5, має спеціальну конструкцію та підключається до постійної напруги через джерело живлення 6. Залежно від полярності напруги, прикладеної до електрода, елементи на кривій електронейтральності переміщуються вгору або вниз. Метал у ковші-печі постійно перемішується шляхом продування інертним газом, що сприяє рівномірному впливу процесу.

Якщо шлак заряджений позитивно (електрод 5 є анодом), то рівновага в системі буде рухатися в бік збільшення μ і руху осі абсцис на рисунку 2.1 вниз. Це призводить до посилення розкислення системи, що стимулює відновлення зі шлаку елементів із позитивною валентністю. У такий спосіб відбувається десульфурація металу: сірка, що має негативну валентність, видаляється з металу та спрямовується у шлак. Якщо ж електрод 5 працює як

катод, створюються умови для дефосфорації та зневуглецювання металургійного розплаву.

Координати елементів на контактній поверхні електрода дозволяють визначити необхідну величину напруги для здійснення процесів відновлення або окиснення, враховуючи геометрію шару шлаку та його провідність. Оскільки шлак має визначений опір, для реалізації процесу ВЕЛР потрібні певні витрати енергії. Частина цих витрат компенсується завдяки тепловому ефекту роботи нагрівального електрода 4.

Згідно з попередніми розрахунками, обсяг електроенергії, потрібної для відновлення одного моля кремнію зі шлаку методом ВЕЛР, значно менший у порівнянні з витратами, необхідними для виготовлення такого самого обсягу кремнію у формі феросиліцію. Це включає транспортування феросплаву на завод, введення його в розплав, плавлення і нагрівання до потрібної температури, навіть з урахуванням екзотермічних реакцій під час цих операцій. Аналогічні результати були отримані під час відновлення марганцю та алюмінію [17].

2.4 Висновки

Технологія вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР) забезпечує такі переваги:

- Значне зменшення витрат на використання дорогих феросплавів, модифікаторів і синтетичних шлаків;
- Можливість застосування стандартних шлаків із конвертерних, доменних та мартенівських процесів;
- Виконання дефосфорації та десульфурації без залучення реагентів, які збільшують кількість неметалевих включень у металі;
- Ефективне введення у розплав високоактивних сплавів із максимальною ефективністю освоєння;
- Зниження рівня газових викидів та утворення пилу порівняно із традиційними методами легування та розкислення сталі.

3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВЕЛР

3.1 Програмне забезпечення «Excalibur»

Програма «Forward» стала однією з перших комп'ютерних розробок, спрямованих на оптимізацію процесу легування сталі [18]. Подальшим етапом у розвитку програмного забезпечення для металургійних розрахунків була система «Оракул» [19], яка додатково враховувала неметалеву частину шихти під час розрахунку балансу. Проте обидві системи мали суттєві недоліки: вони не могли враховувати теплові ефекти та диференціальні коефіцієнти засвоєння.

Програмний комплекс «Excalibur» вперше запропонувала повноцінну інтеграцію роботи над прямими та зворотними задачами. Алгоритм прямої задачі базується на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [20] з подальшими модифікаціями [21,22], ентальпійному тепловому балансі [23], а також бере до уваги кінетичні запізнення [24]. У свою чергу, алгоритм зворотної задачі реалізує універсальний метод фазових операторів [25], одним із варіантів якого є диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) у металах [26].

За своїми функціональними можливостями «Excalibur» суттєво перевершує попередні розробки для термодинамічного моделювання системи «метал-шлак-газ». Основні переваги цієї програми такі:

- Термодинамічні розрахунки для багатокомпонентної гетерогенної системи «метал-шлак-газ» з врахуванням теплоти хімічних реакцій;

- Виконання комплексного термодинамічного аналізу для визначення кінцевої температури системи, використовуючи метод теплового балансу на основі ентальпії;

- Оцінка парціального тиску всіх атомних і молекулярних компонентів у газовій фазі;

- Аналіз та презентація всіх інтегральних і парціальних термодинамічних функцій компонентів системи, включаючи окремі фази та хімічні елементи, відповідно до єдиного критерію;

- Детальний розрахунок теплових ефектів, спричинених легуючими матеріалами та енергоносіями, а також тепловитрат, температури й агрегатного стану матеріалів;

- Моделювання та візуалізація динаміки фазових взаємодій у сталеплавильних агрегатах на основі принципів нерівноважної термодинаміки і розв'язання систем диференціальних рівнянь;

- Комплексний аналіз процесу плавлення у дугових сталеплавильних печах (ДСП). Це включає вивчення кінетики плавлення металобрухту, характеристик масового та хімічного складу металу, шлаку й газів, температурні зміни з врахуванням кінетичних затримок, формування шлаків, тепловтрат та конструктивних параметрів печі.

Для повного й точного розв’язання зворотної задачі термодинамічного моделювання програмний комплекс «Excalibur» надає такі можливості::

- Оптимізація масової та енергоємності різноманітних сплавів і шихт (у будь-якому агрегатному стані) за принципами мінімізації сумарної собівартості або максимізації продуктивності сталеплавильного цеху;

- Впровадження односторонніх і двосторонніх оптимізаційних обмежень, що стосуються хімічного складу й якості кінцевого металу, властивостей шлаку й газів, характеристик сировини, витрат енергоносіїв, а також досягнення необхідних температурних режимів і їхнього забезпечення;

- Використання методів фазової операторно-матричної алгебри і швидких алгоритмів дуального симплексного методу для ефективного виконання розрахунків з оптимізації матеріалів;

- Врахування взаємного впливу вмісту окремих елементів на засвоєння інших на кожній стадії технологічного процесу;

- Застосування матриць консолідації, які дозволяють оцінювати вплив матеріальних добавок і енергоносіїв на масу, фазовий склад і температуру системи;

- Аналіз і врахування невизначеності вихідних і отриманих даних через визначення довірчих інтервалів у межах заданого діапазону значень («нижня-верхня межа»);

- Реалізація принципів ситуаційного управління виробничими процесами шляхом оперативної розробки рішень щодо легування, розкислення та обробки сталі в умовах відсутності заздалегідь підготовлених формальних рішень для задач зворотного характеру.

На рисунку 3.1 представлена концептуальна блок-схема програмного комплексу «Excalibur».

При запуску програма виконує зчитування файлів, що містять дані про проєкт, константи, параметри Вагнера, гази, матеріали та завдання. Після цього автоматично здійснюється обробка набору матеріалів із останнього відкритого завдання. Виконання прямої або зворотної задачі можливе за допомогою натискання відповідних кнопок на панелі інструментів чи вибору пунктів у меню.

Результати розрахунків для прямої задачі включають визначення мас і складів металу, шлаку та газової фази, парціальних тисків усіх компонентів газу, а також кінцевої температури системи. Хімічний склад фаз може бути представлений у вигляді масових відсотків, мольних відсотків, кілограмів або кіломолів. Додатково обчислюються: об’єм утвореного газу, основність шлаку, окислювально-відновний потенціал системи (включаючи рівень Фермі електронів у шлаку), хімічні потенціали, парціальні ентальпії змішування всіх елементів у кожній фазі, теплові ефекти хімічних реакцій тощо.

Усі розраховані параметри мають довірчий інтервал у вигляді «нижньої межі» та «верхньої межі». У зворотній задачі додатково визначаються

оптимальні маси матеріалів з урахуванням зазначених у завданні обмежень для забезпечення гарантованого досягнення умов плавки.

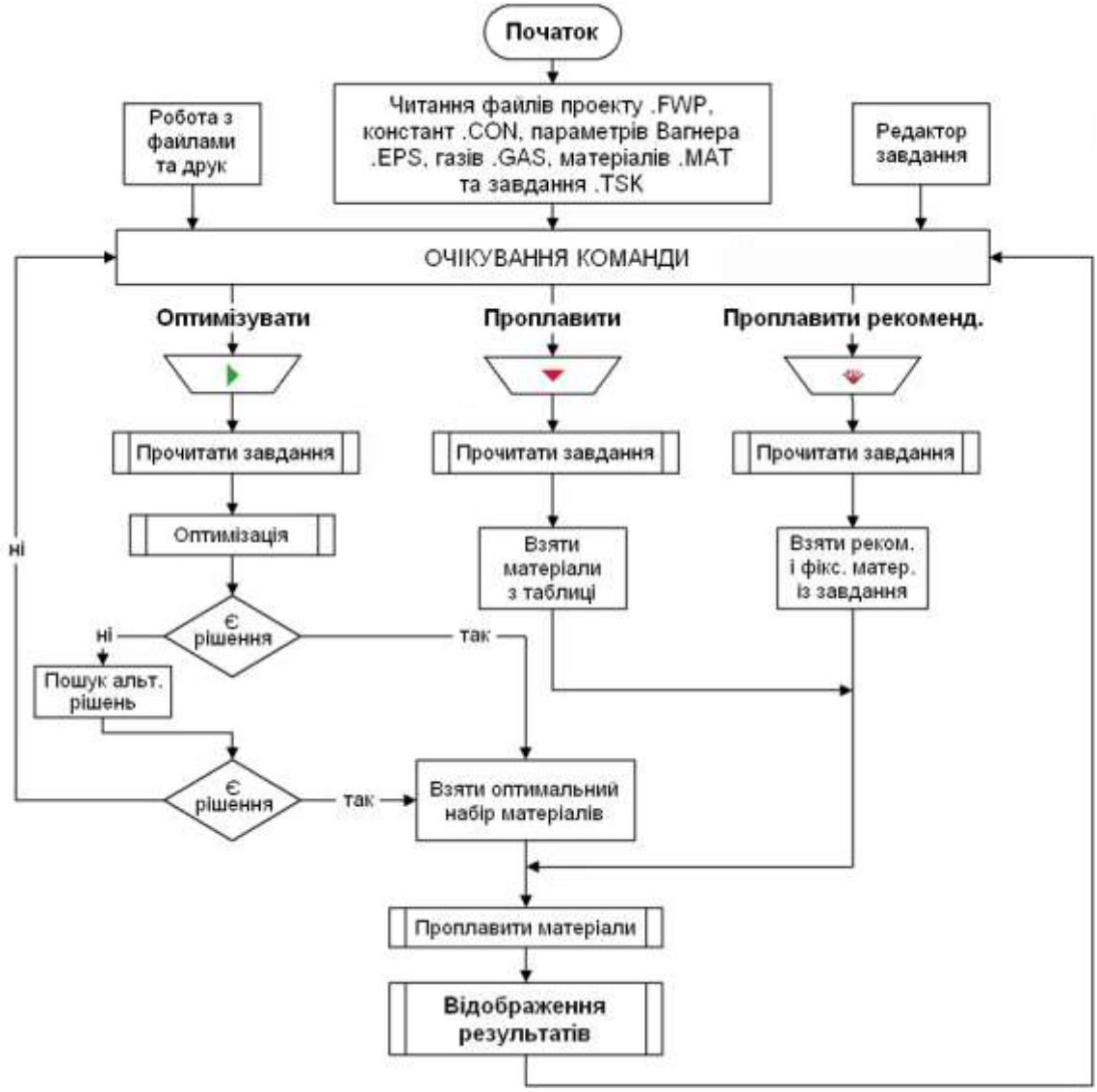


Рисунок 3.1 – Концептуальна блок-схема основних режимів роботи програмного комплексу «Excalibur»

Обчислення прямої та зворотної задач виконуються з високою швидкістю й зазвичай займають від 0,01 до 1 секунди. Розв’язання більш складних завдань, як-от моделювання кінетики плавки в електродугових сталеплавильних печах або пошук альтернативних рішень для зворотної задачі, триває від 0,01 до 2 хвилин. Основні результати розрахунків автоматично виводяться на головну форму інтерфейсу програмного комплексу «Excalibur», типовий вигляд якої представлено на рисунку 3.2.

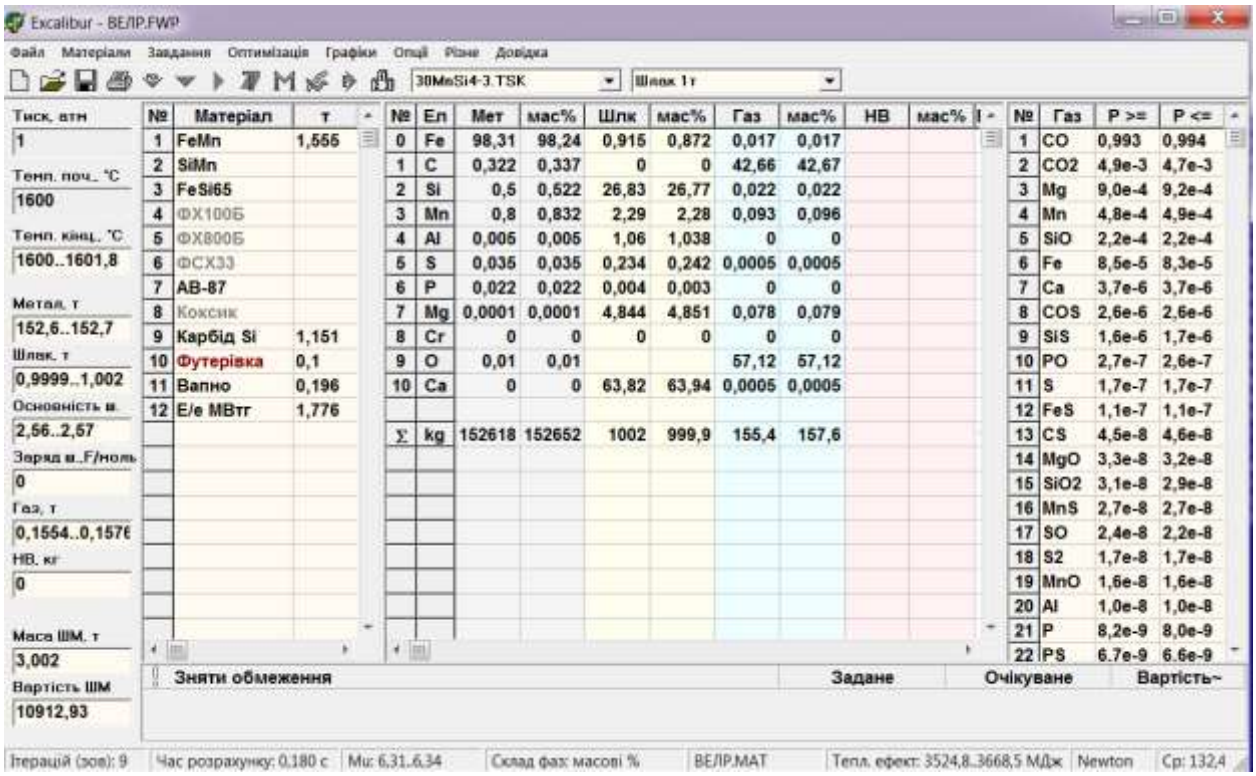


Рисунок 3.2 – Робоче вікно головної форми програмного комплексу «Excalibur»

За допомогою інтерактивного редактора таблиць і полів користувач має можливість задавати будь-які вихідні дані та оптимізаційні обмеження. Це стосується параметрів металів, шлаків і газів, а також характеристик доступних та недоступних матеріалів і енергоносіїв. Зокрема, можна регулювати хімічний склад і діапазон маси вихідного металу й шлаку, початкову та навколишню температуру, бажаний склад та кількість металу, шлаку і газу, фінальну температуру металу, а також вказувати значення тепловтрат у мегаджоулях.

Крім того, користувач може встановлювати рекомендовану та обов’язкову вагу для кожного матеріалу, а також задавати верхні та нижні межі його використання – як у тоннах, так і у відсотковому співвідношенні від загальної ваги всіх матеріалів.

Редактор завдань дозволяє вводити до ста задач для кожного плавлення, які можуть бути збережені у файлах. У редакторі доступна

функція використання контекстного меню для роботи з файлами задач та окремими завданнями. Основне вікно програми дозволяє швидко перемикатися між файлами задач і конкретними завданнями за допомогою двох випадаючих списків у верхній частині екрана.

Програмний комплекс «Excalibur» пропонує можливість виконання термодинамічного моделювання системи "метал-шлак-газ" із врахуванням ентальпійного теплового балансу. Його можна застосовувати як навчальний інструмент для студентів металургійних факультетів та як практичний засіб для металургів-дослідників. Завдяки «Excalibur» фахівці можуть розробляти новітні технології, моделюючи різні процеси, включаючи виплавку сталі, розкислення, легування, десульфурацію та дефосфорацію.

3.2 Об'єкти дослідження

В якості об’єктів дослідження обрано 4 марки сталі 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 і 35CrSiMn5-5-4, позначені за стандартом ДСТУ EN 10027-1:2019 Сталь. Системи позначення. Частина 1. Назви сталі.

Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в наступних таблицях.

3.2.1 Сталь 12MnSi4-3 - конструкційна сталь для зварних конструкцій

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 12MnSi4-3 за ГОСТ 19281 - 2014 [28]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
0,09-0,15	0,5-0,8	0,8-1,2	≤0,3	≤0,035	≤0,03	≤0,3	≤0,008	≤0,3

Застосування: шестерні, ролики, хомути, вінця, важелі, фланці, шківи, сектори, колони, ходові колеса та інші деталі.

3.2.2 Сталь 30MnSi4-3 - низьколегована сталь для виливків

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 30MnSi4-3 за ГОСТ 977-88 [29]

C	Si	Mn	Ni	S	P
0,25-0,35	0,6-0,8	1.1-1.4	≤0,3	≤0,04	≤0,04

Застосування: Зварювання різних деталей і елементів металоконструкцій під тиском при робочих температурах від -70 до + 425 °С.

3.2.3 Сталь 9MnSi6-3 - конструкційна сталь для зварних конструкцій

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сталі 9MnSi6-3 за ГОСТ 19281 - 2014 [28]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu
≤0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	≤0,3	≤0,035	≤0,03	≤0,3	≤0,008	≤0,3

Застосування: Зварювання різних деталей і елементів металоконструкцій під тиском при робочих температурах від -70 до +425 °С.

3.2.4 Сталь 35CrSiMn5-5-4 - низьколегована конструкційна сталь

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі 35CrSiMn5-5-4 за ГОСТ 4543-71 [90]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,35-0,39	1.1-1.4	0,8-1,1	≤0,3	≤0,025	≤0,025	1.1-1.4	≤0,3

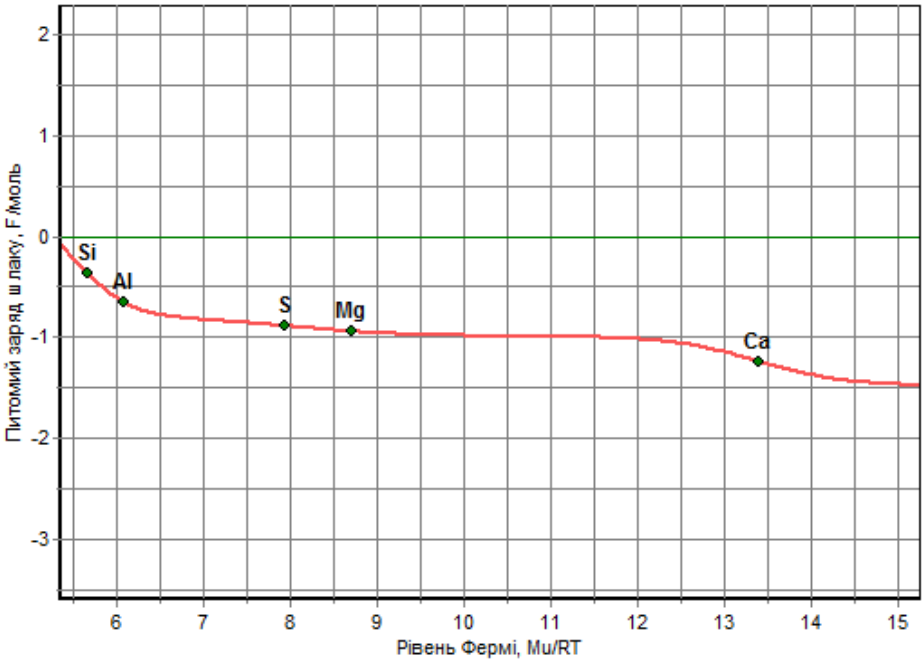
Область застосування: модернізовані компоненти для фланців, кулачків, пальців, роликів, важелів, валів, зварних елементів конструкцій та інших складних деталей, які функціонують за умов змінних навантажень.

3.3 Побудова кривої електричної нейтральності

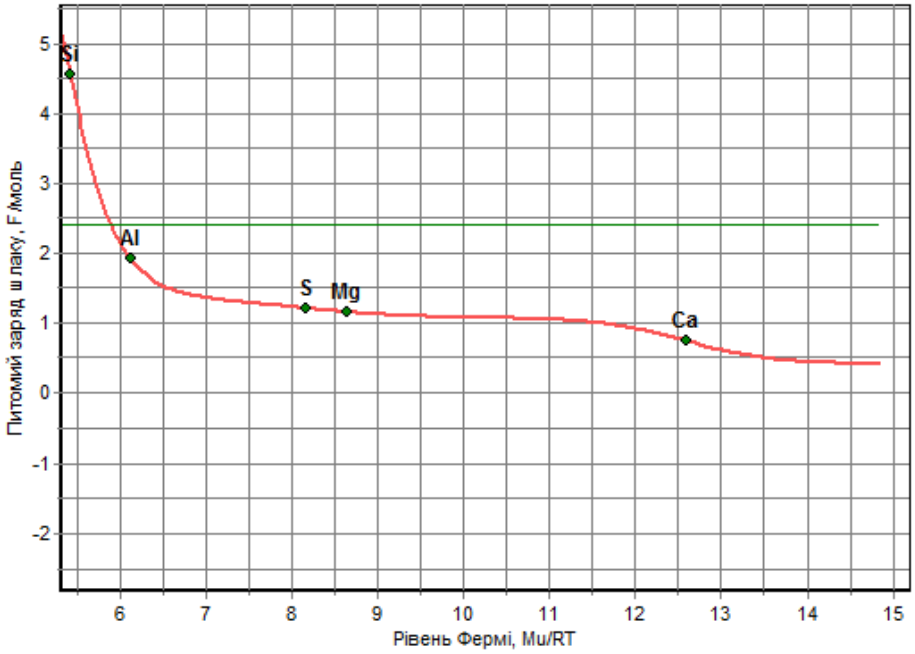
Поведінку кривої електронейтральності (КЕ) можна змоделювати за допомогою програмного забезпечення «Excalibur». КЕ відображає здатність певного елемента до відновлення та визначає питомий заряд шлаку.

Елементи, які знаходяться в нижній (негативній) частині КЕ та мають негативну валентність, переходять у шлак. Навпаки, елементи з позитивною валентністю, розташовані у верхній частині КЕ, переходять у метал.

Як приклад, проаналізуємо криві електронейтральності для напівпродукту і сталі марки 12MnSi4-3, які



а)



б)

Рисунок 3.3 – Крива електричної нейтральності:

а) напівпродукт; б) сталь 12MnSi4-3 (заряд шлаку -2..5 F/моль)

Як показано на рисунку 3.3, відновні властивості лужноземельних металів підвищуються зі збільшенням питомого заряду шлаку. Однак значення заряду не має перевищувати 5 F/моль, оскільки при вищих значеннях шлак втрачає стабільність.

3.4 Результати дослідження

3.4.1 Вміст кальцію і магнію в металі і шлаку

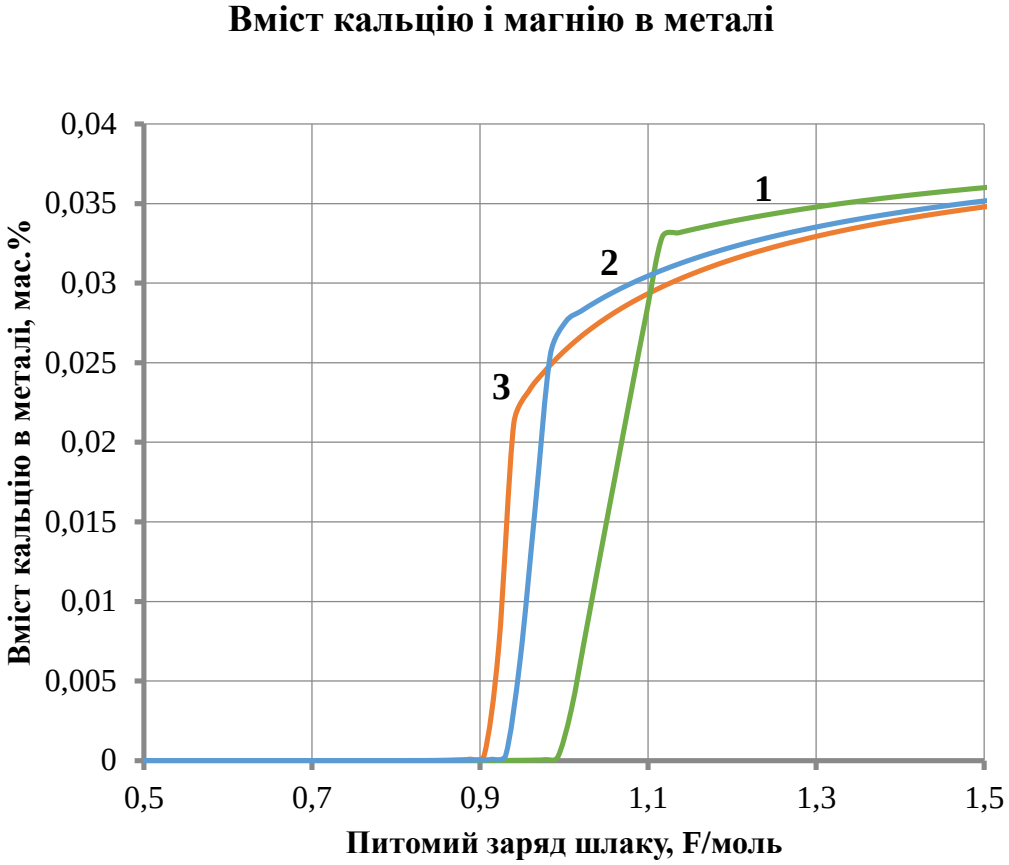
На рисунках 3.4–3.19 представлено залежність вмісту кальцію та магнію в металі та шлаку від питомого позитивного заряду й маси шлаку. Діаграми демонструють результати для досліджуваних марок сталі: 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 і 35CrSiMn5-5-4. Експерименти виконувалися як при нормальному, так і при підвищеному зовнішньому тиску (200 кПа) з різною масою шлаку – 1, 2 та 3 тонни (значення вказані на кривах).

На поданих графіках чітко видно, що вміст лужноземельних елементів у металі зростає зі збільшенням питомого заряду до 1–1,5 F/моль та тиску до 200 кПа, тоді як маса шлаку відповідно зменшується.

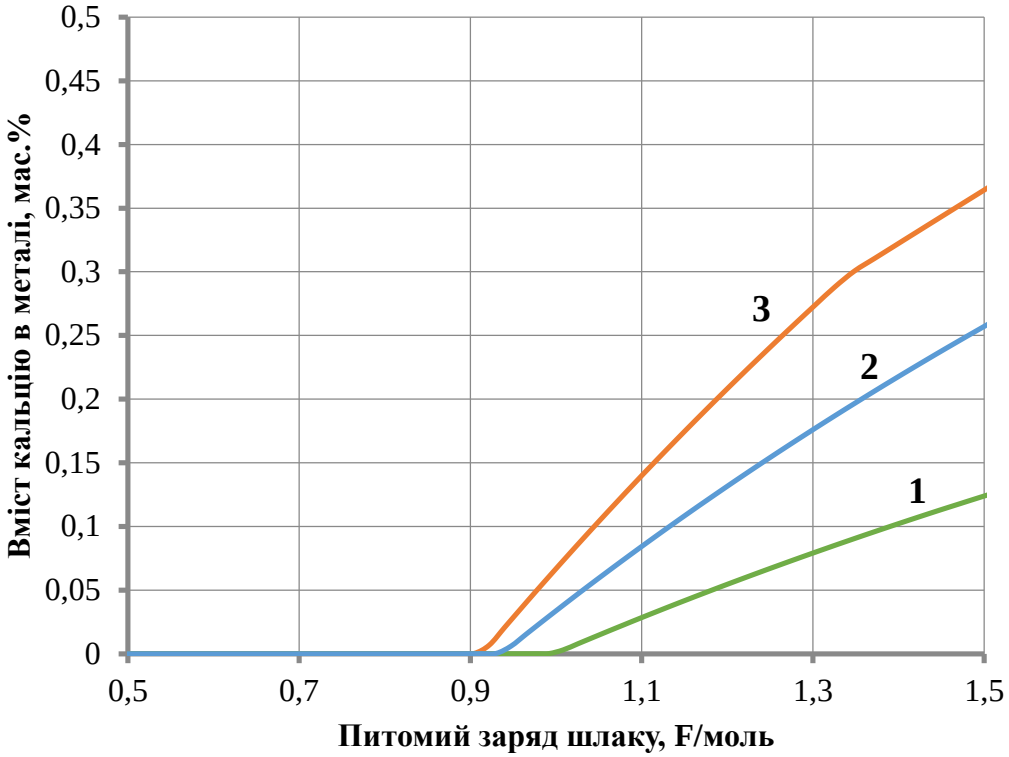
Кальцій (у металі). За нормального атмосферного тиску (1 атм), при питомому заряді шлаку, що дорівнює 0,9 F/моль, кальцій починає переходити зі шлаку в газову фазу та частково в метал. У таких умовах максимальний вміст кальцію в металі досягає 0,036%. Підвищений зовнішній тиск (2 атм) сприяє тому, що перехід кальцію в метал також стартує при 0,9 F/моль і послідовно збільшується зі зростанням питомого заряду шлаку. При таких умовах концентрація кальцію в металі може перевищити 0,35%.

Магній (у металі). За нормального тиску (1 атм), коли питомий заряд шлаку сягає приблизно 0,8 F/моль, магній починає відновлюватися та переходити в метал до рівня не більше 0,02%. У випадку підвищеного тиску (2 атм) концентрація магнію у сталі зростає й може досягати понад 0,04%.

Кальцій і магній (у шлаку). З підвищенням питомого заряду шлаку спочатку відбувається збільшення маси кальцію і магнію у шлаку. Але після досягнення певного значення вона різко зменшується. Це явище пояснюється тим, що концентрація цих елементів у шлаку зростає на початковій стадії, коли кремній та інші елементи переходять у металеву фазу. Варто зазначити, що ці залежності для нормального і підвищеного тисків залишаються практично однаковими.

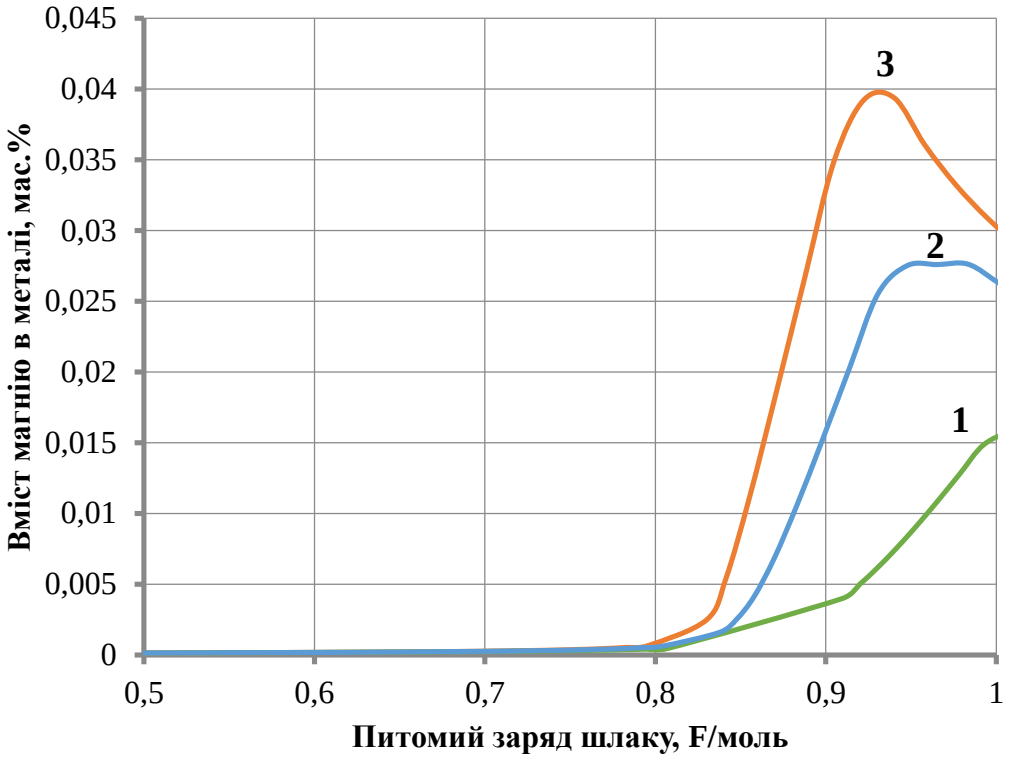


а) 1 атмосфера

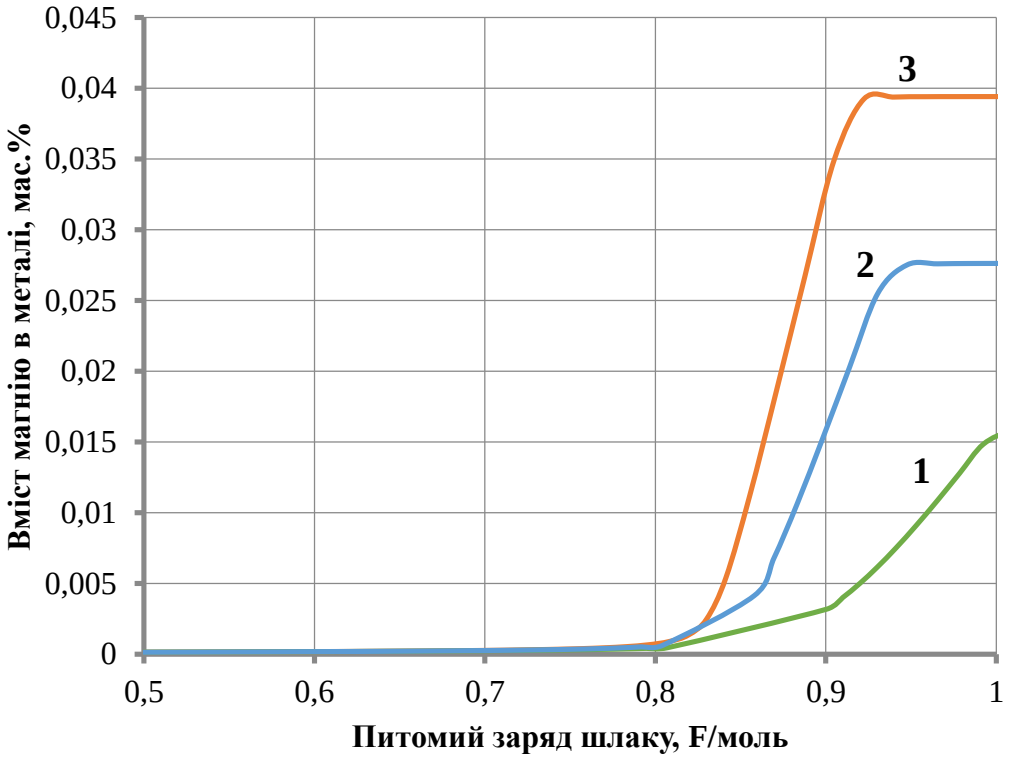


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.4 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в сталі 12MnSi4-3

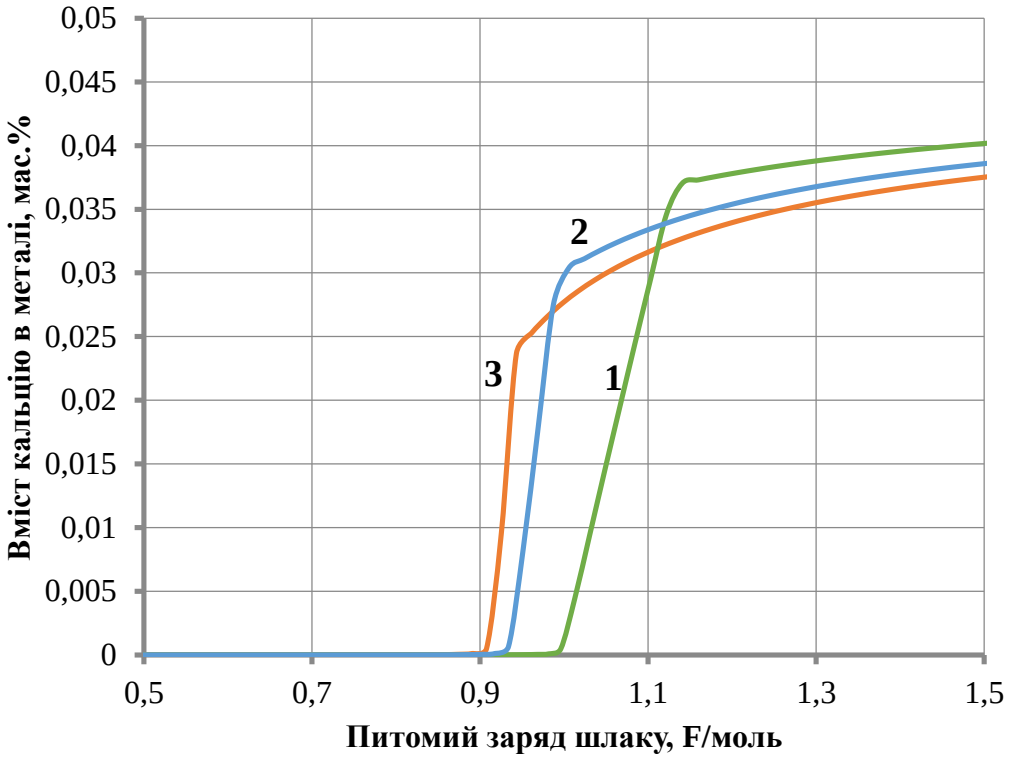


а) 1 атмосфера

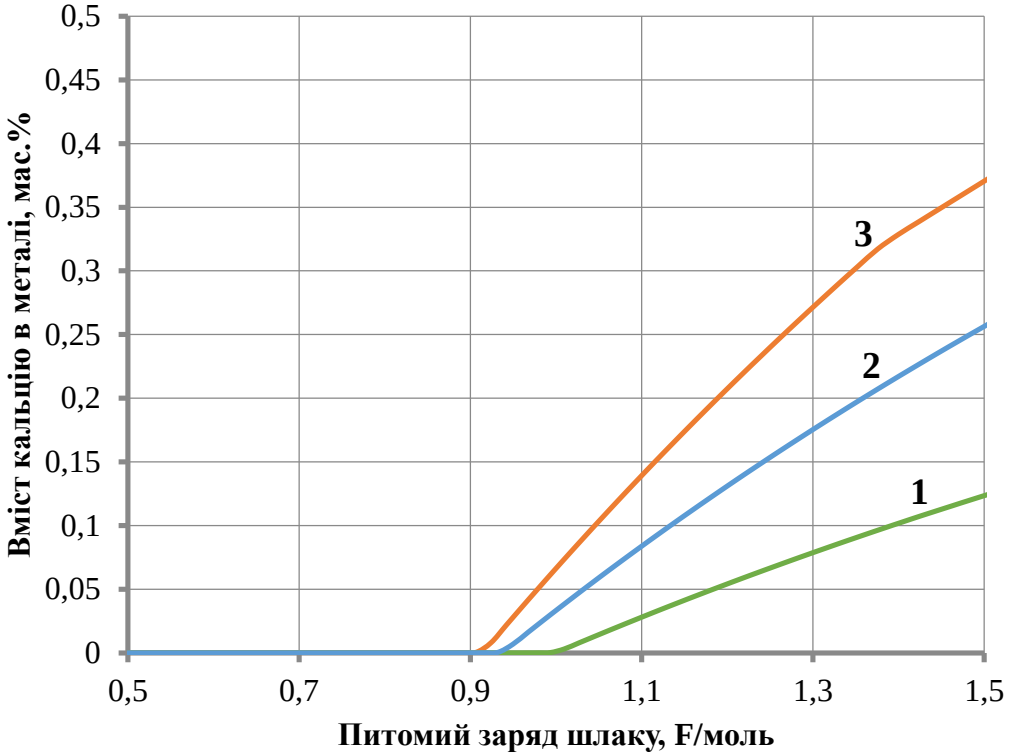


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.5 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в сталі 12MnSi4-3

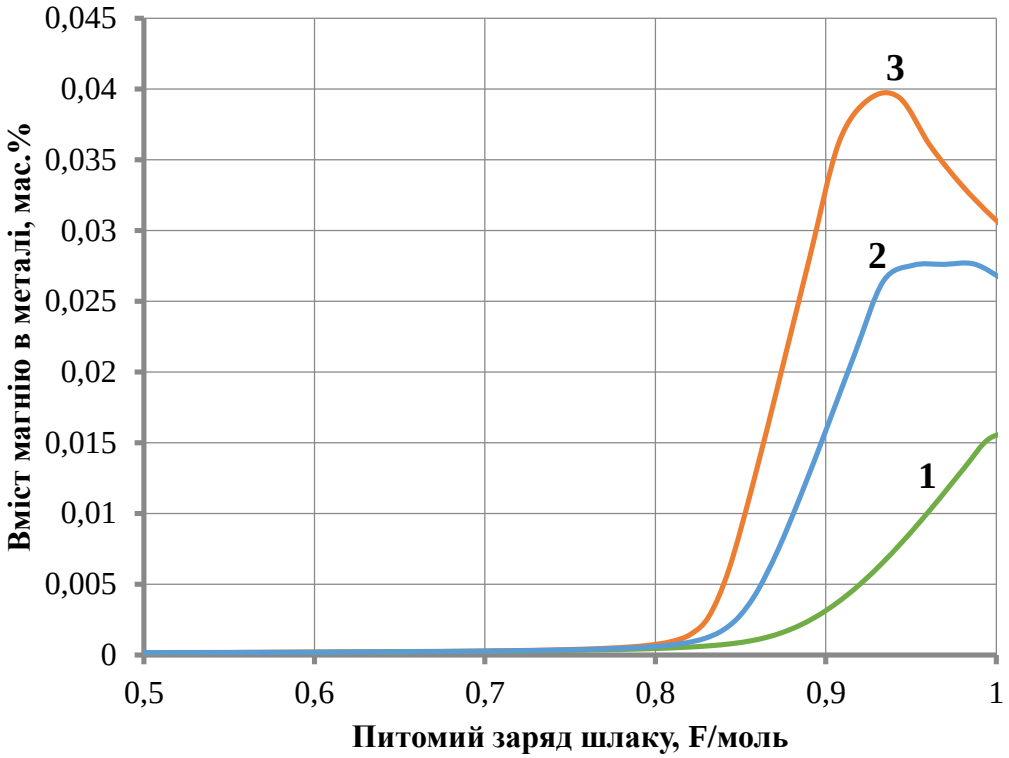


а) 1 атмосфера

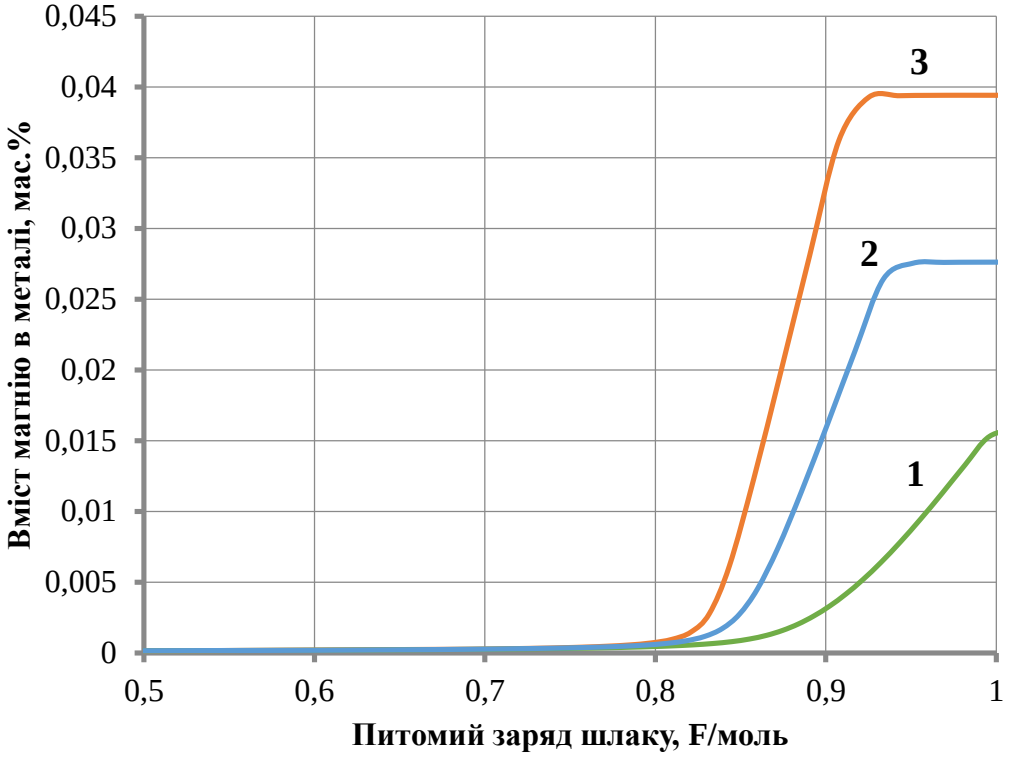


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.6 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в сталі 30MnSi4-3

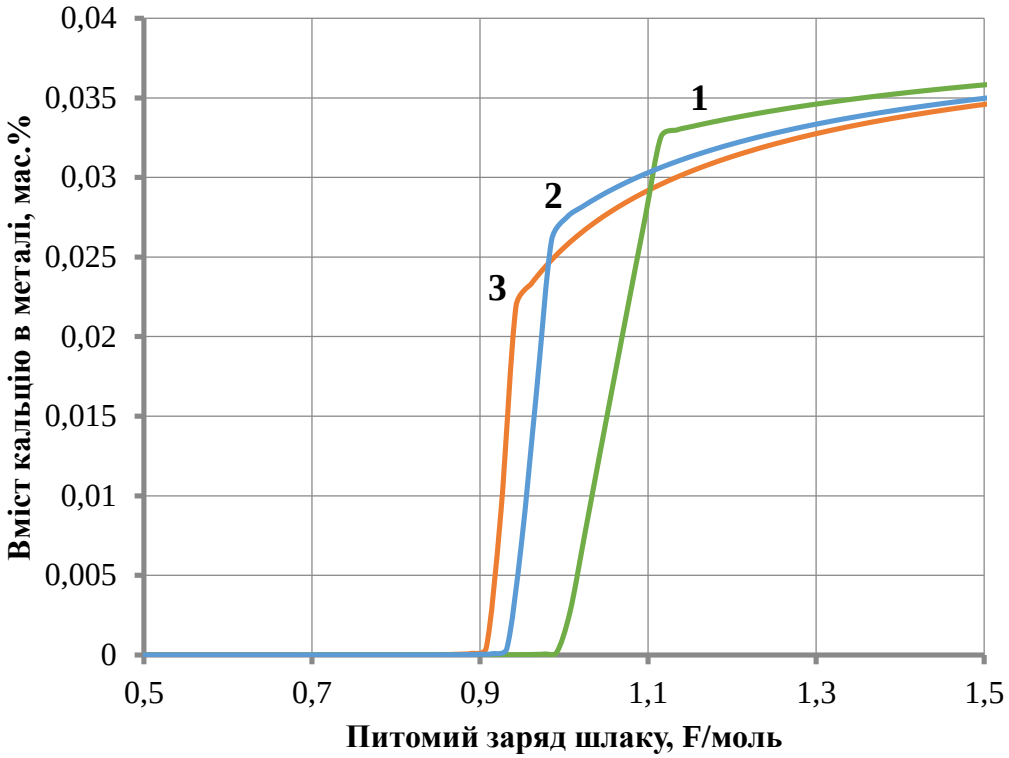


а) 1 атмосфера

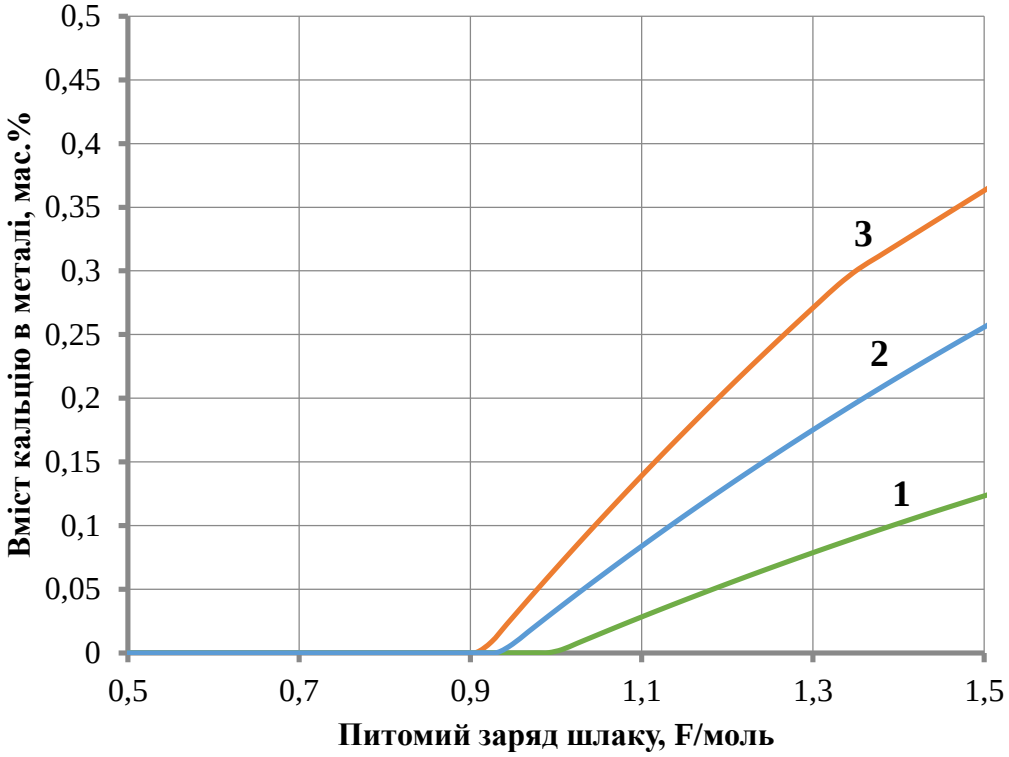


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.7 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в сталі 30MnSi4-3

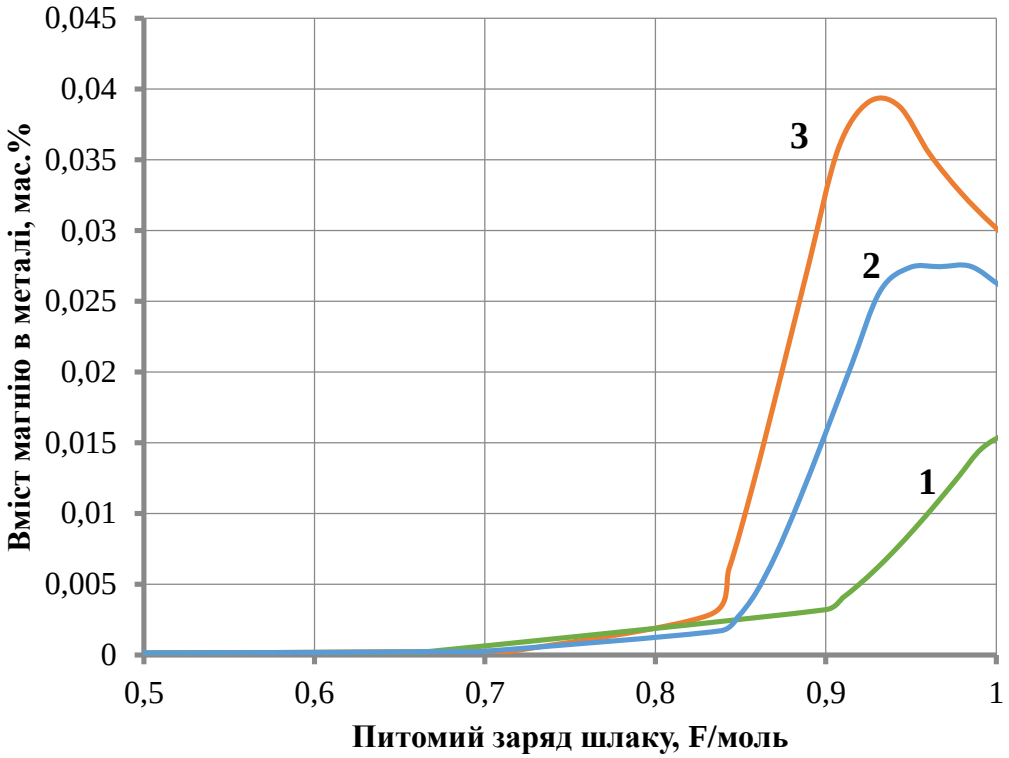


а) 1 атмосфера

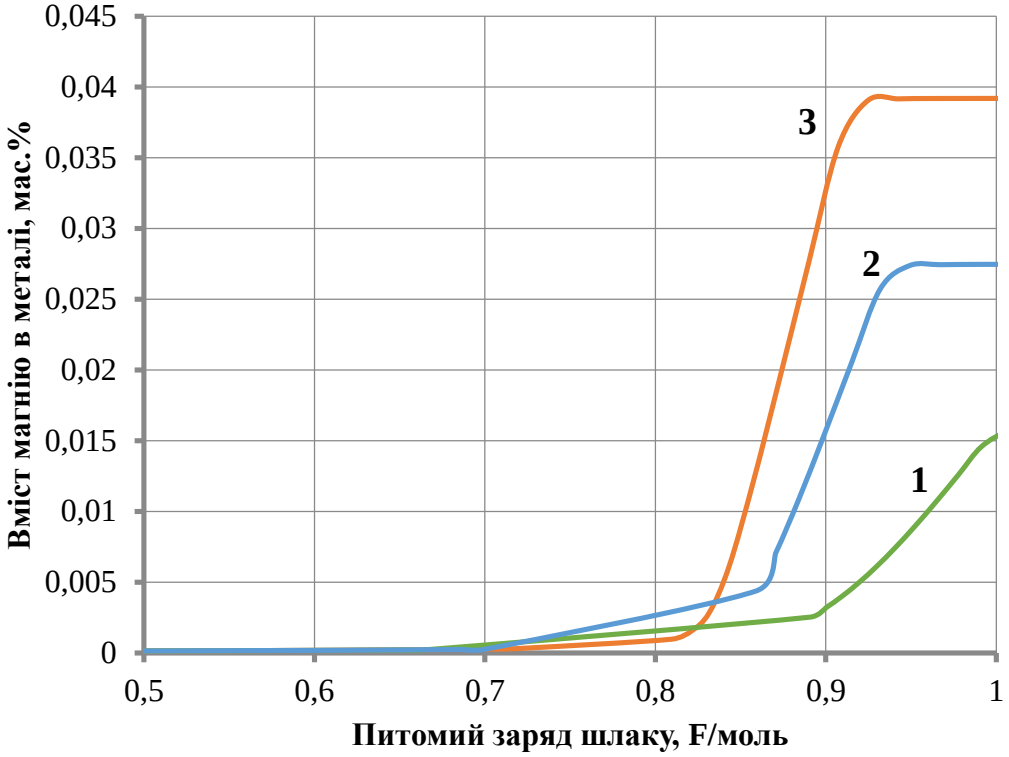


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.8 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в сталі 9MnSi6-3

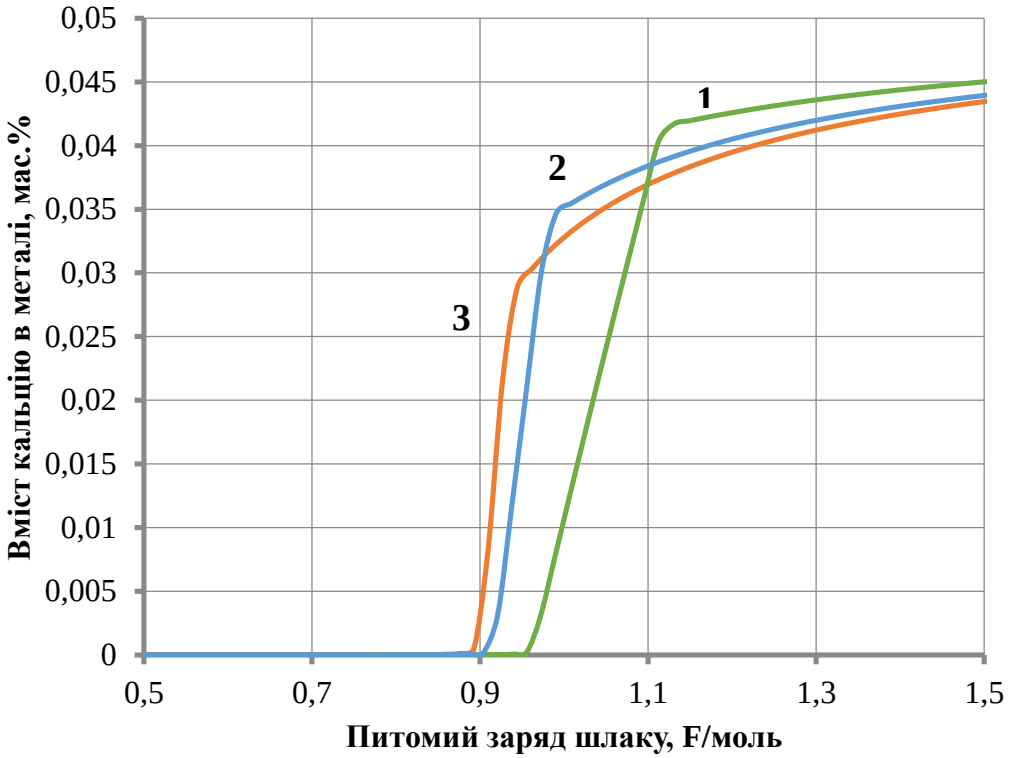


а) 1 атмосфера

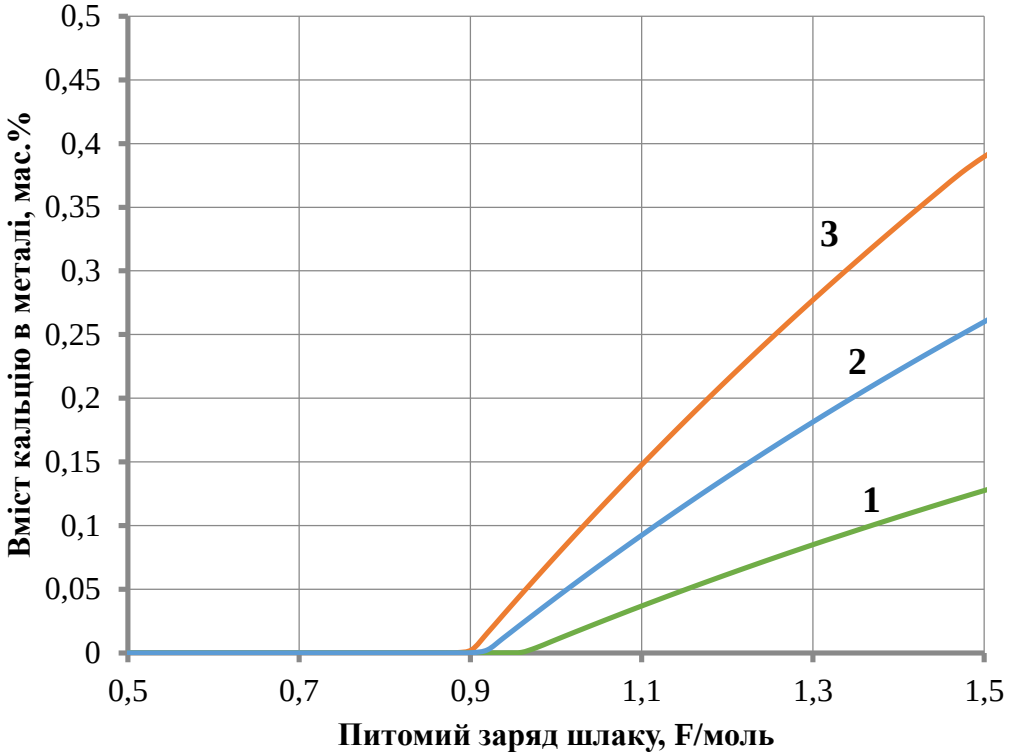


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.9 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в сталі 9MnSi6-3

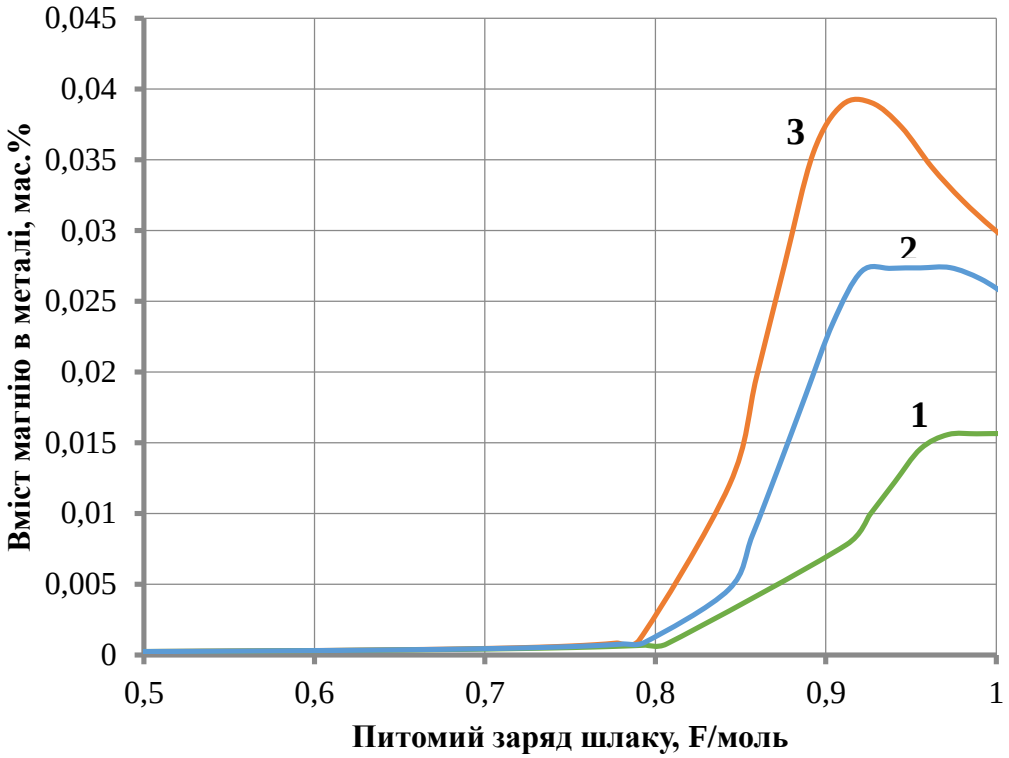


а) 1 атмосфера

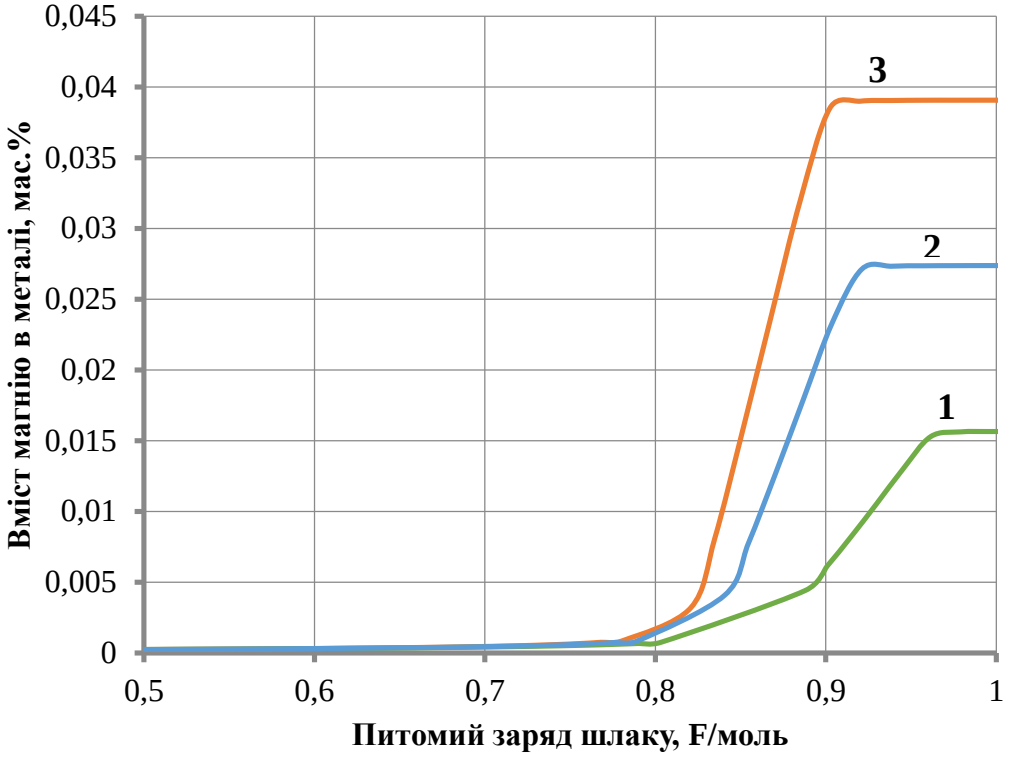


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.10 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в сталі 35CrSiMn5-5-4

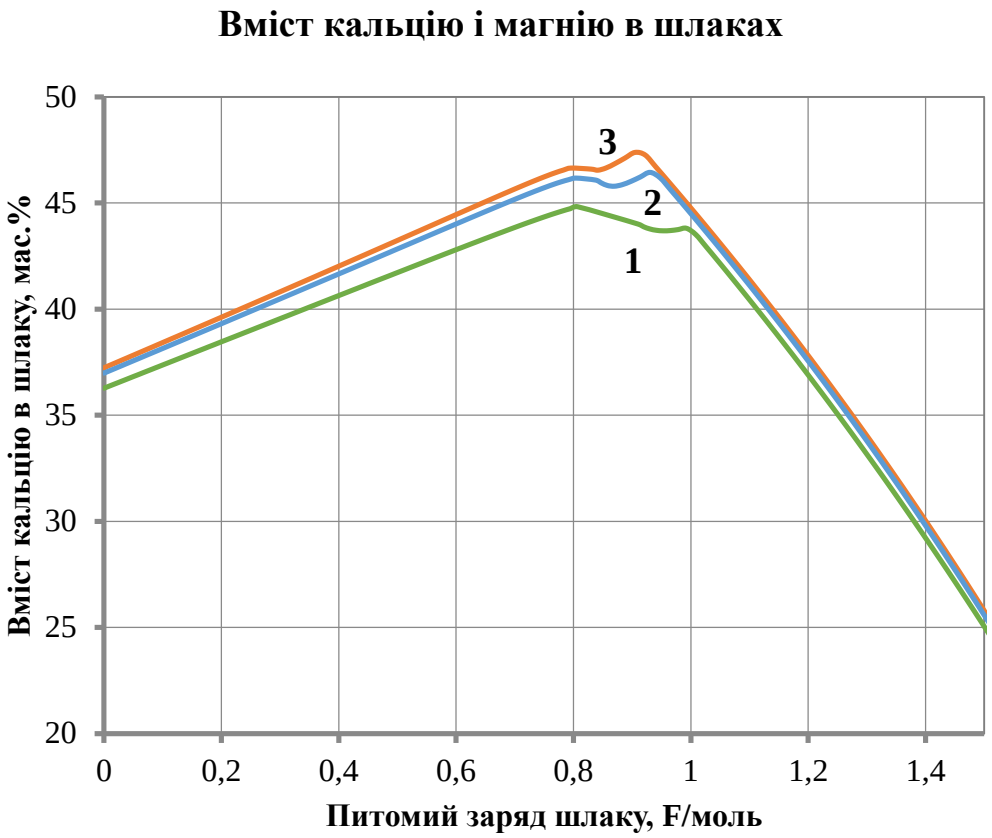


а) 1 атмосфера

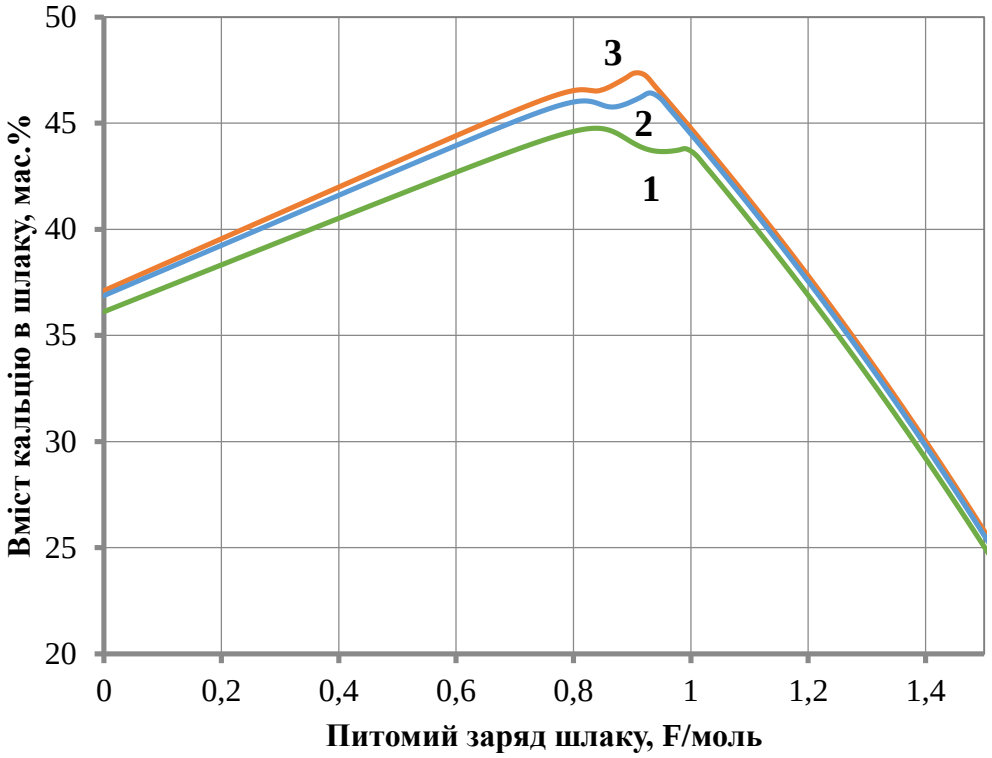


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.11 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в сталі 35CrSiMn5-5-4

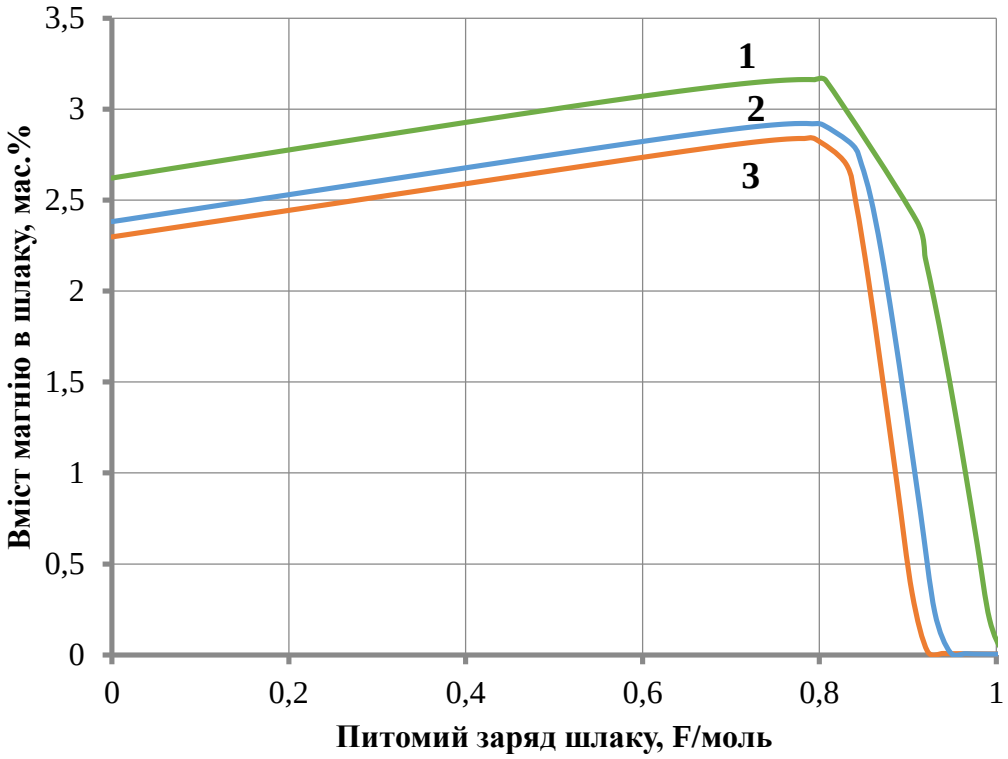


а) 1 атмосфера

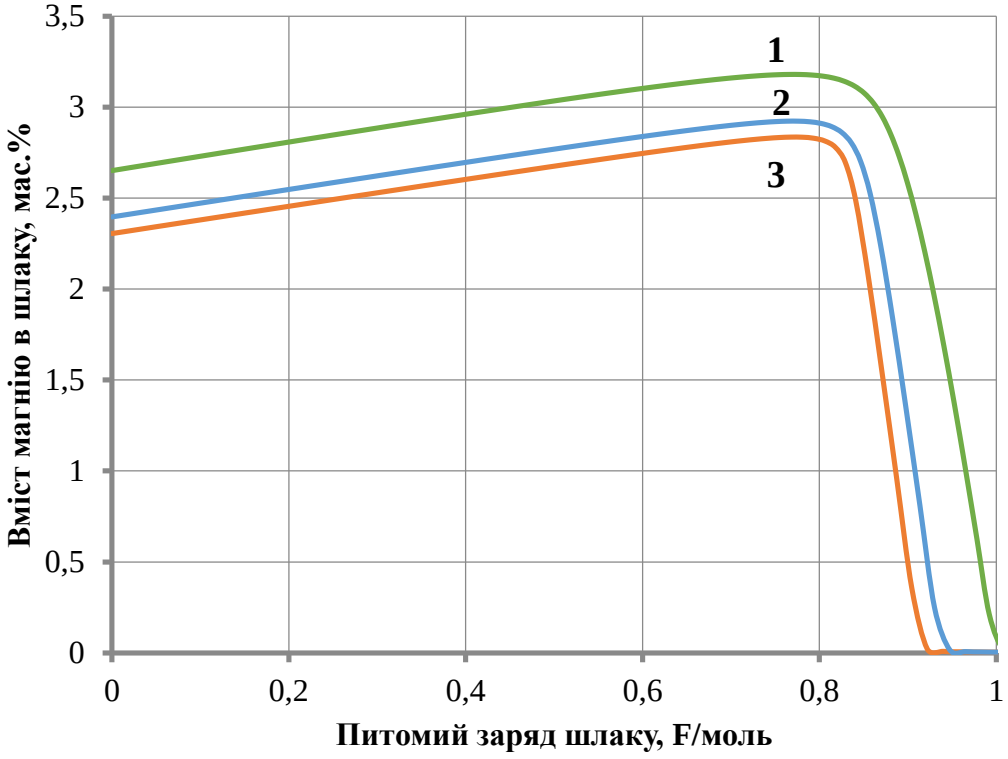


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.12 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кольцію в шлаку сталі 12MnSi4-3

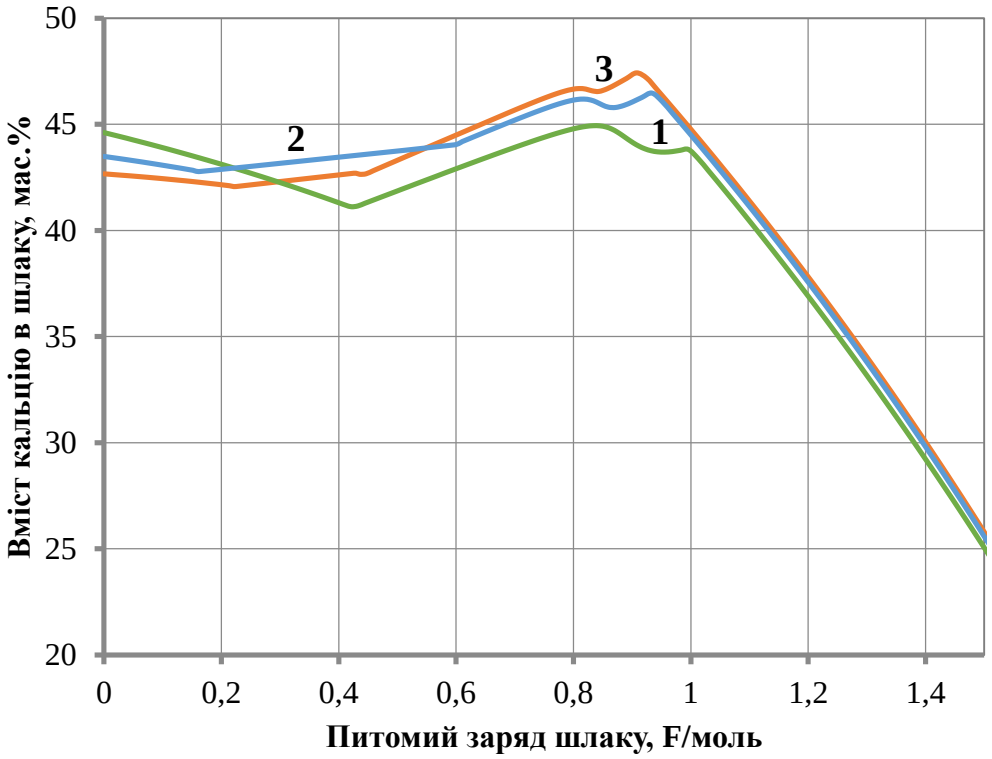


а) 1 атмосфера

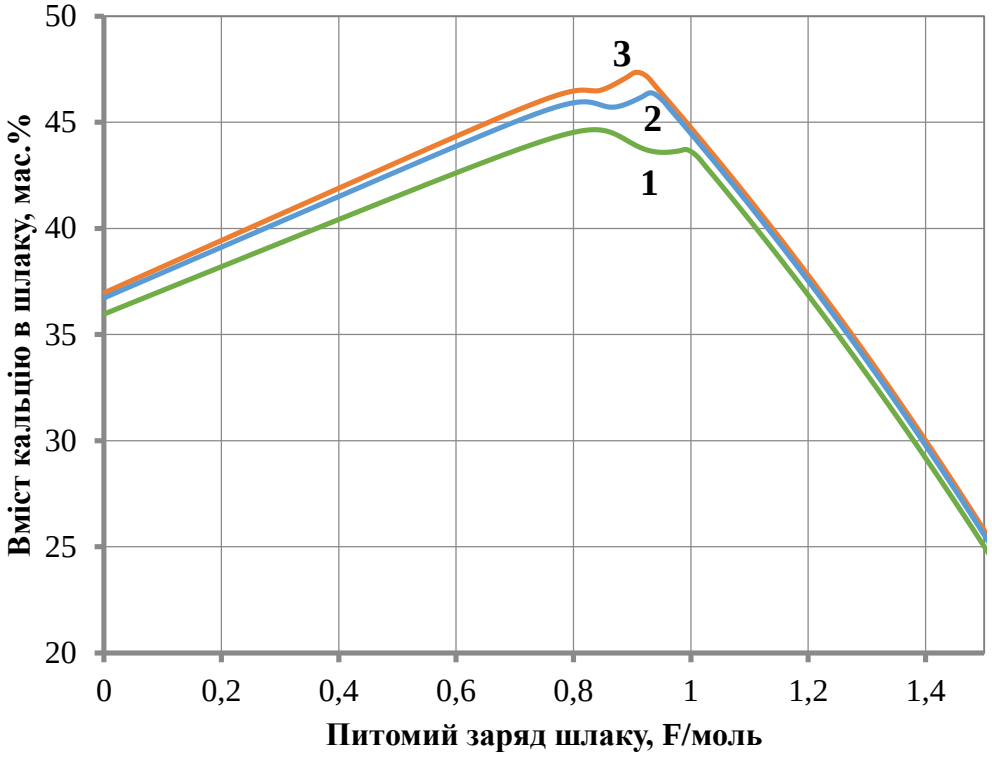


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.13 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в шлаку сталі 12MnSi4-3

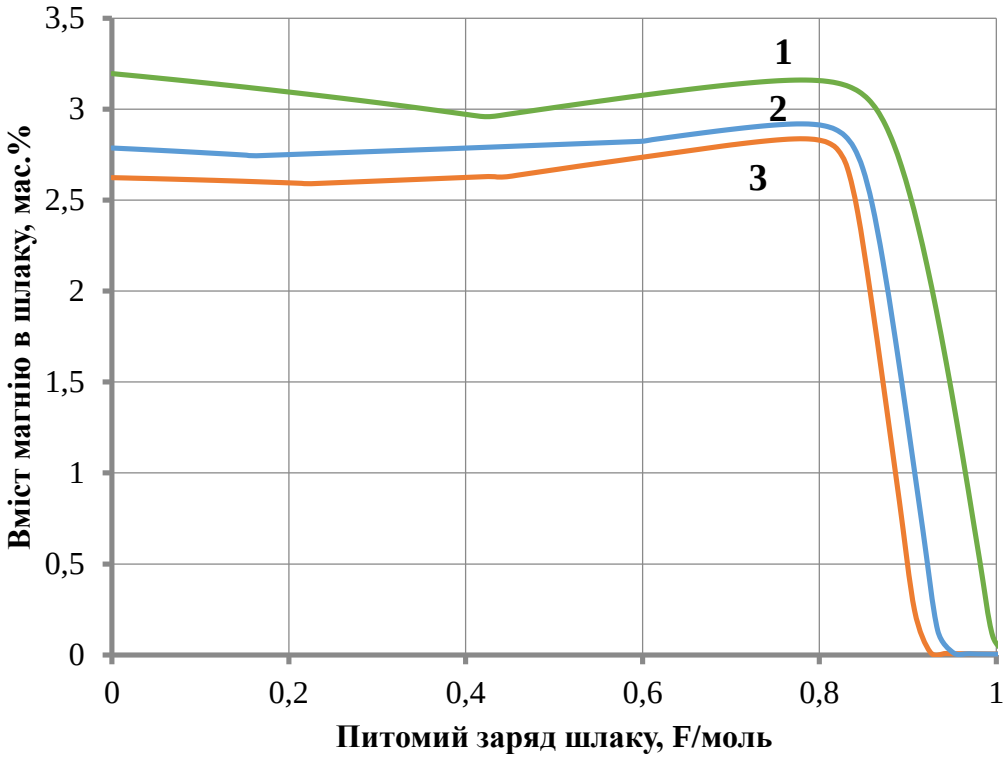


а) 1 атмосфера

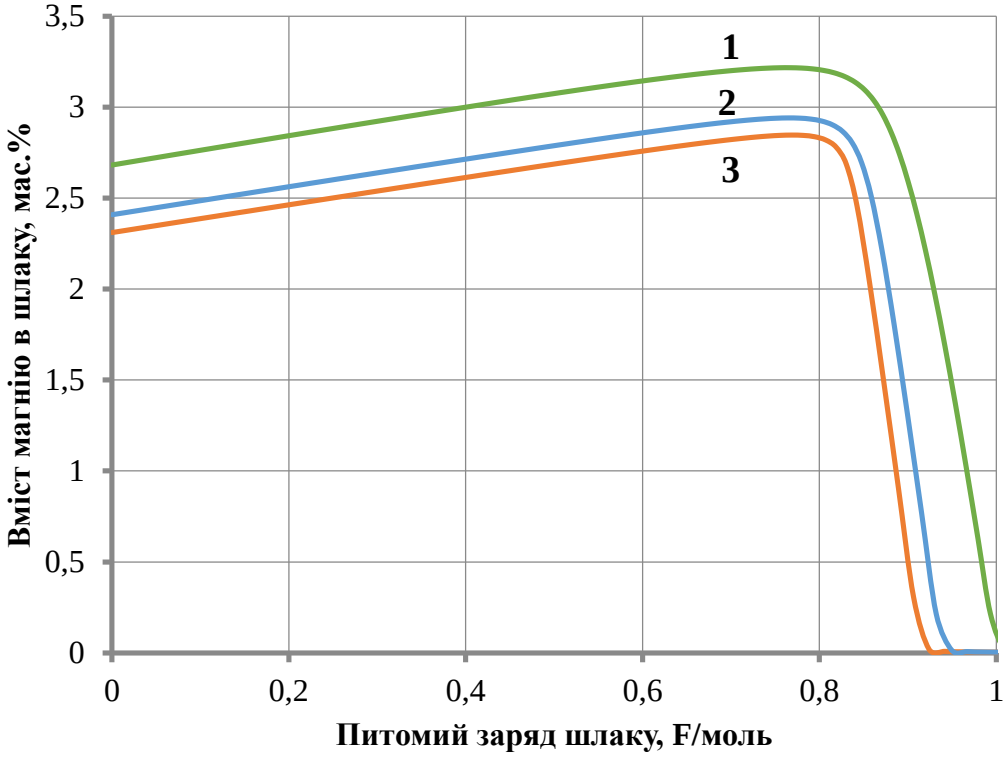


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.14 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в шлаку сталі 30MnSi4-3

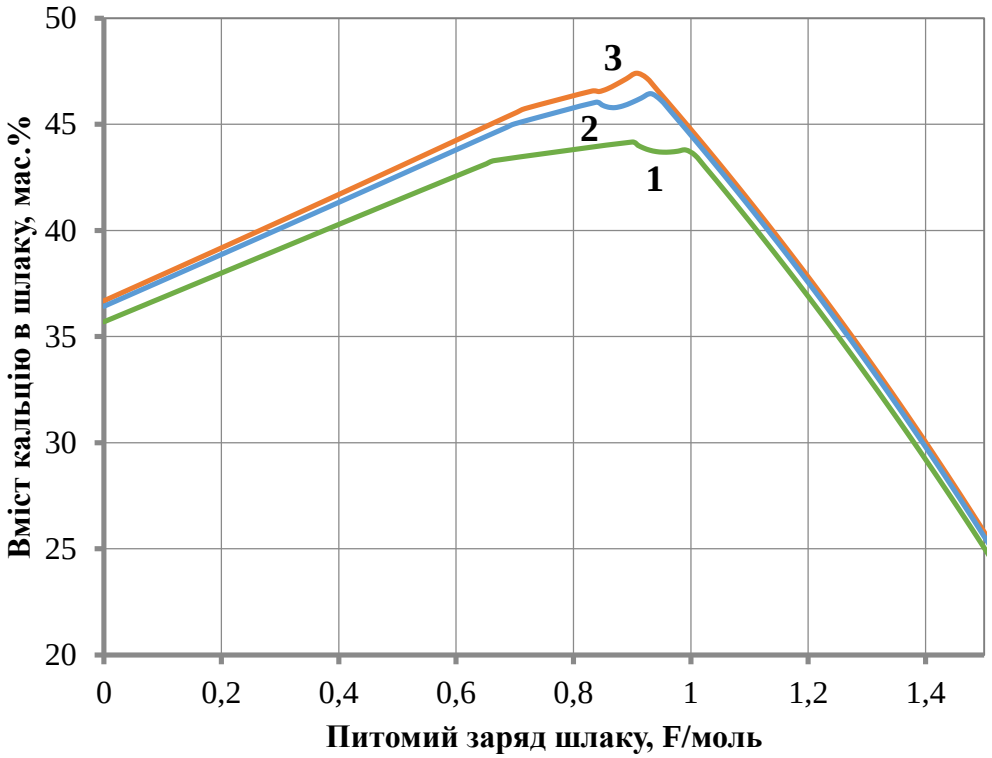


а) 1 атмосфера

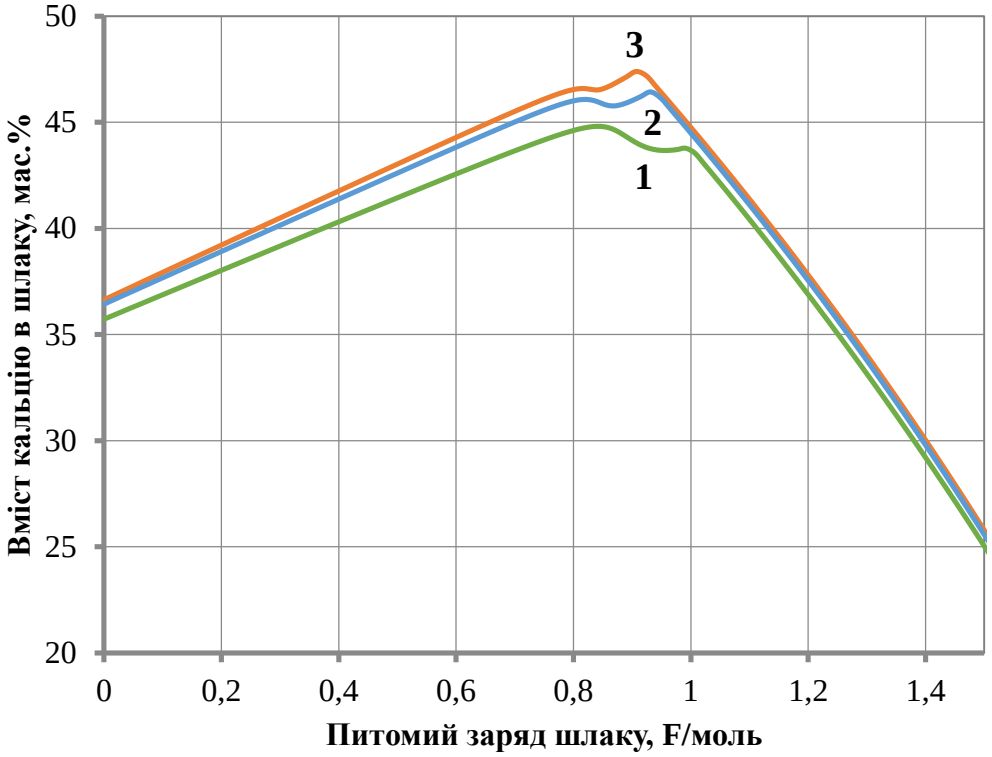


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.15 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в шлаку сталі 30MnSi4-3

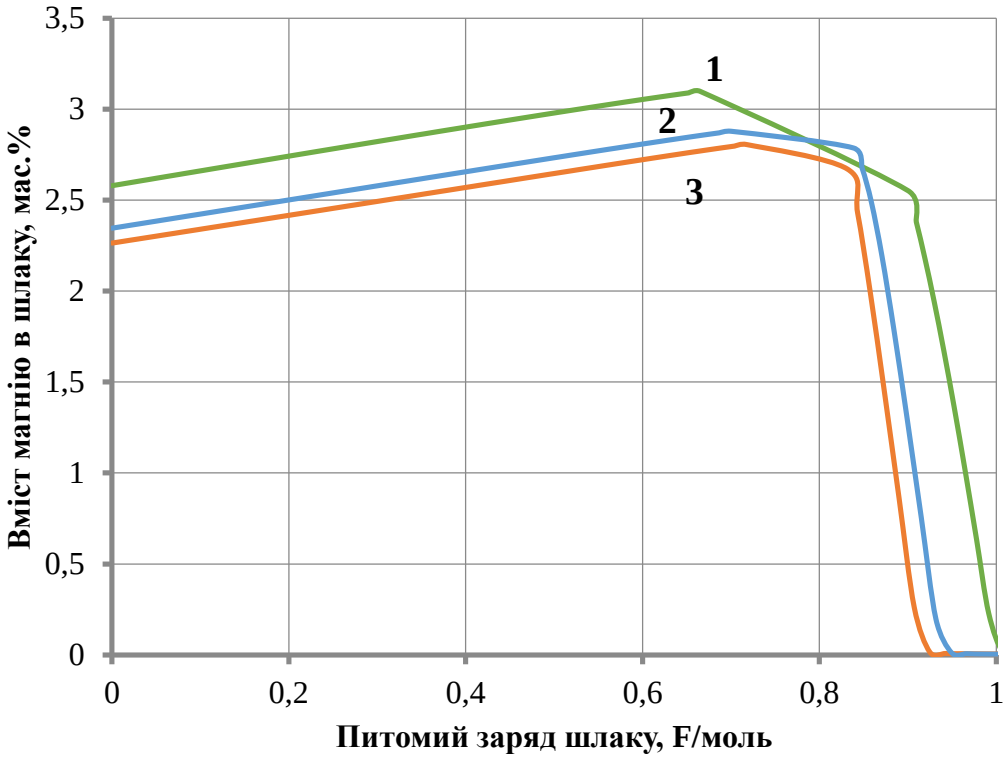


а) 1 атмосфера

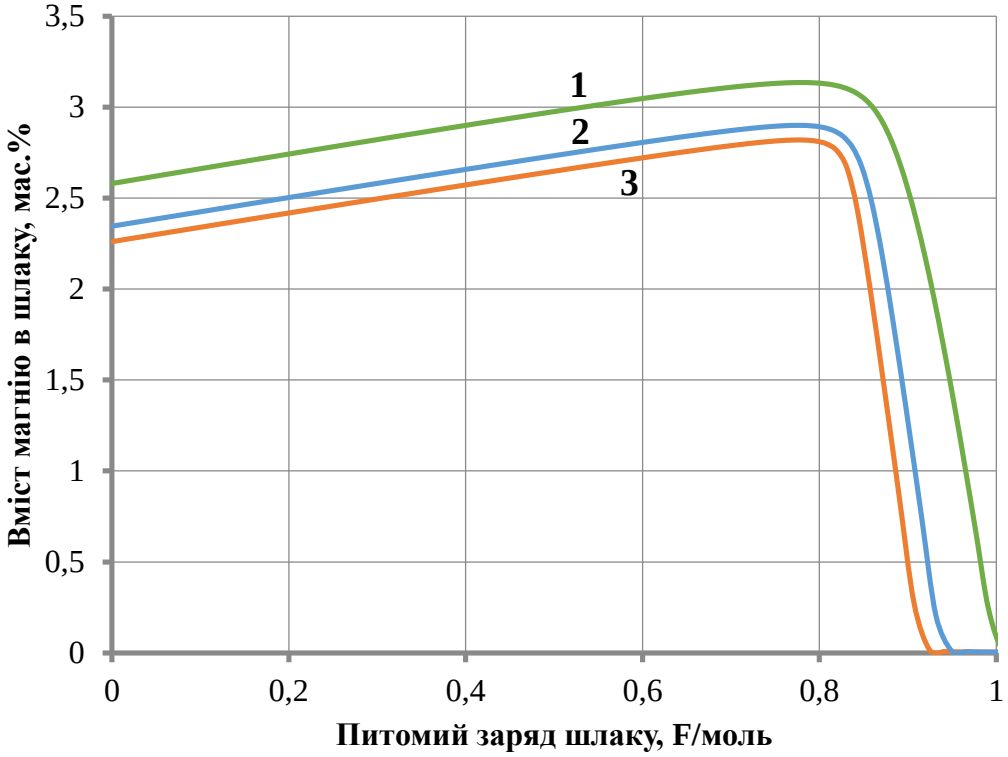


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.16 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в шлаку сталі 9MnSi6-3

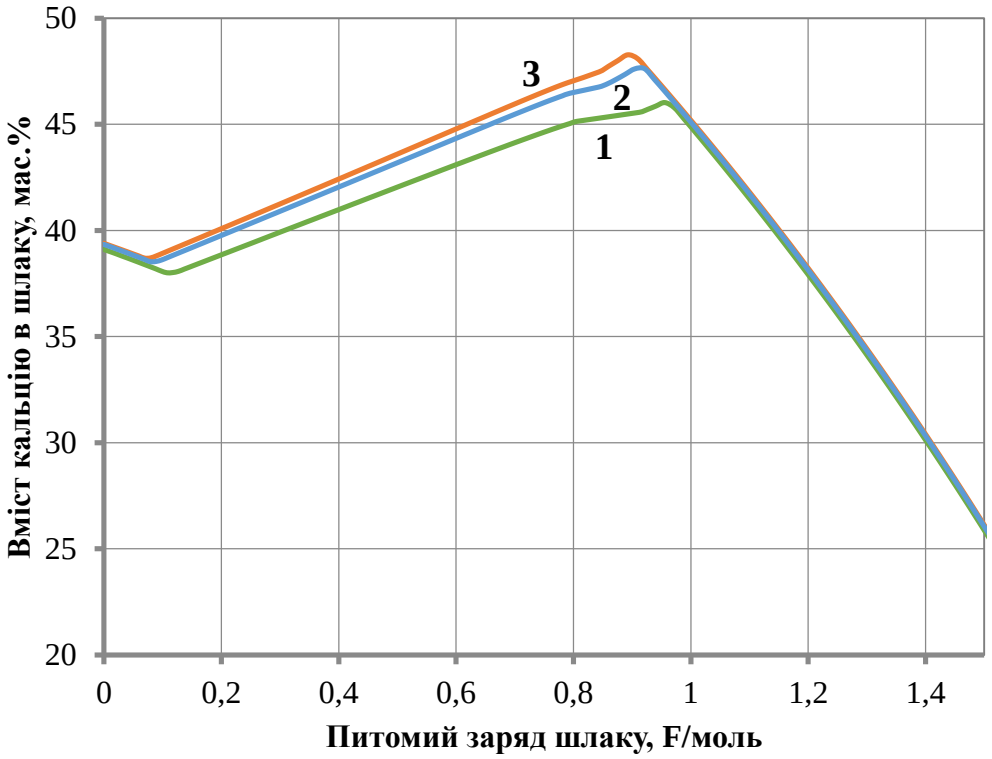


а) 1 атмосфера

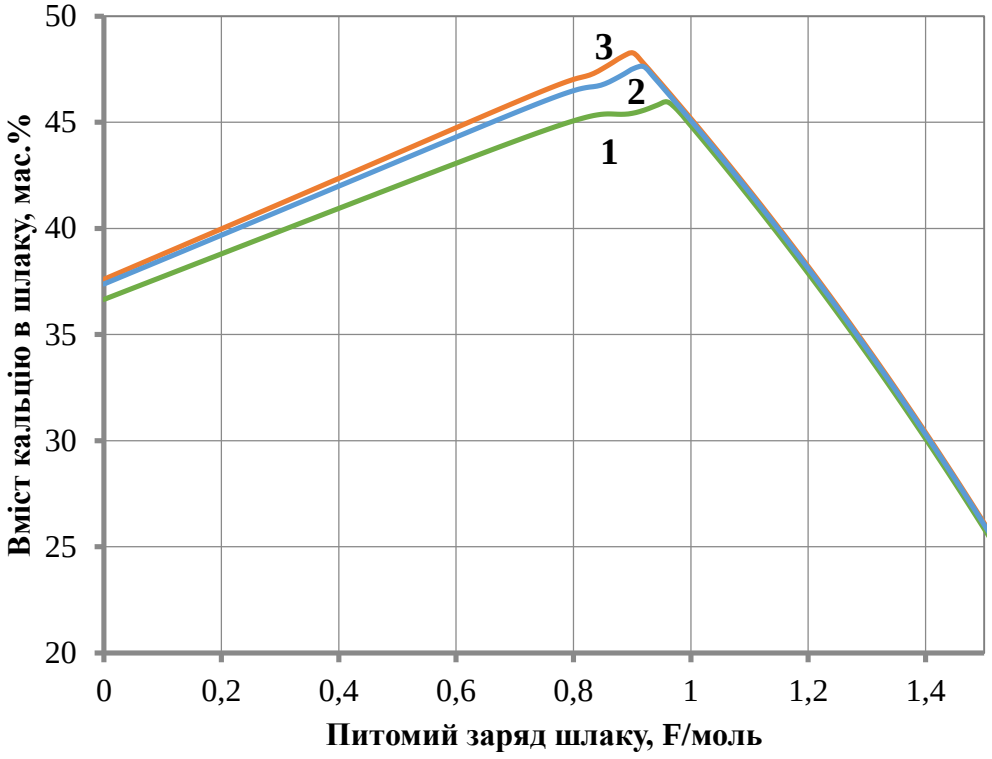


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.17 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в шлаку сталі 9MnSi6-3

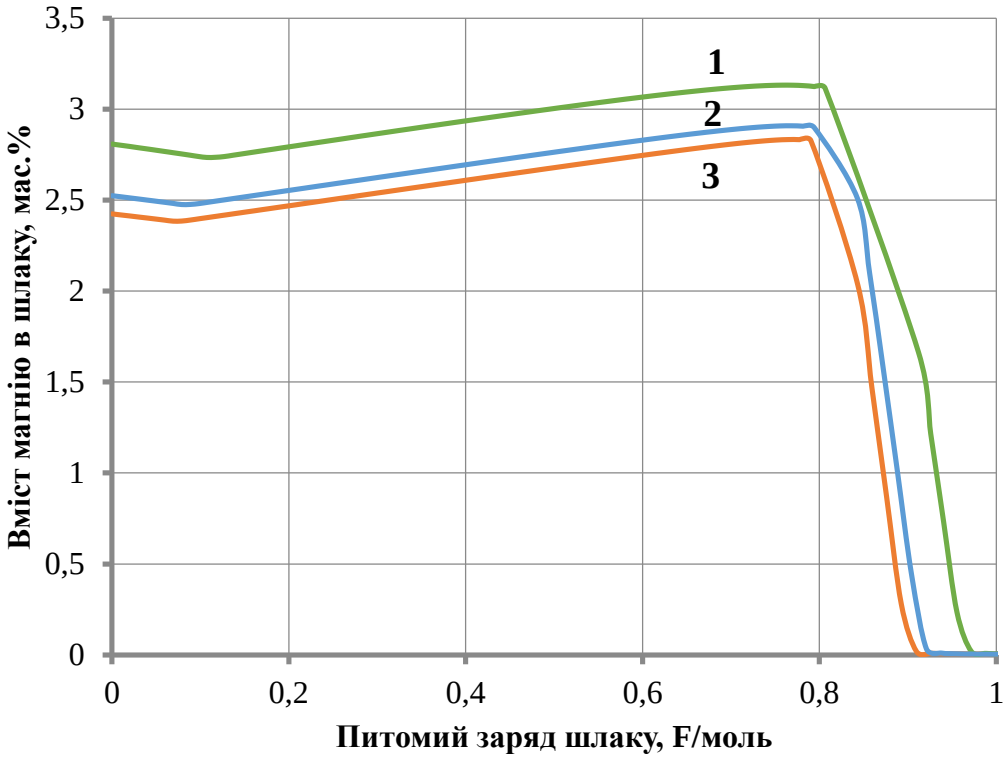


а) 1 атмосфера

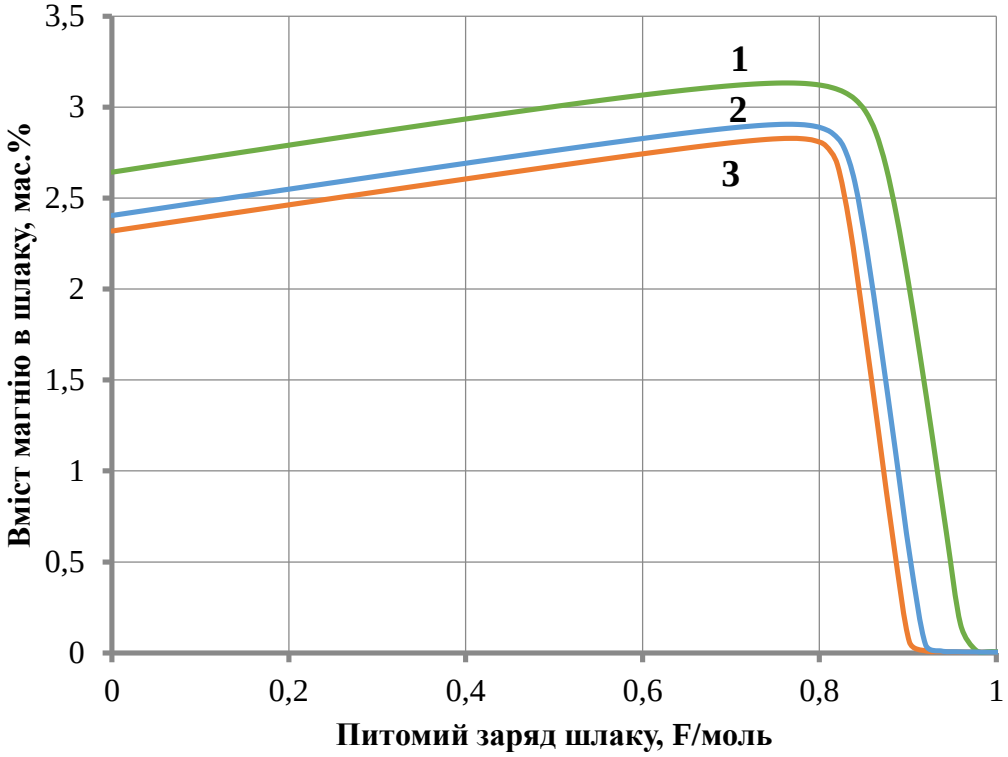


б) 2 атмосфери

Рисунок 3.18 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст кальцію в шлаку сталі 35CrSiMn5-5-4



а) 1 атмосфера



б) 2 атмосфери

Рисунок 3.19 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на вміст магнію в шлаку сталі 35CrSiMn5-5-4

3.4.2 Оптимізація кількості легуючих матеріалів для низьколегованих сталей

На рисунках 3.20 – 3.38 наведено оптимальну витрату феросплавів, електроенергії і загальну вартість матеріалів в залежності від питомого заряду і маси шлаку для наступних марок сталі: 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 35CrSiMn5-5-4. Обчислювальний експеримент проводився при підвищеному зовнішньому тиску 2 атм для маси шлаку 1, 2 і 3 тонни.

На представлених рисунках можна побачити такі закономірності:

- 12MnSi4-3: оптимальна кількість феромарганцю, феросиліцію і електроенергії зменшується, а карбіду кремнію збільшується. Для кожної маси шлаку існує оптимальний питомий заряд в діапазоні від 0,8 до 1 F/моль. Найменша загальна вартість матеріалів становить 74 у.о. на 1 т сталі при масі шлаку 3 т і питомому заряді 0,8 F/моль;

- 30MnSi4-3: оптимальна кількість феромарганцю, феросиліцію, карбіду кремнію і електроенергії зменшується. Для кожної маси шлаку існує оптимальний питомий заряд в діапазоні від 0,7 до 0,8 F/моль. Найменша загальна вартість матеріалів становить 67,3 у.о. на 1 т сталі при масі шлаку 3 т і питомому заряді 0,7 F/моль;;

- 9MnSi6-3: оптимальна кількість феросилікомарганцю, феросиліцію і електроенергії зменшується, а феромарганцю збільшується. Для кожної маси шлаку існує оптимальний питомий заряд в діапазоні від 0,7 до 1 F/моль. Найменша загальна вартість матеріалів становить 111 у.о. на 1 т сталі при масі шлаку 3 т і питомому заряді 0,7 F/моль;

- 35CrSiMn5-5-4: оптимальна кількість феромарганцю і феросиліцію зменшується, а карбіду кремнію і електроенергії збільшується. Для кожної маси шлаку існує оптимальний питомий заряд в діапазоні від 0,75 до 0,83 F/моль. Найменша загальна вартість матеріалів становить 108,5 у.о. на 1 т сталі при масі шлаку 3 т і питомому заряді 0,82 F/моль.

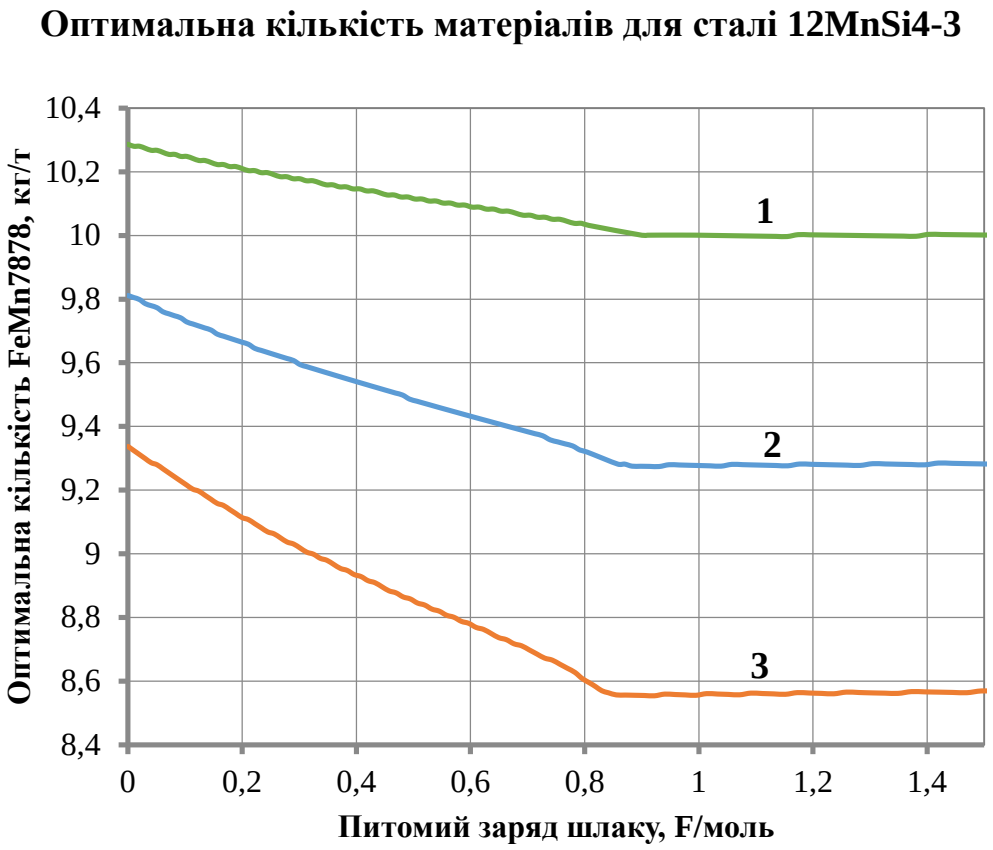


Рисунок 3.20 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феромарганцю для легування сталі 12MnSi4-3

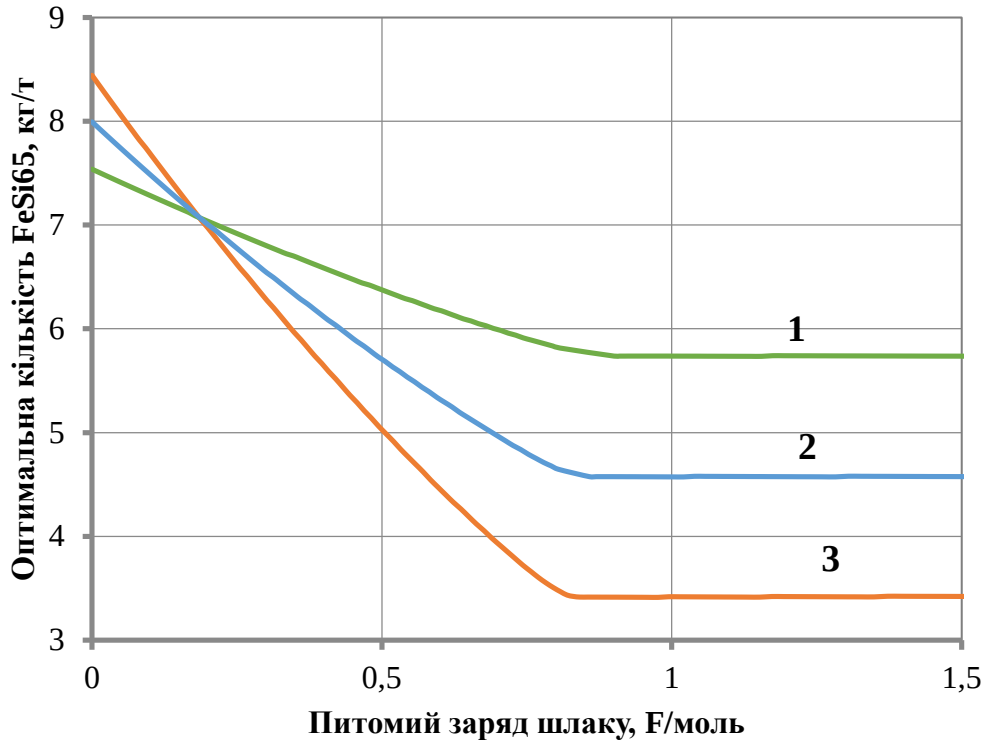


Рисунок 3.21 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феросиліцію для легування сталі 12MnSi4-3

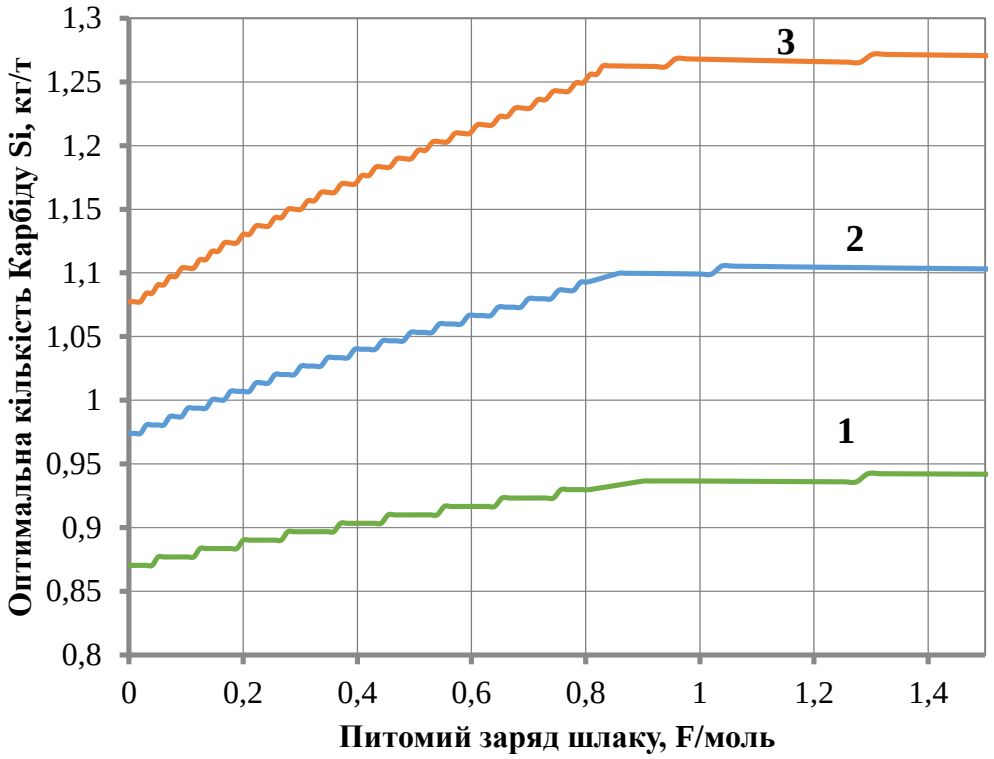


Рисунок 3.22 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість карбіду кремнію для легування сталі 12MnSi4-3

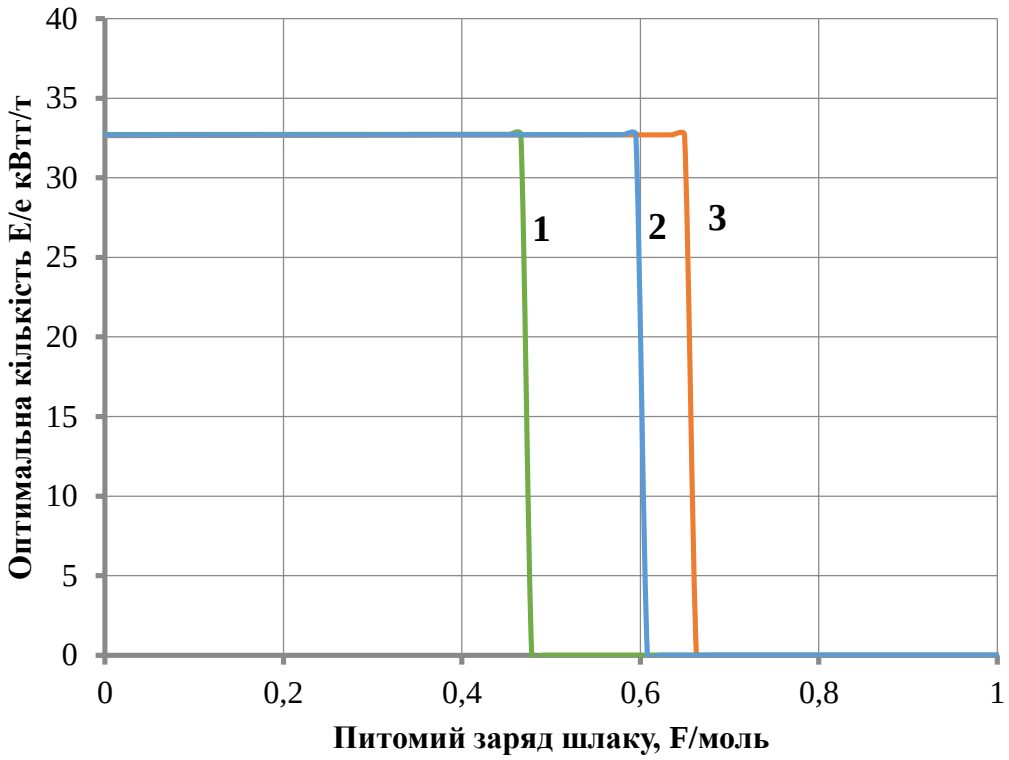


Рисунок 3.23 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість електроенергії для легування сталі 12MnSi4-3

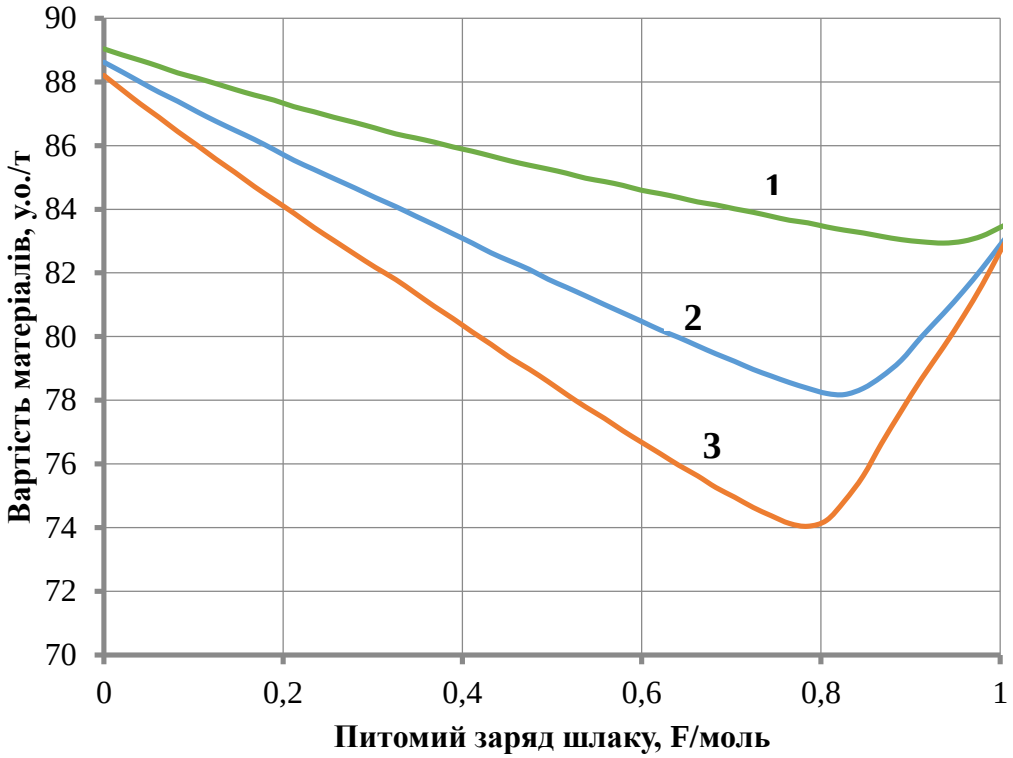


Рисунок 3.24 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну загальну вартість матеріалів для сталі 12MnSi4-3

Оптимальна кількість матеріалів для сталі 30MnSi4-3

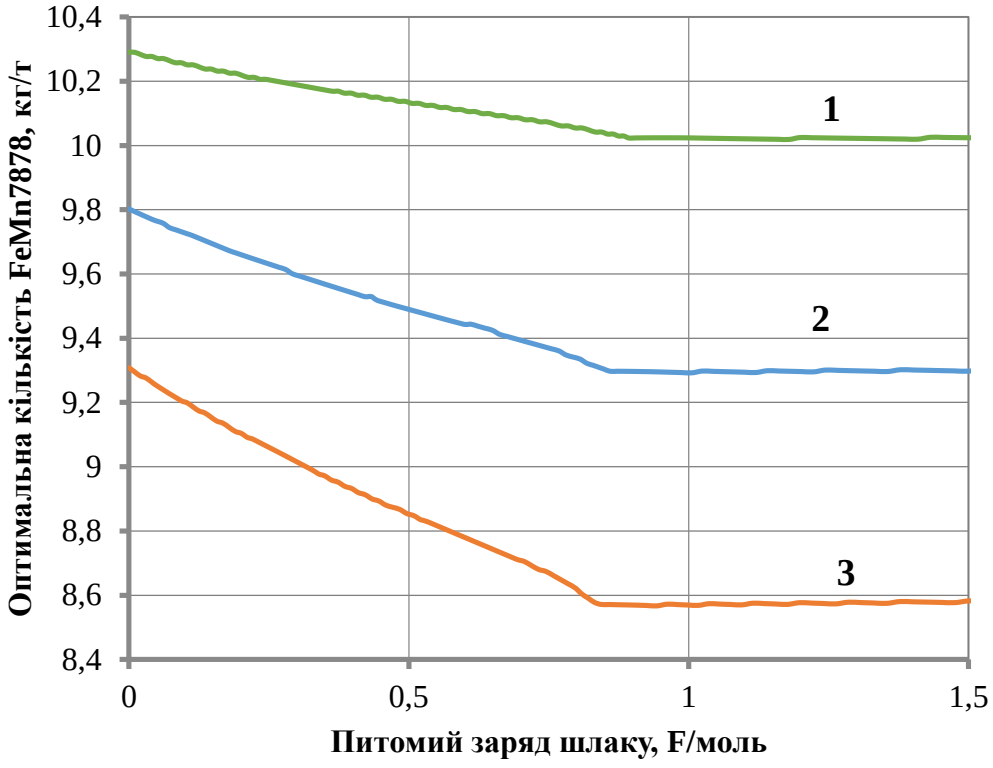


Рисунок 3.25 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феромарганцю для легування сталі 30MnSi4-3

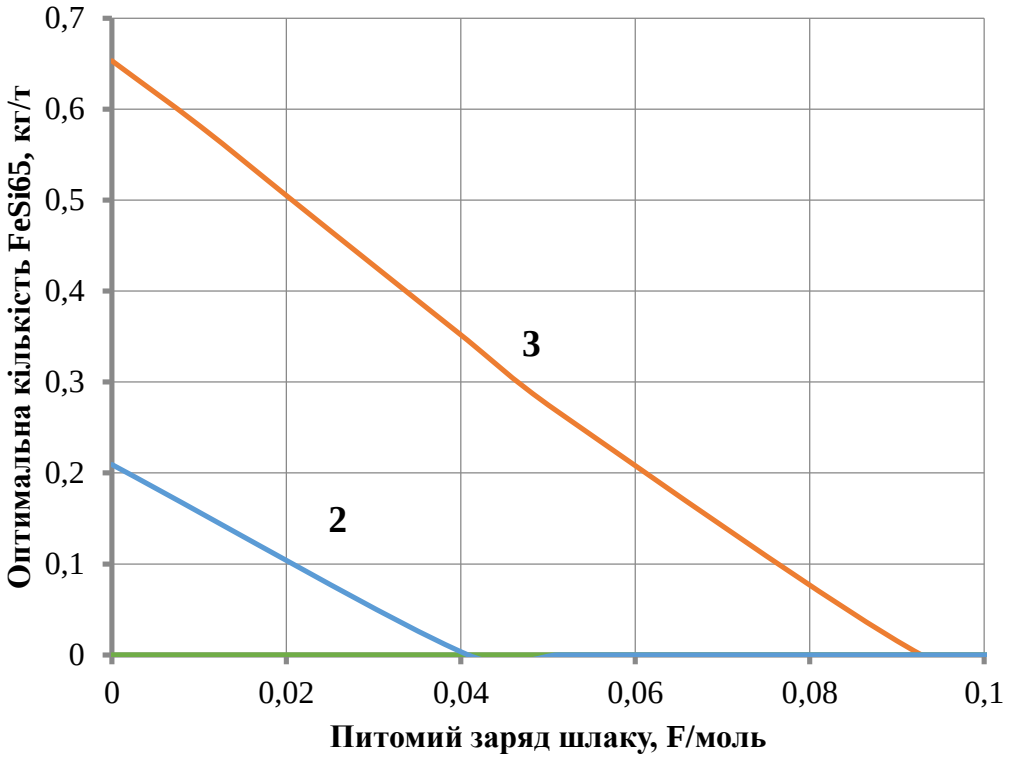


Рисунок 3.26 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феросиліцію для легування сталі 30MnSi4-3

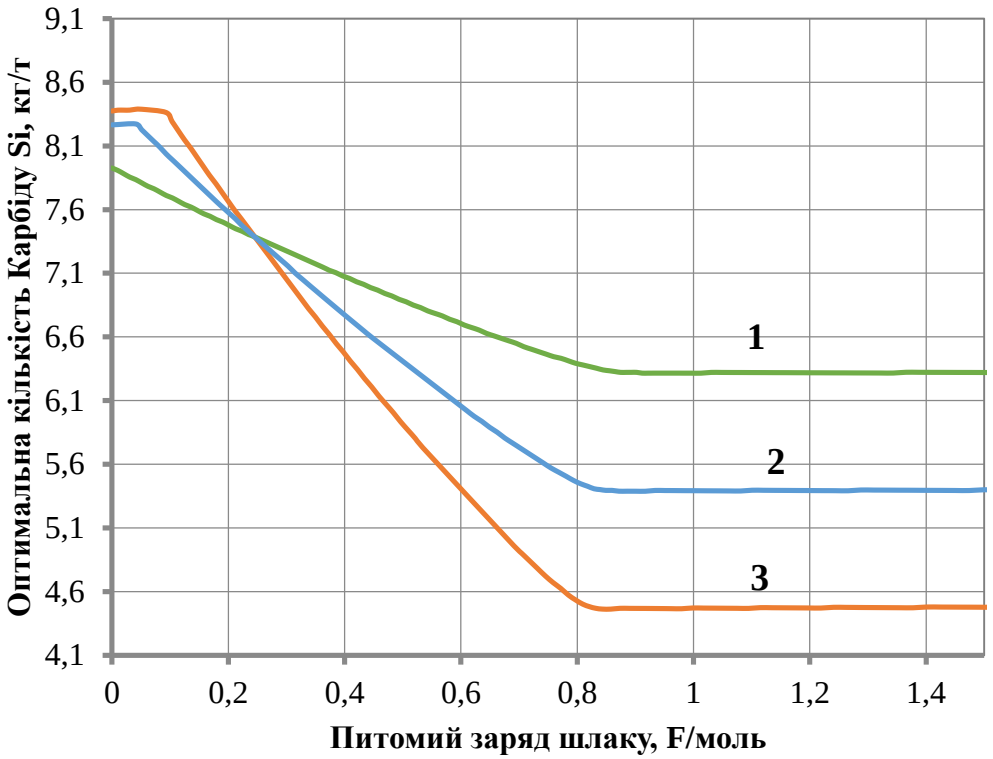
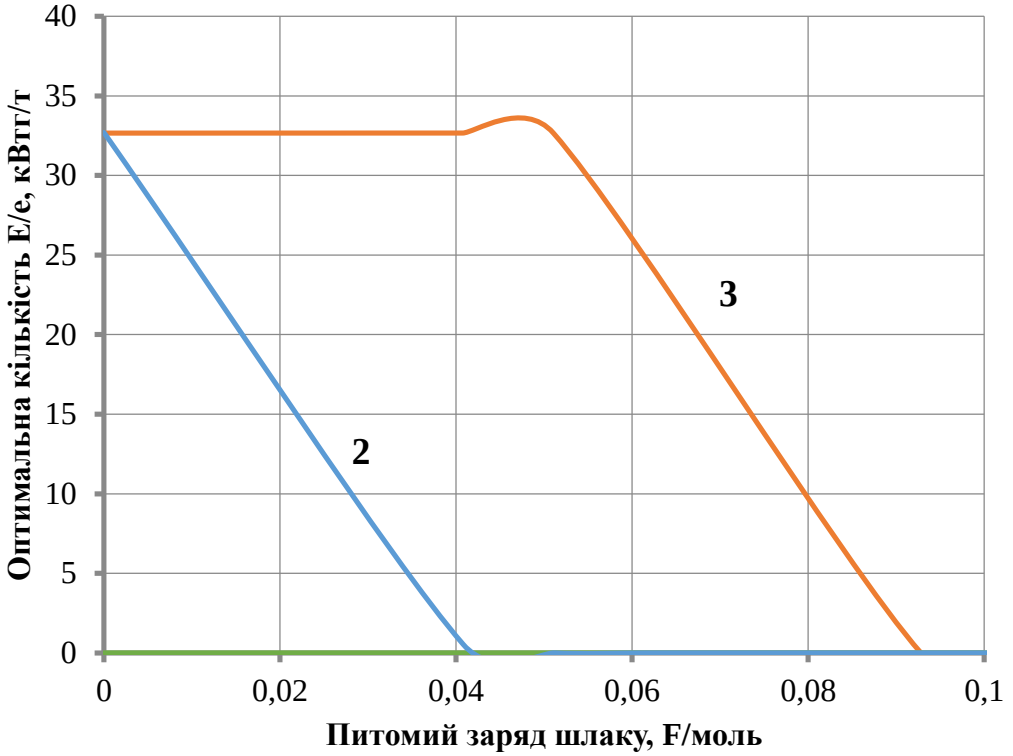
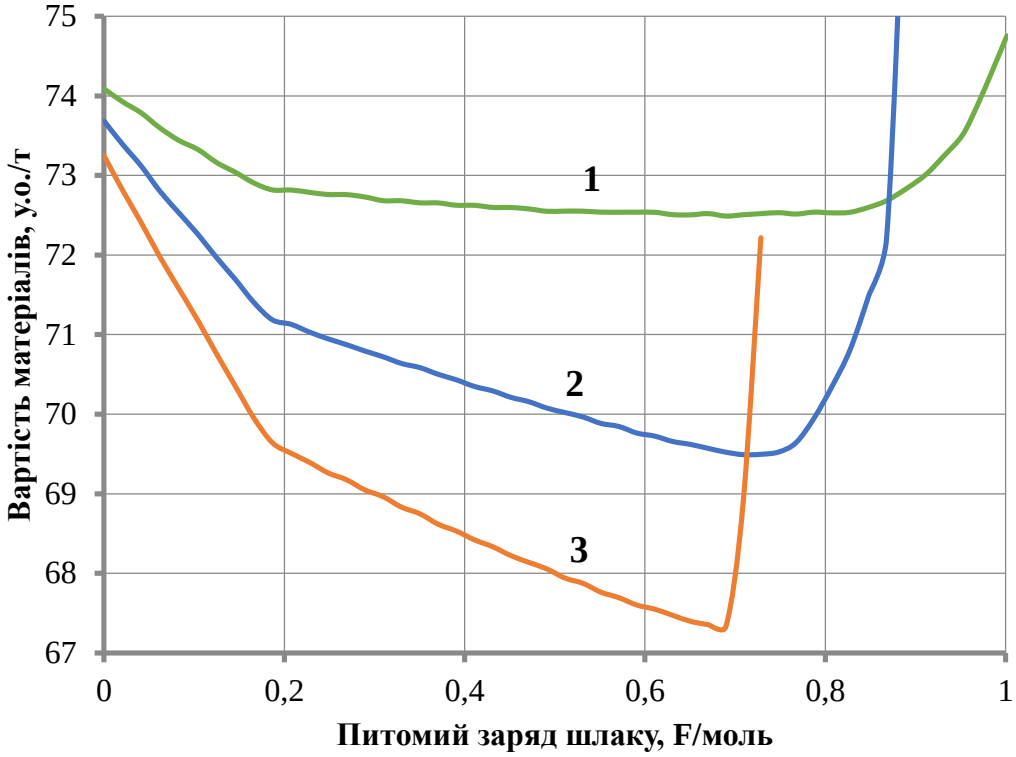


Рисунок 3.27 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість карбіду кремнію для легування сталі 30MnSi4-3



а)



б)

Рисунок 3.28 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну витрату електроенергії (а) і загальну вартість матеріалів (б) для легування сталі 30MnSi4-3

Оптимальна кількість матеріалів для легування сталі 9MnSi6-3

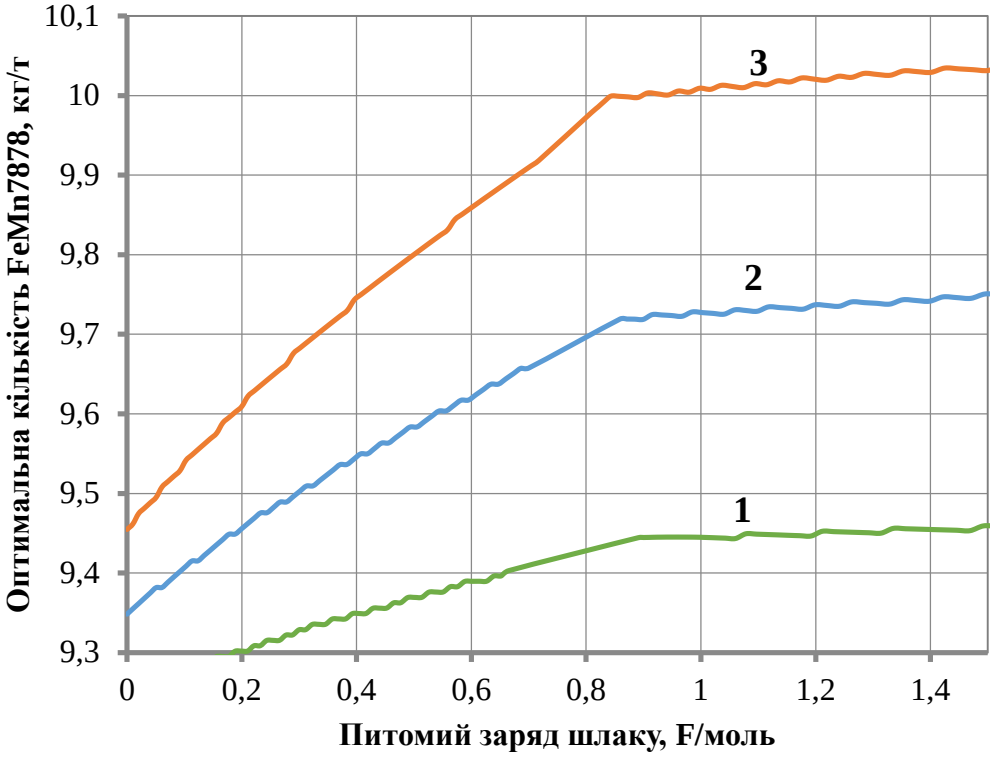


Рисунок 3.29 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феромарганцю для легування сталі 9MnSi6-3

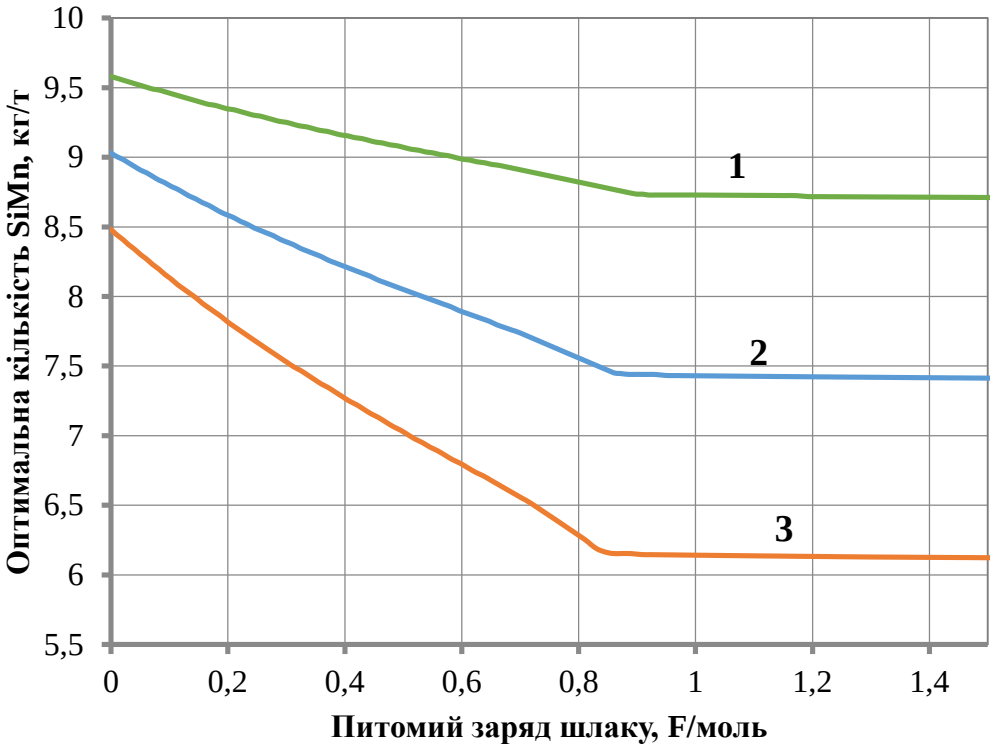


Рисунок 3.30 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феросилікомарганцю для легування сталі 9MnSi6-3

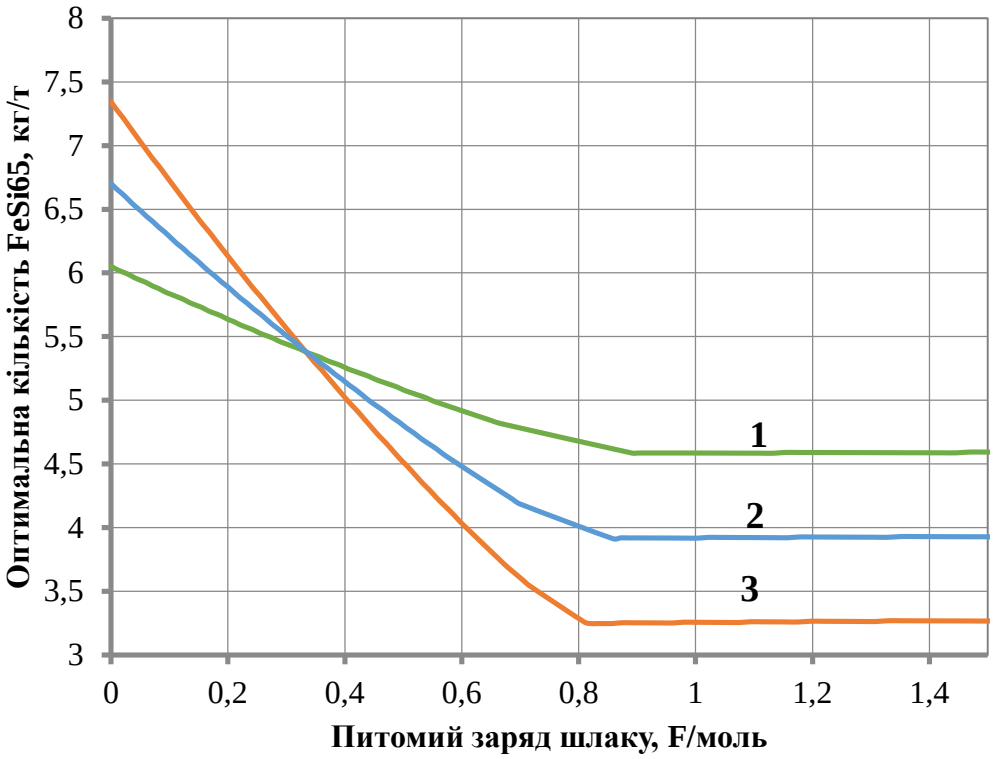


Рисунок 3.31 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феросиліцію для легування сталі 9MnSi6-3

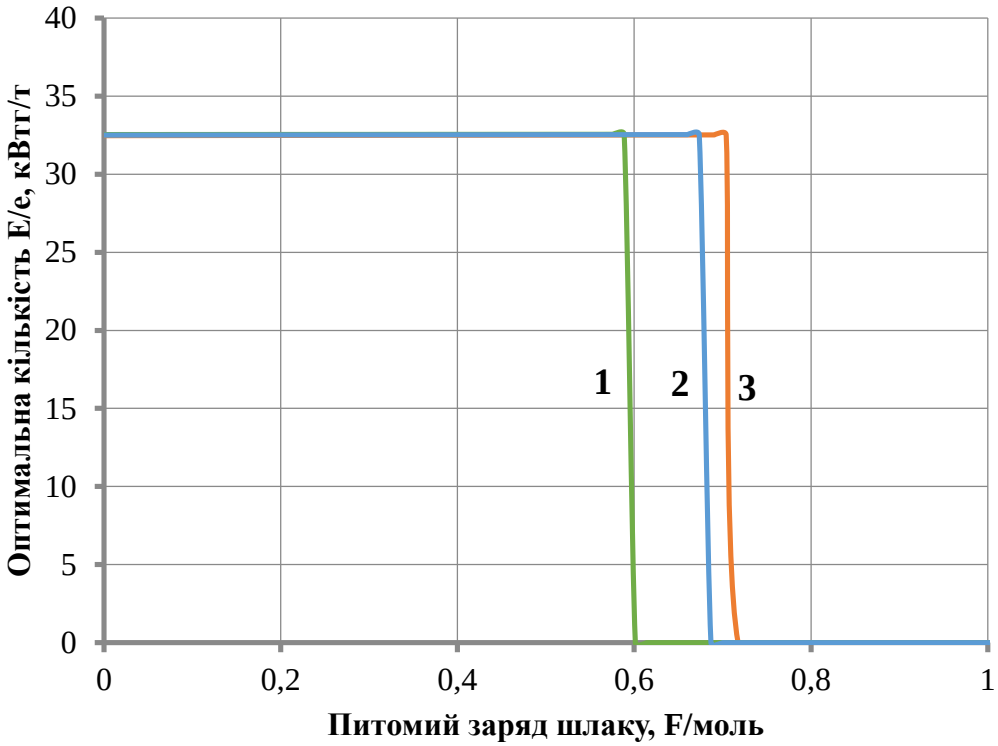


Рисунок 3.32 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість електроенергії для легування сталі 9MnSi6-3

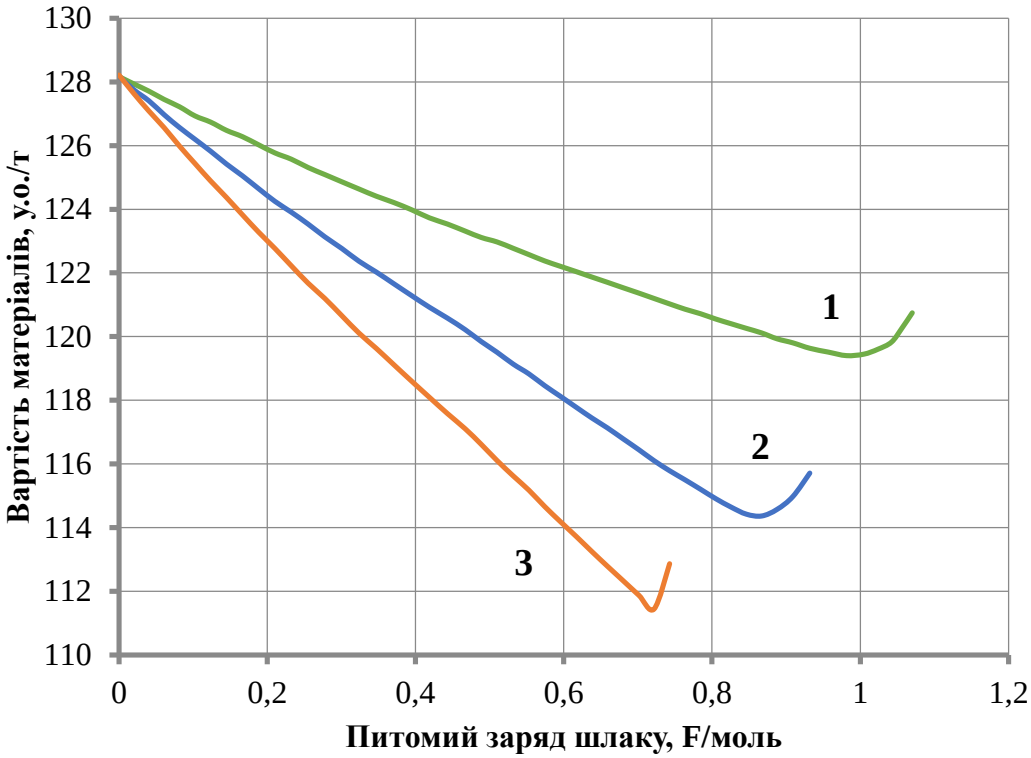


Рисунок 3.33 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну загальну вартість матеріалів для легування сталі 9MnSi6-3

Оптимальна кількість матеріалів для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

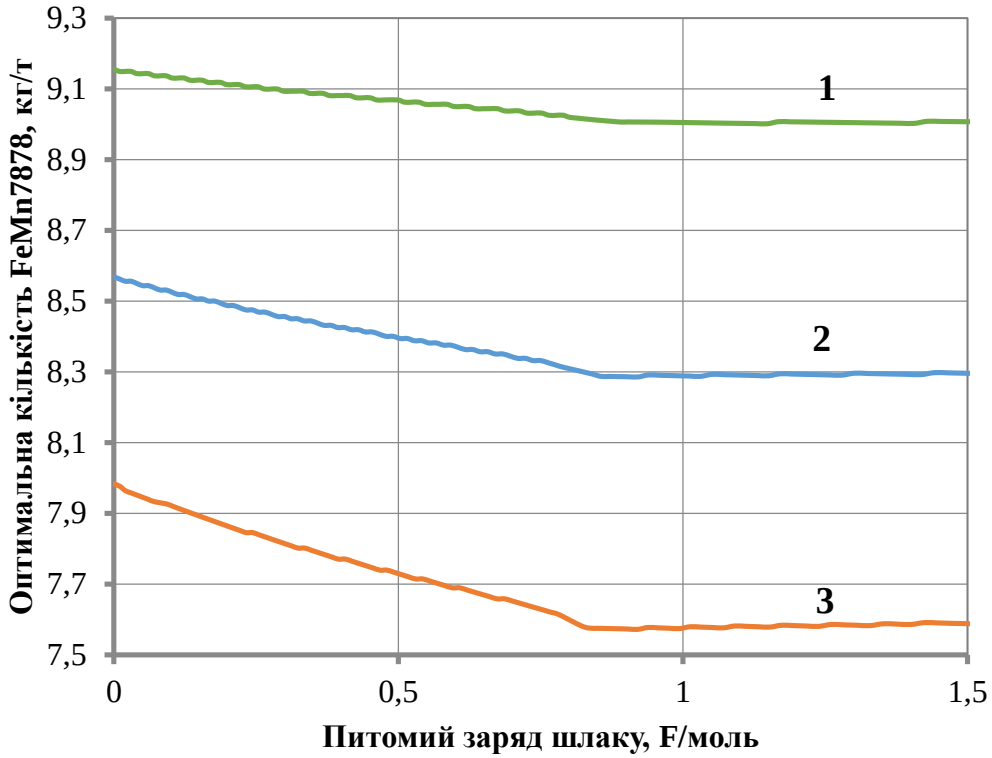


Рисунок 3.34 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феромарганцю для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

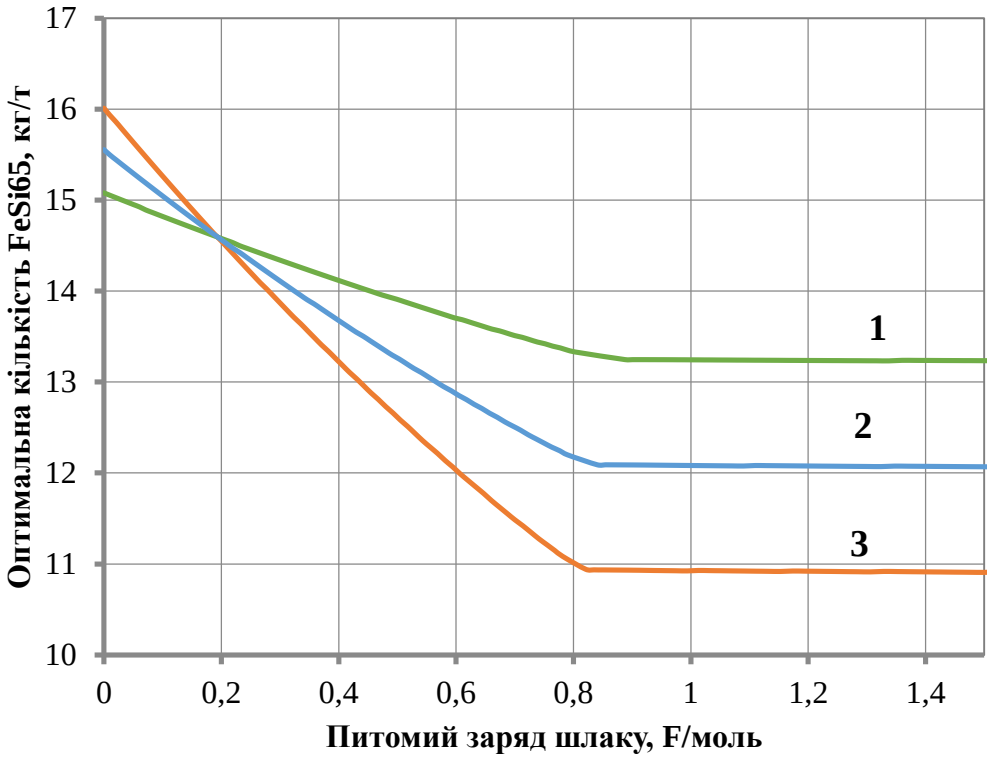


Рисунок 3.35 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість феросиліцію для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

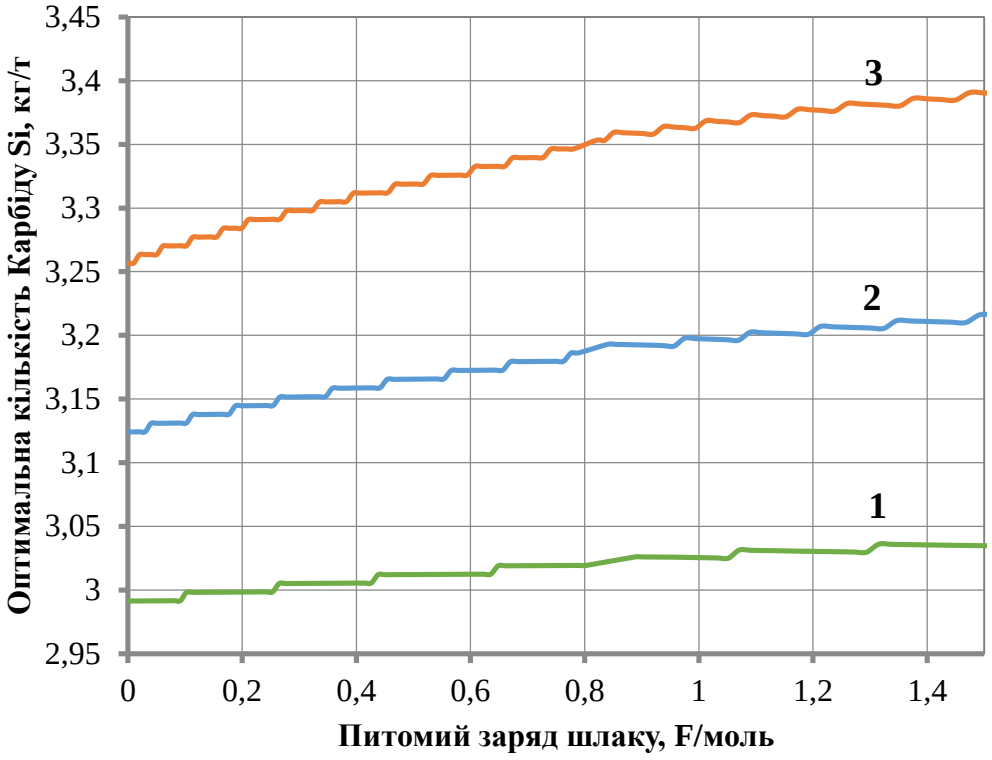


Рисунок 3.36 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість карбіду кремнію для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

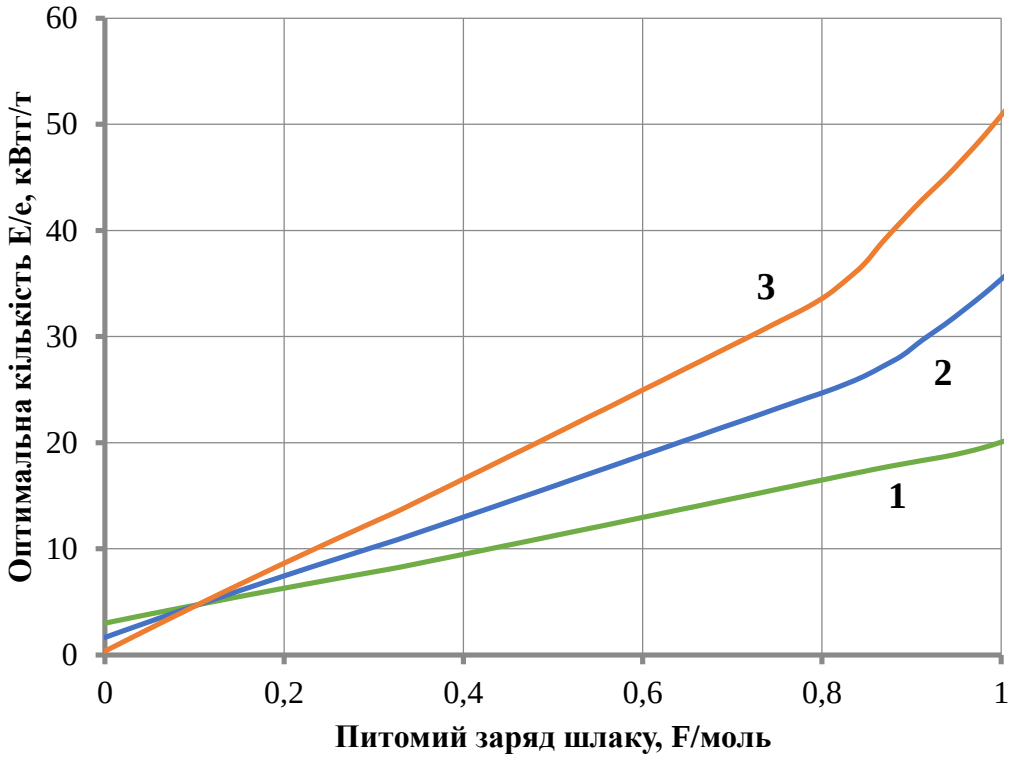


Рисунок 3.37 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну кількість електроенергії для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

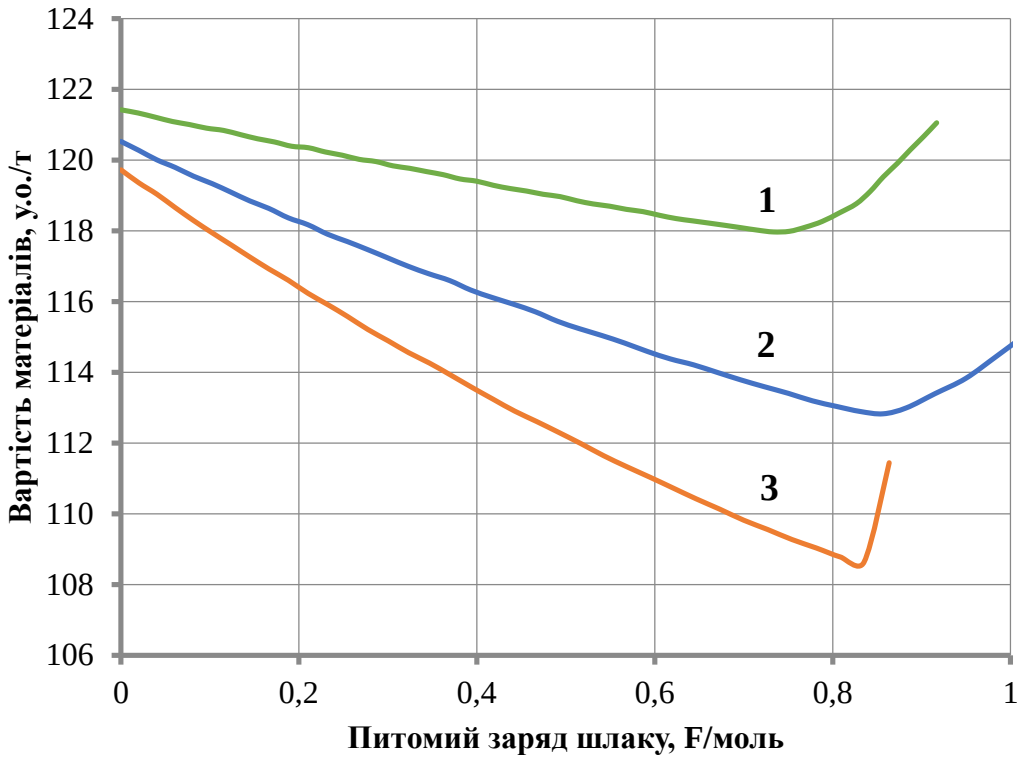


Рисунок 3.38 – Вплив питомого заряду і маси шлаку на оптимальну загальну вартість матеріалів для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

3.4.3 Хімічний склад металу і шлаку

У таблицях 3.5 – 3.40 наведено хімічний склад металу, шлаку і газової фази сталей 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 35CrSiMn5-5-4 при підвищеному зовнішньому тиску (2 атм) і початковій масі шлаку 1, 2, 3 т.

Маса шлаку 1 т

Таблиця 3.5 – Хімічний склад сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,44	98,5	98,47	150236,45	150313,97	150275,21
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,1402	0,1501	0,1451	213,97	229,03	221,5
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5001	0,5084	0,5042	763,23	775,83	769,53
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,8002	0,8355	0,8178	1221,11	1275,11	1248,11
5	Al					0,00766	0,00766	0,00766	11,69	11,69	11,69
6	S	0,035		0,04		0,02946	0,02952	0,02949	44,95	45,04	45
7	P	0,015		0,035		0,02224	0,02224	0,02224	33,94	33,94	33,94
8	Mg					0,00049	0,00049	0,00049	0,7527	0,7528	0,7528
9	Ca					0	0	0	0,00083	0,00083	0,00083
10	O					0,00194	0,00195	0,00195	2,958	2,981	2,969

Таблиця 3.6 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,4817	0,4907	0,4862	4,817	4,905	4,861
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				1,651	1,664	1,658	16,51	16,64	16,57
4	MnO	10				0,7737	0,7975	0,7856	7,735	7,975	7,855
5	Al2O3	1,5				0,2796	0,281	0,2803	2,796	2,809	2,802
6	S	0,3				1,121	1,129	1,125	11,2	11,29	11,25
7	P2O5	0,2				0,00021	0,00021	0,00021	0,00205	0,00211	0,00208
8	MgO	3				6,754	6,756	6,755	67,54	67,55	67,54
9	CaO	45				88,89	88,93	88,91	888,93	889,04	888,98
10	O										

Таблиця 3.7 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,03225	0,03362	0,03294	0	0	0
2	C					42,26	42,27	42,26	0,00037	0,00038	0,00037

3	Si					0,0458	0,04822	0,04701	0	0	0
4	Mn					0,217	0,2186	0,2178	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00271	0,00281	0,00276	0	0	0
7	P					0,00008	0,00008	0,00008	0	0	0
8	Mg					0,814	0,8381	0,826	0	0	0
9	Ca					0,0066	0,00688	0,00674	0	0	0
10	O					56,6	56,61	56,6	0,00049	0,00051	0,0005

Таблиця 3.8 – Хімічний склад сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,24	98,31	98,27	149931,41	150003,16	149967,29
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3318	0,3465	0,3392	506,3	528,84	517,57
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5	0,5195	0,5097	762,87	792,8	777,83
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,8	0,8315	0,8157	1220,71	1269	1244,85
5	Al					0,00782	0,00783	0,00783	11,94	11,95	11,95
6	S	0,035		0,04		0,02967	0,0298	0,02974	45,28	45,47	45,38
7	P	0,015		0,035		0,02172	0,02172	0,02172	33,14	33,14	33,14
8	Mg					0,00049	0,00049	0,00049	0,7402	0,7451	0,7426
9	Ca					0	0	0	0,00091	0,00091	0,00091
10	O					0,00238	0,00241	0,0024	3,638	3,682	3,66

Таблиця 3.9 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,4773	0,4929	0,4851	4,775	4,929	4,852
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				2,182	2,223	2,202	21,82	22,24	22,03
4	MnO	10				0,7267	0,7376	0,7322	7,268	7,379	7,323
5	Al2O3	1,5				0,3108	0,3154	0,3131	3,109	3,154	3,131
6	S	0,3				1,055	1,073	1,064	10,55	10,73	10,64
7	P2O5	0,2				0,00024	0,00025	0,00025	0,00241	0,00254	0,00248
8	MgO	3				6,617	6,621	6,619	66,19	66,22	66,21
9	CaO	45				88,56	88,61	88,58	885,97	886,14	886,05
10	O										

Таблиця 3.10 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,02016	0,02076	0,02046	0	0	0
2	C					42,5	42,5	42,5	0,0006	0,0006	0,0006

3	Si					0,02153	0,02156	0,02155	0	0	0
4	Mn					0,1323	0,1345	0,1334	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00153	0,00153	0,00153	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					0,4989	0,5023	0,5006	0	0	0
9	Ca					0,00409	0,00419	0,00414	0	0	0
10	O					56,82	56,82	56,82	0,0008	0,00081	0,0008

Таблиця 3.11 – Хімічний склад сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,99	98,03	98,01	150316,68	150389,05	150352,87
2	C	0,05		0,12		0,1115	0,12	0,1158	171,06	184,08	177,57
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5002	0,5061	0,5031	767,28	776,39	771,83
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,3	1,333	1,316	1994,22	2044,43	2019,32
5	Al					0,00801	0,00801	0,00801	12,28	12,28	12,28
6	S	0,035		0,04		0,01659	0,01661	0,0166	25,44	25,48	25,46
7	P	0,015		0,035		0,02662	0,02662	0,02662	40,84	40,84	40,84
8	Mg					0,00212	0,00214	0,00213	3,259	3,275	3,267
9	Ca					0	0	0	0,00373	0,00378	0,00376
10	O					0,0004	0,0004	0,0004	0,6074	0,6085	0,6079

Таблиця 3.12 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,09022	0,09118	0,0907	0,9027	0,9122	0,9075
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				0,06433	0,06526	0,06479	0,6436	0,653	0,6483
4	MnO	10				0,2778	0,2831	0,2805	2,78	2,833	2,806
5	Al2O3	1,5				0,02751	0,02761	0,02756	0,2753	0,2763	0,2758
6	S	0,3				3,102	3,106	3,104	31,04	31,08	31,06
7	P2O5	0,2				0	0	0	0	0	0
8	MgO	3				6,294	6,297	6,296	62,97	63,01	62,99
9	CaO	45				90,13	90,14	90,14	901,8	901,85	901,83
10	O										

Таблиця 3.13 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,07776	0,08129	0,07953	0	0	0
2	C					38,51	38,66	38,59	0,00015	0,00015	0,00015

3	Si					0,05436	0,05762	0,05599	0	0	0
4	Mn					0,8442	0,8564	0,8503	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00607	0,00636	0,00622	0	0	0
7	P					0,00016	0,00017	0,00016	0	0	0
8	Mg					8,624	8,96	8,792	0	0	0
9	Ca					0,07662	0,0806	0,07861	0	0	0
10	O					51,45	51,65	51,55	0,0002	0,0002	0,0002

Таблиця 3.14 – Хімічний склад сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,62	97,68	97,65	150314,92	150393,41	150354,17
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,3792	0,39	0,3846	583,79	600,46	592,12
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,112	1,106	1693,18	1711,68	1702,43
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,8001	0,8372	0,8187	1231,89	1289,13	1260,51
5	Al					0,00874	0,00874	0,00874	13,45	13,45	13,45
6	S	0,01		0,025		0,00707	0,0071	0,00709	10,89	10,93	10,91
7	P	0,015		0,025		0,0222	0,0222	0,0222	34,18	34,18	34,18
8	Mg					0,0015	0,0015	0,0015	2,305	2,309	2,307
9	Ca					0	0	0	0,0032	0,00324	0,00322
10	O					0,00101	0,00102	0,00101	1,557	1,565	1,561

Таблиця 3.15 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,1396	0,1422	0,1409	1,396	1,422	1,409
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				0,7588	0,7637	0,7613	7,588	7,638	7,613
4	MnO	10				0,2004	0,2071	0,2037	2,004	2,071	2,037
5	Al2O3	1,5				0,06597	0,06616	0,06607	0,6598	0,6616	0,6607
6	S	0,3				0,8153	0,8193	0,8173	8,153	8,193	8,173
7	P2O5	0,2				0	0	0	0,00016	0,00017	0,00017
8	MgO	3				6,365	6,365	6,365	63,65	63,66	63,66
9	CaO	45				91,64	91,65	91,65	916,47	916,51	916,49
10	O										

Таблиця 3.16 – Хімічний склад газової фази при легуванні ст. 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,03112	0,03187	0,0315	0	0	0
2	C					41,64	41,65	41,64	0,00038	0,00039	0,00038

3	Si					0,05115	0,05201	0,05158	0	0	0
4	Mn					0,203	0,2088	0,2059	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00157	0,00158	0,00157	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					2,436	2,465	2,451	0	0	0
9	Ca					0,02166	0,02224	0,02195	0	0	0
10	O					55,59	55,6	55,59	0,00051	0,00051	0,00051

Маса шлаку 2 т

Таблиця 3.17 – Хімічний склад сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,44	98,49	98,47	150335,31	150407,33	150371,32
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,1406	0,15	0,1453	214,74	229,13	221,94
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5003	0,5084	0,5043	763,96	776,37	770,16
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,8	0,8326	0,8163	1221,64	1271,53	1246,59
5	Al					0,00895	0,00897	0,00896	13,67	13,7	13,68
6	S	0,035		0,04		0,03247	0,03254	0,0325	49,59	49,69	49,64
7	P	0,015		0,035		0,02226	0,02226	0,02226	34	34	34
8	Mg					0,00024	0,00024	0,00024	0,3636	0,3646	0,3641
9	Ca					0	0	0	0,00041	0,00041	0,00041
10	O					0,00392	0,00396	0,00394	5,993	6,052	6,022

Таблиця 3.18 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,9248	0,9438	0,9343	14,35	14,64	14,5
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				6,189	6,202	6,196	96,02	96,25	96,14
4	MnO	10				1,541	1,58	1,56	23,91	24,51	24,21
5	Al2O3	1,5				0,8799	0,8862	0,8831	13,66	13,75	13,7
6	S	0,3				0,6073	0,6138	0,6105	9,422	9,525	9,474
7	P2O5	0,2				0,00105	0,00109	0,00107	0,01636	0,01695	0,01666
8	MgO	3				6,329	6,332	6,331	98,22	98,24	98,23
9	CaO	45				83,47	83,5	83,48	1295,31	1295,47	1295,39
10	O										

Таблиця 3.19 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,02269	0,02356	0,02312	0	0	0

2	C					42,48	42,49	42,48	0,00052	0,00054	0,00053
3	Si					0,04539	0,04764	0,04652	0	0	0
4	Mn					0,1521	0,1533	0,1527	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00177	0,00182	0,0018	0	0	0
7	P					0,00007	0,00008	0,00007	0	0	0
8	Mg					0,2736	0,28	0,2768	0	0	0
9	Ca					0,00217	0,00224	0,00221	0	0	0
10	O					57,01	57,02	57,01	0,0007	0,00072	0,00071

Таблиця 3.20 – Хімічний склад сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,26	98,32	98,29	150070,76	150137,85	150104,31
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3136	0,3273	0,3205	478,92	499,9	489,41
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5002	0,5181	0,5092	763,84	791,35	777,59
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,8001	0,8296	0,8148	1221,83	1267,06	1244,44
5	Al					0,00843	0,00849	0,00846	12,87	12,96	12,92
6	S	0,035		0,04		0,03295	0,03308	0,03301	50,32	50,51	50,42
7	P	0,015		0,035		0,02181	0,02182	0,02181	33,31	33,31	33,31
8	Mg					0,00022	0,00022	0,00022	0,3295	0,3332	0,3313
9	Ca					0	0	0	0,0004	0,0004	0,0004
10	O					0,00504	0,00513	0,00509	7,703	7,829	7,766

Таблиця 3.21 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,9569	0,9912	0,974	14,62	15,14	14,88
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				8,526	8,581	8,553	130,2	131,08	130,64
4	MnO	10				1,629	1,643	1,636	24,88	25,1	24,99
5	Al2O3	1,5				0,9783	0,9938	0,9861	14,94	15,18	15,06
6	S	0,3				0,5493	0,5613	0,5553	8,389	8,574	8,481
7	P2O5	0,2				0,00137	0,00146	0,00141	0,0209	0,02228	0,02159
8	MgO	3				6,156	6,159	6,157	94,03	94,05	94,04
9	CaO	45				81,12	81,15	81,14	1239,16	1239,32	1239,24
10	O										

Таблиця 3.22 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,01418	0,01455	0,01437	0	0	0

2	C					42,63	42,63	42,63	0,00085	0,00086	0,00086
3	Si					0,02235	0,02244	0,0224	0	0	0
4	Mn					0,09287	0,09447	0,09367	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00102	0,00102	0,00102	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					0,1541	0,1542	0,1542	0	0	0
9	Ca					0,0012	0,00122	0,00121	0	0	0
10	O					57,08	57,09	57,08	0,00114	0,00115	0,00114

Таблиця 3.23 – Хімічний склад сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,97	98,02	97,99	150416,47	150489,85	150453,16
2	C	0,05		0,12		0,1113	0,12	0,1157	170,92	184,25	177,58
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,4999	0,5059	0,5029	767,44	776,72	772,08
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,3	1,333	1,317	1996,15	2046,73	2021,44
5	Al					0,00921	0,00922	0,00921	14,14	14,16	14,15
6	S	0,035				0,03208	0,03213	0,0321	49,25	49,33	49,29
7	P	0,015				0,02667	0,02667	0,02667	40,94	40,94	40,94
8	Mg					0,00025	0,00025	0,00025	0,3909	0,391	0,391
9	Ca					0	0	0	0,00044	0,00044	0,00044
10	O					0,00366	0,00369	0,00367	5,612	5,659	5,636

Таблиця 3.24 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Компоненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,8806	0,8959	0,8883	13,85	14,08	13,97
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				5,185	5,195	5,19	81,52	81,69	81,6
4	MnO	10				2,37	2,4	2,385	37,26	37,74	37,5
5	Al2O3	1,5				0,8035	0,8073	0,8054	12,64	12,69	12,66
6	S	0,3				0,6412	0,6462	0,6437	10,08	10,16	10,12
7	P2O5	0,2				0,00104	0,00107	0,00106	0,0164	0,01689	0,01665
8	MgO	3				6,345	6,347	6,346	99,77	99,78	99,78
9	CaO	45				83,73	83,75	83,74	1316,57	1316,7	1316,64
10	O										

Таблиця 3.25 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,02643	0,02761	0,02702	0	0	0

2	C					42,36	42,38	42,37	0,00045	0,00046	0,00045
3	Si					0,0561	0,05977	0,05793	0	0	0
4	Mn					0,2871	0,2909	0,289	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00212	0,00221	0,00216	0	0	0
7	P					0,00011	0,00011	0,00011	0	0	0
8	Mg					0,3425	0,3535	0,348	0	0	0
9	Ca					0,00275	0,00287	0,00281	0	0	0
10	O					56,9	56,9	56,9	0,0006	0,00062	0,00061

Таблиця 3.26 – Хімічний склад сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,62	97,68	97,65	150404,09	150476,36	150440,23
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,3797	0,39	0,3849	584,98	600,91	592,94
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,112	1,106	1695	1713,36	1704,18
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,7999	0,834	0,8169	1232,24	1284,91	1258,57
5	Al					0,01187	0,01187	0,01187	18,29	18,29	18,29
6	S	0,01		0,025		0,00675	0,00678	0,00677	10,4	10,45	10,43
7	P	0,015		0,025		0,02212	0,02212	0,02212	34,08	34,08	34,08
8	Mg					0,00142	0,00142	0,00142	2,184	2,186	2,185
9	Ca					0	0	0	0,00291	0,00294	0,00292
10	O					0,00106	0,00107	0,00107	1,638	1,647	1,643

Таблиця 3.27 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,1543	0,1571	0,1557	2,212	2,251	2,232
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				0,7429	0,7472	0,745	10,65	10,71	10,68
4	MnO	10				0,2392	0,2463	0,2427	3,427	3,53	3,478
5	Al2O3	1,5				0,0988	0,09915	0,09897	1,416	1,421	1,418
6	S	0,3				0,7981	0,8014	0,7998	11,44	11,49	11,46
7	P2O5	0,2				0	0	0	0,00026	0,00027	0,00026
8	MgO	3				6,625	6,625	6,625	94,93	94,93	94,93
9	CaO	45				91,33	91,34	91,33	1308,78	1308,83	1308,8
10	O										

Таблиця 3.28 – Хімічний склад газової фази при легуванні ст. 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,03048	0,03117	0,03083	0	0	0

2	C					41,72	41,73	41,72	0,00039	0,00039	0,00039
3	Si					0,05117	0,05196	0,05157	0	0	0
4	Mn					0,1986	0,2037	0,2011	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00145	0,00146	0,00145	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					2,259	2,283	2,271	0	0	0
9	Ca					0,01924	0,01972	0,01948	0	0	0
10	O					55,7	55,71	55,7	0,00052	0,00053	0,00052

Маса шлаку 3 т

Таблиця 3.29 – Хімічний склад сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,44	98,49	98,47	150421,19	150487,01	150454,1
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,141	0,1499	0,1455	215,47	229,11	222,29
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5	0,508	0,504	764	776,22	770,11
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,8002	0,8299	0,815	1222,68	1268,03	1245,35
5	Al					0,01256	0,01259	0,01257	19,19	19,23	19,21
6	S	0,035		0,04		0,03036	0,03045	0,03041	46,39	46,53	46,46
7	P	0,015		0,035		0,02227	0,02227	0,02227	34,03	34,03	34,03
8	Mg					0,0003	0,0003	0,0003	0,4509	0,4521	0,4515
9	Ca					0	0	0	0,00052	0,00053	0,00052
10	O					0,00318	0,0032	0,00319	4,853	4,897	4,875

Таблиця 3.30 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,745	0,7595	0,7522	16,59	16,91	16,75
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				4,245	4,257	4,251	94,52	94,81	94,67
4	MnO	10				1,176	1,202	1,189	26,19	26,78	26,49
5	Al2O3	1,5				0,8945	0,9004	0,8975	19,92	20,05	19,99
6	S	0,3				0,6963	0,7025	0,6994	15,51	15,65	15,58
7	P2O5	0,2				0,00063	0,00066	0,00064	0,01411	0,01459	0,01435
8	MgO	3				6,249	6,25	6,25	139,17	139,18	139,17
9	CaO	45				85,95	85,97	85,96	1914,21	1914,38	1914,3
10	O										

Таблиця 3.31 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 12MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.

1	Fe					0,02537	0,02629	0,02583	0	0	0
2	C					42,44	42,45	42,44	0,00047	0,00048	0,00048
3	Si					0,04549	0,04758	0,04654	0	0	0
4	Mn					0,1699	0,1708	0,1703	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00195	0,00201	0,00198	0	0	0
7	P					0,00007	0,00008	0,00007	0	0	0
8	Mg					0,3812	0,3897	0,3854	0	0	0
9	Ca					0,00318	0,00329	0,00323	0	0	0
10	O					56,92	56,92	56,92	0,00063	0,00064	0,00064

Таблиця 3.32 – Хімічний склад сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,28	98,34	98,31	150210,72	150273,05	150241,88
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,2933	0,3059	0,2996	448,24	467,51	457,87
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5	0,5163	0,5081	764,12	789,04	776,58
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,7998	0,8272	0,8135	1222,26	1264,32	1243,29
5	Al					0,00997	0,01006	0,01001	15,24	15,38	15,31
6	S	0,035		0,04		0,03305	0,0332	0,03312	50,51	50,73	50,62
7	P	0,015		0,035		0,02196	0,02196	0,02196	33,56	33,56	33,56
8	Mg					0,00019	0,0002	0,00019	0,2959	0,2991	0,2975
9	Ca					0	0	0	0,00037	0,00037	0,00037
10	O					0,00538	0,00547	0,00543	8,23	8,356	8,293

Таблиця 3.33 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,9861	1,019	1,003	22,14	22,87	22,51
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				9,85	9,896	9,873	221,13	222,2	221,66
4	MnO	10				1,683	1,697	1,69	37,79	38,1	37,95
5	Al2O3	1,5				1,257	1,272	1,264	28,21	28,56	28,39
6	S	0,3				0,4963	0,506	0,5012	11,14	11,36	11,25
7	P2O5	0,2				0,00159	0,00169	0,00164	0,03574	0,03794	0,03684
8	MgO	3				5,819	5,821	5,82	130,66	130,67	130,66
9	CaO	45				79,84	79,86	79,85	1792,56	1792,71	1792,64
10	O										

Таблиця 3.34 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 30MnSi4-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.

1	Fe					0,01415	0,0145	0,01432	0	0	0
2	C					42,62	42,63	42,63	0,00085	0,00086	0,00086
3	Si					0,02365	0,02381	0,02373	0	0	0
4	Mn					0,09266	0,09408	0,09337	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00101	0,00101	0,00101	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					0,1378	0,1378	0,1378	0	0	0
9	Ca					0,00111	0,00112	0,00111	0	0	0
10	O					57,1	57,1	57,1	0,00114	0,00115	0,00115

Таблиця 3.35 – Хімічний склад сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,97	98,01	97,99	150530,31	150604,82	150567,56
2	C	0,05		0,12		0,1111	0,12	0,1156	170,77	184,38	177,58
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,5001	0,5062	0,5032	768,41	777,86	773,14
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,3	1,333	1,317	1997,63	2048,75	2023,19
5	Al					0,00965	0,00968	0,00966	14,82	14,87	14,84
6	S	0,035				0,03361	0,03367	0,03364	51,64	51,74	51,69
7	P	0,015				0,0268	0,0268	0,0268	41,17	41,18	41,17
8	Mg					0,00017	0,00017	0,00017	0,2678	0,2681	0,2679
9	Ca					0	0	0	0,00031	0,00032	0,00031
10	O					0,00515	0,0052	0,00517	7,915	7,986	7,95

Таблиця 3.36 – Хімічний склад шлаку при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Компо-ненти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				1,096	1,115	1,105	25,46	25,92	25,69
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				9,871	9,878	9,875	229,38	229,59	229,49
4	MnO	10				3,08	3,117	3,099	71,58	72,46	72,02
5	Al2O3	1,5				1,29	1,295	1,292	29,97	30,09	30,03
6	S	0,3				0,458	0,462	0,46	10,64	10,74	10,69
7	P2O5	0,2				0,00216	0,00223	0,00219	0,05013	0,05172	0,05092
8	MgO	3				5,72	5,721	5,721	132,94	132,95	132,95
9	CaO	45				78,44	78,46	78,45	1822,97	1823,11	1823,04
10	O										

Таблиця 3.37 – Хімічний склад газової фази при легуванні сталі 9MnSi6-3

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.

1	Fe					0,02226	0,02326	0,02276	0	0	0
2	C					42,41	42,43	42,42	0,00053	0,00055	0,00054
3	Si					0,05591	0,05965	0,05778	0	0	0
4	Mn					0,2418	0,245	0,2434	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00172	0,0018	0,00176	0	0	0
7	P					0,0001	0,00011	0,00011	0	0	0
8	Mg					0,1956	0,2018	0,1987	0	0	0
9	Ca					0,00159	0,00166	0,00162	0	0	0
10	O					57,05	57,05	57,05	0,00071	0,00073	0,00072

Таблиця 3.38 – Хімічний склад сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,62	97,67	97,65	150490,86	150556,89	150523,88
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,3801	0,3899	0,385	585,94	601,11	593,53
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,111	1,105	1694,98	1713,18	1704,08
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,8002	0,8313	0,8158	1233,5	1281,58	1257,54
5	Al					0,01678	0,01678	0,01678	25,87	25,87	25,87
6	S	0,01		0,025		0,00567	0,0057	0,00569	8,742	8,792	8,767
7	P	0,015		0,025		0,02212	0,02213	0,02213	34,11	34,11	34,11
8	Mg					0,0016	0,0016	0,0016	2,468	2,47	2,469
9	Ca					0	0	0	0,00339	0,00342	0,0034
10	O					0,00094	0,00094	0,00094	1,445	1,453	1,449

Таблиця 3.39 – Хімічний склад шлаку сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Компо-ненты	Поч., %	Задано, %			Кінцевий (оксид.), %			Кінцевий (оксид.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,1324	0,1347	0,1335	2,783	2,831	2,807
2	C					0	0	0	0	0	0
3	SiO2	20				0,5755	0,5786	0,5771	12,1	12,17	12,13
4	MnO	10				0,2018	0,2071	0,2044	4,242	4,353	4,298
5	Al2O3	1,5				0,1128	0,1132	0,113	2,371	2,38	2,375
6	S	0,3				0,762	0,7643	0,7632	16,02	16,07	16,04
7	P2O5	0,2				0	0	0	0,00027	0,00028	0,00027
8	MgO	3				6,447	6,447	6,447	135,54	135,54	135,54
9	CaO	45				91,76	91,77	91,76	1929,17	1929,22	1929,2
10	O										

Таблиця 3.40 – Хімічний склад газової фази при легуванні ст. 35CrSiMn5-5-4

№	Ел-ти	Поч., %	Задано, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.

1	Fe					0,03261	0,0333	0,03295	0	0	0
2	C					41,51	41,52	41,51	0,00013	0,00014	0,00013
3	Si					0,05085	0,05156	0,05121	0	0	0
4	Mn					0,2123	0,2172	0,2148	0	0	0
5	Al					0	0	0	0	0	0
6	S					0,00137	0,00138	0,00137	0	0	0
7	P					0	0	0	0	0	0
8	Mg					2,733	2,759	2,746	0	0	0
9	Ca					0,02405	0,0246	0,02432	0	0	0
10	O					55,41	55,42	55,42	0,00018	0,00018	0,00018

3.5 Висновки

1. Програмний комплекс «Excalibur» дає можливість здійснювати термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ», аналізувати вміст хімічних елементів та їх сполук у металі, шлаку і газовій фазі, а також досліджувати шлакову фазу за різних технологічних умов.

2. Побудовано графічні залежності, які детально відображають процеси, що відбуваються в печі-ковші під час виконання ВЕЛР. У перспективі ці дані можуть стати основою для оптимізації технологічних процесів ВЕЛР на металургійних підприємствах.

3. Отримано відповіді на ключові питання, пов’язані із легуванням сталі лужноземельними металами в рамках технології ВЕЛР.

4. При збільшенні питомого заряду шлаку формується газова фаза, до якої переходять такі корисні елементи, як кальцій та магній. Для утримання цих лужноземельних елементів у металі необхідно створити додатковий зовнішній тиск.

5. Процес ВЕЛР дає змогу використовувати металургійні шлаки з метою підвищення економічної ефективності легування та модифікування. Зі збільшенням маси шлаку зростає кількість корисних елементів, що переходять у метал, водночас зменшується потреба у феросплавах та інших матеріалах для легування, що сприяє скороченню загальних витрат на виробництво.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища киснево-конверторного цеху

Під час проведення киснево-конверторного процесу спостерігається вплив низки шкідливих виробничих факторів. Серед них: виділення тепла від технологічного обладнання, розплавленого металу і шлаку; гази, які утворюються під час продувки конвертора, роботи газових пальників в котлах-утилізаторах, сушіння футеровки відремонтованих конверторів і сталерозливних ковшів; пил, що генерується при транспортуванні сипких матеріалів, здійсненні процесу продувки конвертора, сливі чавуну з ковша, випуску сталі і шлаку, ломці та ремонті футеровки; шум від роботи вентиляційних систем в приміщеннях; вібрація від масивних конструкцій та вплив електричного струму і іонізуючого випромінювання.

Випромінювання тепла. До основних джерел теплових виділень належать кожух і розжарена горловина конвертора, відхідні гази, а також розплавлений чавун, рідка сталь і шлак. У місцях розливу металу температура довкілля може сягати 45-50 °С у літній час навіть на відстані кількох метрів від джерел тепловипромінювання. Тепловий вплив залежить від таких чинників, як довжина хвилі випромінювання, його інтенсивність, площа опромінюваної ділянки тіла, тривалість та кут падіння променів. Радіаційне тепло здатне проникати на певну глибину в тканини організму, викликаючи теплові реакції навіть за невисокої інтенсивності опромінення. Довготривалий вплив теплових хвиль може спричинити перегрівання організму, порушення терморегуляції, судоми, теплову гіпотермію або фізичне перевантаження. У цих випадках спостерігаються симптоми, такі як головний біль, шум у вухах, спотворення сприйняття кольорів чи навіть блювота.

Виробничий пил. Інший вагомий фактор – виробничий пил. Пил із конверторів має щільність близько 4,3 г/см³ і може змінювати свої фізико-

хімічні властивості, залежно від складу чавуну, присадок та параметрів технологічного процесу. Частинки пилу до 5 мкм становлять близько 80%, вони довго залишаються суспензійними і здатні проникати в організм через дихальні шляхи, накопичуючись у легенях та викликаючи професійні захворювання, серед яких найпоширенішими є пневмоконіоз.

Шум. Джерелами шуму на виробництві є працюючі конвертери, технологічне обладнання (крани, насоси та навантажувачі), а також сопла фурм для продування киснем із надзвуковою швидкістю. Чутливість людського слуху охоплює звукові хвилі з діапазоном частоти від 16 до 20 000 Гц. Надмірний рівень шуму може спричиняти больові відчуття. Діючі нормативи передбачають гранично допустимий рівень шуму для оператора поста управління у межах 80 дБА. Реальний рівень шуму в цехах зазвичай відповідає цим стандартам і становить близько 77 дБ.

Загазованість. Гази, які є конденсаційними аерозолями з твердою дисперсною фазою, становлять одне з головних джерел забруднення повітряного середовища робочих ділянок. Основним джерелом газових викидів у цьому випадку є конвертер. Порушення газодинамічних параметрів процесів, що спричиняє вибивання полум'я, або виділення газів під час випуску та позапічної обробки сталі на установках типу піч-ківш супроводжуються значними викидами газів із робочого простору конвертера. Інколи витік газів може бути пов’язаний із порушенням цілісності газових комунікацій.

Повітря у конвертерному відділенні конвертерного цеху, відповідно до карти умов праці, насичене такими речовинами, як оксид вуглецю, діоксид азоту, сірчистий ангідрид і хромовий ангідрид. Концентрація цих газів у повітрі неодноразово перевищує гранично допустимі норми, іноді навіть у декілька разів.

Найбільш небезпечним серед цих газів є оксид вуглецю. Він утворюється через неповне згорання палива та під час фізико-хімічних реакцій у процесі плавки чи при випуску сталі з печі. Зокрема, це стається

через окислення струменя металу при наповненні виливниць, додавання спеціальних агентів-окисників для інтенсифікації кипіння металу, що супроводжується інтенсивним виділенням оксиду вуглецю.

Дуже шкідливим є також потрапляння в повітря сірчистого ангідриду та діоксиду азоту, які формуються у робочому просторі конвертера. Як і пил, ці гази проникають в організм працівників, особливо операторів постів управління, через органи дихання. Їхній вплив на організм людини різниться залежно від характеру фізіологічної дії. Сірчистий ангідрид має дратівливу дію на організм людини, пошкоджуючи тканини дихальних шляхів і подразнюючи слизові оболонки.

Діоксид азоту погіршує стан через зменшення об'ємної частки кисню, необхідного для нормального дихання (частка кисню у повітрі робочої зони повинна бути не менш ніж 19%).

Оксид вуглецю своєю чергою хімічно зв’язується з гемоглобіном крові, ще більше знижуючи доступність кисню у вдихуваному повітрі. Така взаємодія шкідливих газів із людським організмом створює серйозну загрозу для здоров’я працівників і потребує невідкладних заходів із контролю та мінімізації забруднення повітряного середовища на промислових об’єктах.

4.2 Заходи пожежної безпеки

Особливістю конвертерних цехів є підвищений ризик виникнення пожежі, що може бути спричинений потраплянням рідкого шлаку на горючі матеріали під час нахилу шлакової чаші.

Конвертерні печі відзначаються значним споживанням кисню, який подається до цеху через зовнішні мережі. Зазвичай кисень надходить до киснево-розширювального пункту під тиском 3,5 МПа, тоді як у сам цех він постачається з тиском 1,6 МПа.

Ділянки газоочищення технологічних газів у конвертерах є зонами підвищеної вибухо- та пожежонебезпеки. З метою запобігання поширенню пожежі дотримуються протипожежних розривів між будівлями та

установками, встановлюють системи автоматичного пожежогасіння, а також регулярно здійснюють контроль за дотриманням протипожежних заходів. Перевіряють наявність та справність протипожежного інвентарю і первинних засобів пожежогасіння.

Будівля оснащена засобами для забезпечення швидкої та безпечної евакуації людей у разі виникнення пожежі. Допустима тривалість евакуації визначається часом досягнення критичних умов для людини, як от критична температура (60 °С), зниження концентрації кисню та погіршення видимості через задимлення. Довжина шляхів евакуації, а саме відстань від найвіддаленішого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу в електропічному корпусі (категорія В, II-IIа), не перевищує 100 метрів, що відповідає вимогам протипожежної безпеки.

У конвертерному цеху відповідно до нормативних вимог наявні первинні засоби пожежогасіння, зокрема: вогнегасники (ОХП-10, ОУ-5, ОУ-8, ОУ-25), пожежний інвентар (покривала із негорючих матеріалів, таких як теплоізоляційне полотно, грубошерстна тканина або повсть; ящики з піском; совкові лопати), а також пожежний інструмент (багри, ломи, сокири тощо).

4.3 Заходи з електробезпеки

У конвертерному цеху через велику кількість металоконструкцій, розташування електроустаткування на різній висоті, високу температуру навколишнього середовища та присутність металізованого пилу і газів до обладнання та експлуатації електроустановок і електромереж висуваються підвищені вимоги. Основне завдання технічного персоналу полягає в організації безпечної роботи електроустановок.

Передача і розподіл електричної енергії в межах відділень здійснюється через кабелі, дроти або шини. Кабелі укладаються в спеціальних каналах, тунелях чи трубах, а також прокладаються відкрито уздовж стін, по перехідних містках на рівні кроквяних ферм або вздовж підкранових шляхів. Сталеві труби з кабелями та проводами монтуються як

відкрито (по стінах і колонах), так і приховано (у перекриттях, стінах або фундаментах). У місцях можливого зіткнення струмопровідні частини захищаються металевими сітками.

Електроустаткування в цеху представлене різними видами. До нього належать електродвигуни змінного струму, електрофільтри та інше обладнання з напругою понад 1000 В, а також електродвигуни, апаратура управління, електроустаткування кранів та внутрішньоцехові електромережі напругою до 1000 В.

Усі струмопровідні елементи електричних машин, апаратури управління, а також струмопідводи до них мають захист у вигляді спеціальних кожухів для запобігання випадковим дотикам. Через значне виділення пилу в робочому просторі всі електродвигуни закритого типу обладнані щільно прилеглими захисними кришками.

Для запобігання механічним ушкодженням дроти на кранах прокладені у сталевих трубах. Пускорегулююча апаратура розміщується у спеціально відгороджених від машиніста місцях або встановлюється у шафах, що виключає можливість випадкового контакту зі струмопровідними частинами.

Внутрішньоцехова електрична мережа виконується на основі кабелів або ізольованих проводів. Для спусків від магістральних ліній застосовуються ізольовані дроти, поміщені у металеві труби. Кабелі прокладаються в каналах, розташованих у підлозі, які зверху закриваються знімними покриттями із вогнетривких матеріалів. Глибина кабельних каналів становить від 40 до 60 см. Відстань між силовими кабелями, що проходять в каналах, має бути щонайменше 35 мм або не менше діаметра самого кабелю. У разі одночасного прокладання кабелів із напругою до 1000 В і понад 1000 В відстань між ними збільшується до 250 мм. Прокладання кабелів у каналах чи тунелях, де розташовуються газопроводи, заборонене.

Щоб запобігти ураженню працівників електричним струмом, усі струмонепровідні металеві елементи електроустановок та іншого обладнання оснащуються заземлюючими пристроями.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У процесі вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР) збільшення як позитивного, так і негативного питомого заряду шлаку призводить до утворення газової фази, об’єм виділення якої залежить від зовнішнього тиску.

2. За умови звичайного атмосферного тиску значна частина кальцію з шлаку під час ВЕЛР переходить у газову фазу, що обмежує його вміст у сталі до рівня не більше 0,04%. При досягненні питомого заряду шлаку 0,8 F/моль відбувається перерозподіл молекулярного складу газу, зменшується вміст газів CO та CO_2 і істотно зростає вміст лужноземельних металів (магнію і кальцію).

3. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа та збільшення питомого заряду шлаку до $q \geq 1$ F/моль суттєво підвищує ефективність легування сталі лужноземельними металами. Це дає змогу збільшити вміст кальцію та магнію до 0,35% і 0,04%, відповідно, завдяки зменшенню втрат цих елементів у газовій фазі.

4. Технологія ВЕЛР забезпечує можливість використовувати металургійні шлаки для легування сталі лужноземельними металами, що дозволяє уникнути необхідності використання коштовного порошкового дроту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Термодинамічне моделювання системи метал-шлак-газ з урахуванням тепла хімічних реакцій. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. №8. С. 40-43.

2. Lupis C. H. P. Chemical Thermodynamics of Materials. Prentice Hall, 1993. 602 p. ISBN-13 978-0444007797.

3. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу. *Метал та лиття України*. 2005. № 6. С. 13-17.

4. Загальна металургія: підручник для вишів / В. Г. Воскобойніков, В. А. Кудрін, А. М. Якушев. 6-те вид., перероб. та дод. Київ: Академкнига, 2002. 768 с.

5. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу: навч. посібник для студ. ЗДІА спец. 6.050401 "МЧМ" ден. та заоч. форм навчання: навч. посібник / С. О. Воденніков, О. В. Харченко, Н. В. Лічконенко, Г. А. Громак; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 108 с.

6. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу: навч. посібник / Зборщик О.М. Донецьк : ДонНТУ, 2001. 154 с.

7. Дакуорт У. Е., Хойл Дж. Електрошлаковий переплав. Київ : Металургія, 1973. 192 с.

8. Пономаренко О. Г. Питання термодинаміки фаз змінного складу, що мають колективну електронну систему. *Журнал фізичної хімії*. 1974. Т.48. №7. С. 668-674; № 8. С. 950-958.

9. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Експериментальні засади термодинамічної моделі колективізованих електронів. *Зб. наукових праць ДонНТУ Серія: Металургія*. Вип. 66. 2003. С. 17-24.

10. Храпко С. А. Термодинаміка та кінетика взаємодії фаз при позапечній обробці. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2002. № 10. С. 121-123.

11. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Корзун Є. Л. Термодинамічна модель багатокомпонентної конденсованої фази. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. № 8. С. 135-139.

12. Старосоцький А. В., Бабичов І. В., Дерев'янченко Р. Т. Створення системи автоматичного ведення плавки в ДСП як перший крок розгортання інтелектуальних систем управління у сталеплавильному виробництві. *Праці 6-го конгресу сталеплавильників*. Київ : Черметінформація, 2001. С. 300-308.

13. Синяков Р. В., Гуляєв М. П., Мартинов Р. Н. та ін. Промислове освоєння системи управління позапічною обробкою сталі (піч-ківш - вакууматор) ГІББС на БМЗ. *Метал і лиття України*. 2005. № 3-4. С. 98-100.

14. Харченко О. В., Гогенко Д. В., Борщов О. В., Аксененко В. А. Оптимізація параметрів розкислення киплячої та напівспокійної сталі за допомогою апаратно-програмного комплексу «Майстер». *Праці 9-го конгресу сталеплавильників, 17-19 жовтня 2006 р.*, Київ : Черметінформація, 2007. С. 367-371.

15. Харченко О. В., Синяков Р. В. Вторинне електротермічне легування і рафінування сталі. *Збірник наукових праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 11.04.2017*, Київ : КПІ, 2017. С. 1208-1218.

16. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Довгонюк С. В. Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах управління плавкою та позапічною обробкою сталі. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2002. № 10. С. 131-137.

17. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Вторинне легування та рафінування сталі в установках піч-ківш. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2012. Вип. 1(26). С. 17-21.

18. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Храпко С. А., Іноземцева Є. Н. Розробка інформаційно-технологічної системи «Форвард» для управління металургійними процесами в реальному масштабі часу. *Вісті вузів. Чорна металургія*. 1991. №12. С. 89-91.

19. Храпко С. А., Іноземцева Є. Н., Харченко О. В. Термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ» та інтегрована система «Оракул»: використання для прогнозних розрахунків та керування у складі АСУТП та розробки сталеплавильних процесів. *Тез. доп. конф. «Моделювання фізико-хімічних систем та технологічних процесів у металургії»*. Київ : Наукова думка, 1991. С. 222-223.

20. Харченко О. В., Лаптев Д. А., Башлій С. В. Експериментальні дослідження технології вторинного електротермічного легування та рафінування. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*, 2014. Вип. 1(31). С. 30-35.

21. Харченко О. В., Кириченко О. Г., Белоконь Ю. О. Термодинаміка і кінетика процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*, 2015. Вип. 1(33). С. 8-12.

22. Харченко О. В., Личконенко Н. В. Вторинне електротермічне легування та рафінування металу за участю газової фази. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. Вип. 1(35), 2016. С. 9-13..

23. Харченко О. В., Синяков Р. В., Личконенко Н. В. Вторинне електротермічне легування та рафінування низьколегованої. *Метал та лиття України*. Том 27. 2019. №10-12. С. 56-63.

24. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Про кінетику міжфазного масопереносу в металургійних агрегатах. *Метал та лиття України*. 2002. №12. С. 41-42.

25. Харченко О. В. Оптимізація позапічної обробки та легування стали на основі вирішення зворотного завдання термодинамічного аналізу. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. №8 (228). С. 115-120.

26. Харченко О. В., Синяков Р. В. Термодинамічна модель багато-компонентної рідкої шлакової фази. *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. Вип. 2(36), 2016. С. 16-22.

27. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Можливості та перспективи використання програми «EXCALIBUR» у навчальному процесі. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*, 2013. Вип. 1(29). С. 7-12.

28. ГОСТ 19281 - 2014. Прокат підвищеної міцності. Загальні технічні умови. Затверджено та введено в дію Наказом Агентства з технічного регулювання та метрології від 24 жовтня 2014 р. № 1430-ст. 46 с.

29. ГОСТ 977 - 88. Виливки сталеві. Загальні технічні умови. Затверджено та введено в дію Постановою Державного комітету за стандартами від 22.12.88 № 4458. 1988. 36 с.

30. ГОСТ 4543 - 71. Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. Затверджено та введено в дію Наказом Агентства з технічного регулювання та метрології від 24 жовтня 18.06.71 № 1148. 46 с.

ДОДАТОК А

У додатку наведені основні хімічні, фізичні та термодинамічні показники легування сталей 12MnSi4-3, 9MnSi6-3, 30MnSi4-3, 35CrSiMn5-5-4 за умов підвищеного зовнішнього тиску (2 атм) і кількості шлаку 1, 2 і 3 тонни.

Маса шлаку 1 т

Таблиця А.1 – Основні показники легування сталі 12MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,2	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,6
9	Маса шлаку початкова	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т	0,9998	1	1
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	57,5	57,9	57,7
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3			0
17	Маса матеріалів факт	т			2,814
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			12506,68

Таблиця А.2 – Матеріали для легування сталі 12MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,532	1,532	1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	0,882	0,882	1,5					
4	АВ-87			0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,142	0,142	0,1					
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно	0,158	0,158						
10	Е/е МВтг	2,704	2,704	0,25			7		

Таблиця А.3 – Основні показники легування сталі 9MnSi6-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,1	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,4
9	Маса шлаку початкова	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т	1	1,001	1
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	1480	1500	1490
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3			0
17	Маса матеріалів факт	т			3,72
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			18070,83

Таблиця А.4 – Матеріали для легування сталі 9MnSi6-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,447	1,447	1					
2	SiMn	1,343	1,343	2,2					
3	FeSi65	0,7	0,7	1					
4	АВ-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно	0,13	0,13				2		
10	Е/е МВтг	3,283	3,283	1			5		

Таблиця А.5 – Основні показники легування сталі 30MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°C			
3	Температура початкова	°C			1600
4	Температура задана	°C	1600		
5	Температура кінцева	°C	1600	1601,6	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,6
9	Маса шлаку початкова	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			1
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	42,8	43,6	43,2
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,0001523	0,0001557	0,000154
17	Маса матеріалів факт	т			2,802
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			10988,37

Таблиця А.6 – Матеріали для легування сталі 30MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,535	1,535	2					
2	SiMn								
3	FeSi65			1,5					
4	АВ-87			0,1					
5	Коксик			0,2					
6	Карбід Si	0,971	0,971						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно	0,196	0,196						
10	Е/е МВтг	3,075	3,075	1			5		

Таблиця А.7 – Основні показники легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,3	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154
9	Маса шлаку початкова	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			1
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	128	129	129
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3			0
17	Маса матеріалів факт	т			4,236
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			18048,06

Таблиця А.8 – Матеріали для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,388	1,388	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	2,038	2,038	2,5					
4	АВ-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,465	0,465						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно	0,245	0,245						
10	Е/е МВтг	2,844	2,844	1			5		

Маса шлаку 2 т

Таблиця А.9 – Основні показники легування сталі 12MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°C			
3	Температура початкова	°C			1600
4	Температура задана	°C	1600		
5	Температура кінцева	°C	1600	1601,1	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,7
9	Маса шлаку початкова	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т	1,551	1,552	1,552
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			14,5
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,0001033	0,0001104	0,0001069
17	Маса матеріалів факт	т			2,454
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			11874,11

Таблиця А.10 – Матеріали для легування сталі 12MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,435	1,435	1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	0,755	0,755	1,5					
4	АВ-87			0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,164	0,164	0,1					
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	3,431	3,431	0,25			5		

Таблиця А.11 – Основні показники легування сталі 9MnSi6-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,1	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,5
9	Маса шлаку початкова	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т			1,572
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	17,3	17,4	17,4
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,00006396	0,00006967	0,000067
17	Маса матеріалів факт	т			3,406
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			17420,49

Таблиця А.12 – Матеріали для легування сталі 9MnSi6-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,481	1,481	1					
2	SiMn	1,194	1,194	2,2					
3	FeSi65	0,631	0,631	1					
4	АВ-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно						2		
10	Е/е МВтг	3,92	3,92	1			5		

Таблиця А.13 – Основні показники легування сталі 30MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,4	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,7
9	Маса шлаку початкова	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т	1,527	1,528	1,528
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			10,2
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,0004331	0,0004406	0,0004369
17	Маса матеріалів факт	т			2,432
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			10557,72

Таблиця А.14 – Матеріали для легування сталі 30MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,44	1,44	2					
2	SiMn								
3	FeSi65			1,5					
4	АВ-87			0,1					
5	Коксик			0,2					
6	Карбід Si	0,892	0,892						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	3,618	3,618	1			5		

Таблиця А.15 Основні показники легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°C			
3	Температура початкова	°C			1600
4	Температура задана	°C	1600		
5	Температура кінцева	°C	1600	1601,3	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154,1
9	Маса шлаку початкова	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т			1,433
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	131	132	132
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3			0
17	Маса матеріалів факт	т			3,739
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			17269,14

Таблиця А.16 – Матеріали для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,279	1,279	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,869	1,869	2,5					
4	АВ-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,491	0,491						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	3,803	3,803	1			5		

Маса шлаку 3 тонни

Таблиця А.17 – Основні показники легування сталі 12MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°C			
3	Температура початкова	°C			1600
4	Температура задана	°C	1600		
5	Температура кінцева	°C	1600	1601	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,8
9	Маса шлаку початкова	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			2,227
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			21,7
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,00007476	0,00007965	0,000077
17	Маса матеріалів факт	т			2,194
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			11237,78

Таблиця А.18 – Матеріали для легування сталі 12MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,328	1,328	1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	0,578	0,578	1,5					
4	АВ-87			0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,188	0,188	0,1					
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	4,564	4,564	0,25			5		

Таблиця А.19 – Основні показники легування сталі 9MnSi6-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,1	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,7
9	Маса шлаку початкова	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			2,324
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	8,52	8,53	8,53
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,0001057	0,0001153	0,0001105
17	Маса матеріалів факт	т			3,268
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			17000,61

Таблиця А.20 – Матеріали для легування сталі 9MnSi6-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,512	1,512	1					
2	SiMn	1,053	1,053	2,2					
3	FeSi65	0,603	0,603	1					
4	АВ-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно						2		
10	Е/е МВтг	4,5	4,5	1			5		

Таблиця А.21 – Основні показники легування сталі 30MnSi4-3

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°С			
3	Температура початкова	°С			1600
4	Температура задана	°С	1600		
5	Температура кінцева	°С	1600	1601,3	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			152,8
9	Маса шлаку початкова	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			2,245
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	8,66	8,7	8,68
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,0004364	0,000445	0,000441
17	Маса матеріалів факт	т			2,243
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			10244,82

Таблиця А.22 – Матеріали для легування сталі 30MnSi4-3

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,341	1,341	2					
2	SiMn								
3	FeSi65			1,5					
4	АВ-87			0,1					
5	Коксик			0,2					
6	Карбід Si	0,802	0,802						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	4,35	4,35	1			5		

Таблиця А.23 – Основні показники легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Показник	Од.вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	атм			2
2	Температура навк. серед.	°C			
3	Температура початкова	°C			1600
4	Температура задана	°C	1600		
5	Температура кінцева	°C	1600	1601,2	1601
6	Маса металу початкова	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т	154,1	154,2	154,2
9	Маса шлаку початкова	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т	1		
11	Маса шлаку кінцева	т			2,102
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	170	171	171
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			0
16	Об'єм газу кінцевий	м3			0
17	Маса матеріалів факт	т			3,479
18	Вартість матеріалів факт	у.о.			16634,61

Таблиця А.24 – Матеріали для легування сталі 35CrSiMn5-5-4

№	Матеріал	Факт, т	Оптим,т	Реком,т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс,%
1	FeMn78	1,171	1,171	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,692	1,692	2,5					
4	АВ-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,516	0,516						
7	Сіншлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтг	4,943	4,943	1			5		