

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Металургії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Модифікування сталі мурноземельними
металами з використанням технології ВЕЛР

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1369-МЧМ
спеціальності 136 металургія
(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми металургія горючих металів
(назва освітньої програми)

В.О. Зайченко

(ініціали та прізвище)

Керівник доц. К.Т.Н. Карпенко Т.В.

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

Рецензент доц.кадр.мет., доц. К.Т.Н. Волгар Р.М.

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

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____

Кафедра металургії _____

Рівень вищої освіти другий (магістерський) _____

Спеціальність 136 металургіє _____
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

Освітня програма металургіє чорних металів _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри [Підпис]
« 01 » вересня 2020 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Заїченко Володимир Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Модифікування сталі мунькоземельними металами з використанням технології ВЕР

керівник роботи Карпенко Жанна Володимирівна, доц., к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «25» травня 2020 року № 596-С

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 року

3 Вихідні дані до роботи Науково-технічна література, хімічний склад сталей марок: 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Розділ 1. Аналіз термодинамічних та фізико-хімічних основ модифікування сталі мунькоземельними металами. Розділ 2. Дослідження процесу модифікування сталі за допомогою ВЕР. Висновки

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Розділ 1, Розділ 2, 42 рисунків, 11 креслень

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Розділ	Карпенко Т.В. доц., к.т.н.	<i>Т.В.</i>	<i>Т.В.</i>
2 Розділ	Карпенко Т.В. доц., к.т.н.	<i>Т.В.</i>	<i>Т.В.</i>

7 Дата видачі завдання 01.09.2020

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний огляд з'явленої роботи	01.09.20 - 15.09.20	
2.	Методика проведення дослідження	18.09.20 - 02.10.20	
3.	Дослідження процесу модифікування сталі ниткоземельними металами	04.10.20 - 16.10.20	
4.	Обробка графічного матеріалу	20.10.20 - 10.11.20	
5.	Висновки	12.11.20 - 15.11.20	
6.	Підготовка графічного матеріалу	17.11.20 - 29.11.20	

Студент *Т.В.* (підпис) В.О. Зайченко (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) *Т.В.* (підпис) Т.В. Карпенко (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *Р.М.* (підпис) Р.М. Волея (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Zaichenko V.O. Модифікування сталі лужноземельними металами з використанням технології ВЕЛР.

Кваліфікаційна робота здобувача ступеня вищої освіти «магістр» зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-професійною програмою «Металургія чорних металів», науковий керівник доц., к.т.н. Г. В. Карпенко. Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, кафедра Металургії, 2020.

Виконано дослідження можливості модифікування лужноземельними металами сталей 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА із застосуванням технології вторинного електротермічного легування і рафінування сталі (ВЕЛР). Розглянуті особливості поведінки лужноземельних металів в залежності від зміни питомого заряду шлаку. Обґрунтовано практичне значення теми роботи для використання в металургійній промисловості.

Ключові слова: КРИВА ЕЛЕКТРОНЕЙТРАЛЬНОСТІ, СТАЛЬ, ШЛАК, ЗАРЯД, ЛЕГУВАННЯ, ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ, МОДИФІКУВАННЯ, РАФІНУВАННЯ.

ABSTRACT

Zaichenko V.O. Modification of steel with alkaline earth metals using SEAR technology.

Qualification work for the degree of higher education "Master" in the specialty 136 "Metallurgy" in the educational and professional program "Metallurgy of ferrous metals", scientific adviser G.V. Karpenko. Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhia National University, Department of Metallurgy, 2020.

The analysis modification of alkaline earth metals of steels 12GS, 30GS 09G2S, 35HGSA with application of technology of secondary electrothermal alloying and refining of steel (SEAR) is accomplished. Peculiarities of the behavior of alkaline earth metals depending on the specific charge of slag are

considered. The practical significance of the topic of work for use in the metallurgical industry is substantiated.

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

АННОТАЦИЯ

Заиченко В.А. Модифицирование стали щелочноземельными металлами с использованием технологии ВЕЛР.

Квалификационная работа получателя степени высшего образования «магистр» по специальности 136 «Металлургия» по образовательной профессиональной программе «Металлургия черных металлов», научный руководитель доц., к.т.н. А. В. Карпенко. Инженерный учебно-научный институт Запорожского национального университета, кафедра Metallургии, 2020.

Выполнено исследование возможности модифицирования щелочноземельными металлами сталей 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА с применением технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования стали (ВЕЛР). Рассмотрены особенности поведения щелочноземельных металлов в зависимости от изменения удельного заряда шлака. Обосновано практическое значение темы работы для использования в металлургической промышленности.

Ключевые слова: КРИВАЯ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛЬНОСТИ, СТАЛЬ, ШЛАК, ЗАРЯД, ЛЕГИРОВАНИЕ, ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ, МОДИФИЦИРОВАНИЕ, РАФИНИРОВАНИЕ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ТЕМОДИНАМІЧНИХ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ОСНОВ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ	9
1.1 Ентальпійна теплова модель.....	9
1.2 Основи процесу легування сталі	11
1.3 Основи процесу модифікування сталі	12
1.3.1 Модифікування неметалевих включень у сталі обробкою лужноземельними металами.....	14
1.3.2 Математична модель процесу розчинення лужноземельних металів у сталі	16
1.3.3 Особливості використання математичної моделі в розрахунках кінетики розчинення лужноземельних металів у сталі.....	18
1.4 Основні теоретичні та практичні засади процесу ВЕЛР	21
1.5 Висновки	26
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР	28
2.1 Програмне забезпечення «Excalibur».....	28
2.2 Об'єкт дослідження	31
2.2.1 Сталь 12ГС - Сталь конструкційна для зварних конструкцій.....	31
2.2.2 Сталь 30ГС - Сталь для виливків легована	32
2.2.3 Сталь 09Г2С - Сталь конструкційна для зварних конструкцій.....	32
2.2.4 Сталь 35ХГСА - Сталь конструкційна легована	32
2.3 Крива електронейтральності.....	33
2.4 Результати дослідження	34
2.4.1 Вміст кальцію і магнію в металі та шлаку	34
2.4.2 Оптимальна кількість матеріалів для низьколегованих сталей	51
2.4.3 Хімічний склад металу	63
2.5 Висновки	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	78
ДОДАТОК А.....	82

ВСТУП

Мета і задачі роботи. Дослідити вплив різноманітних параметрів на можливість модифікування лужноземельними металами сталей 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА із застосуванням технології ВЕЛР. Оцінити вплив питомого заряду шлаку та підвищеного зовнішнього тиску на відновлення лужноземельних металів, а також дослідити причини цього впливу для подальшого удосконалення технології ВЕЛР.

Об'єкт дослідження: модифікована піч-ківш в умовах конвертерного цеху.

Предмет дослідження: вплив питомого заряду шлаку на термодинамічну систему «метал-шлак-газ».

Методи дослідження: Термодинамічний аналіз складу металевої і шлакової фаз, а також зміни витрат матеріалів та енергоресурсів в залежності від питомого заряду та маси шлаку проводяться за допомогою програми «Excalibur».

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає у дослідженні процесу модифікування лужноземельними металами сталей 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень можливості модифікування лужноземельними металами сталей 12ГС, 30ГС 09Г2С, 35ХГСА можуть бути використані у металургійному виробництві для ефективного використання енергоносіїв та феросплавів. Проведені дослідження дозволяють удосконалити процес вторинного електротермічного легування і рафінування металу.

Особистий внесок дослідника. Основні результати, наведені в кваліфікаційній роботі магістра отримані автором особисто. Ним виконано постановку завдань дослідження, обрано методикау експериментальних досліджень, проаналізовано та узагальнено результати досліджень, сформульовано загальні висновки.

Апробація результатів роботи. Основні висновки та результати кваліфікаційної роботи магістра доповідалися та обговорювалися на: науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ІННІ ЗНУ; наукових семінарах кафедри металургії ІННІ ЗНУ (2020 р., м. Запоріжжя).

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з анотації, вступу, 2 розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання, додатків. Загальний обсяг роботи становить 93 сторінок, 64 таблиць, 42 рисунків, 30 джерел посилання, додатки.

1 АНАЛІЗ ТЕМОДИНАМІЧНИХ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ОСНОВ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ

1.1 Ентальпійна теплова модель

У загальному вигляді пряма задача має форму системи рівнянь відносно рівноважних мас елементів у металі, шлаку та газі:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{л}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{ш}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{г}}, p, T) = \mathbf{0}, \quad (1.1)$$

де \mathbf{m} - вектор мас елементів в системі; $\bar{\mathbf{m}}_{\text{л}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{ш}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{г}}$ — шукані вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі; p, T - тиск і температура в системі.

Рішення рівняння (1.1) дає шукані величини рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі, якщо зафіксовані тиск і температура системи. При цьому розподіл елементів між фазами істотно залежить від температури відповідно до цього ж рівняння. У свою чергу, температура залежить від теплових ефектів хімічних реакцій, які супроводжують перерозподіл елементів між фазами, наприклад, при додаванні в систему окислювачів або розкислювачів. Крім того, кінцева температура системи залежить від теплофізичних властивостей елементів (стандартних ентальпій і теплоємностей) і визначається рівнянням теплового балансу. Тому знайти рівноважний склад і кінцеву температуру системи можна тільки шляхом спільного рішення рівнянь матеріального і теплового балансу. Додавання рівняння теплового балансу до системи рівнянь (1.1) дозволяє перевести температуру T в розряд шуканих величин, поряд з рівноважними масами хімічних елементів в фазах. Таким чином, в узагальненому вигляді пряме завдання формулюється в такий спосіб [1]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{л}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{ш}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{г}}, p, T, Q) = \mathbf{0}, \quad (1.2)$$

де Q - теплова енергія, що надійшла в систему у вигляді електроенергії та інших енергоносіїв, за вирахуванням теплових втрат.

Система рівнянь (1.2) є системою рівнянь матеріального і теплового балансу, записаною в загальному вигляді.

Рівняння теплового балансу засновано на I і II началах термодинаміки, згідно з якими, зокрема, при ізобарному процесі зміна ентальпії системи дорівнює поглиненій кількості теплоти Q :

$$\Delta H_p = H(T) - H_0 = Q_E - Q_L, \quad (1.3)$$

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

У всіх розрахунках ентальпія обчислюється одним з наступних еквівалентних способів:

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

2) За рівняння Вант-Гоффа: $H = (\partial(G/T) / \partial(1/T))_p$.

Крім того, парціальну мольну ентальпію змішування можна обчислити ще двома відомими способами [2]:

3) За відомою активності: $h_i^M = -RT^2(\partial \ln a_i / \partial T)_p$;

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

Теплоємності (в тому числі стандартна і змішання) обчислюються з рівнянням:

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

Таким чином, ентальпійна теплова модель є невід'ємною і узгодженою частиною будь-якої термодинамічної моделі, що лежить в основі рівноважних розрахунків і заснована на методі хімічних потенціалів Гіббса [3].

1.2 Основи процесу легування сталі

Легування металу – процес присадки в сталь легуючих елементів, для отримання так званої легованої сталі, тобто такої сталі, у складі якої знаходяться спеціальні (легуючі) домішки, введені в неї в певних кількостях для того, щоб надати їй будь-які особливі фізико-хімічні або механічні властивості.

Легуючими можуть бути як елементи, що не зустрічаються в простій сталі, так і елементи, які в невеликих кількостях містяться у будь-якій сталі (C, Mn, Si, P, S). Дуже часто операцію легування поєднують з операцією розкислення (особливо якщо метал легують марганцем, кремнієм або алюмінієм).

З точки зору впливу на властивості сталі легуючі елементи ділять на дві великі групи:

1) легуючі елементи, що розширюють γ -область твердих розчинів (нікель, марганець, кобальт);

2) легуючі елементи, що звужують γ -область (берилій, алюміній, кремній, фосфор, титан, ванадій, хром, молібден, вольфрам), так елементи, що утворюють сплави з звуженою γ -областю (ніобій, тантал, цирконій, церій).

Залежно від ступеня спорідненості до кисню легуючі елементи також ділять на дві великі групи:

1) легуючі елементи, у яких спорідненість до кисню менша, ніж у заліза (нікель, кобальт, молібден, мідь);

2) легуючі елементи, у яких спорідненість до кисню більша, ніж у заліза (наприклад, кремній, марганець, алюміній, хром, ванадій, титан).

Крім легуючих цих двох основних груп застосовують легуючі, введення яких в метал пов'язано з можливою небезпекою для здоров'я, так як пари цих металів або їх сполук шкідливі.

До таких елементів відносяться: сірка, свинець, селен, телур. Ці елементи вводять в метал безпосередньо в процесі розливання сталі і при цьому приймають спеціальні заходи безпеки. Легуючі домішки вводять в метал або в чистому вигляді (бруски чистої міді, чистого алюмінію, нікелю та ін.), або у вигляді сплавів (феросиліцій, феромарганець, фероалюміній та ін.), або у вигляді сполук (оксиди ванадію, марганцева руда, молібдат кальцію та ін.).

У всіх випадках для здешевлення сталі прагнуть використовувати максимальну кількість дешевих відходів (шлак, руду), що містять потрібний елемент.

Іноді для легування і розкислення сталі застосовують так звані екзотермічні брикети. До складу таких брикетів можуть входити оксиди, що містять легуючий елемент (наприклад, оксиди хрому, марганцева руда), порошкоподібні розкислювачі і відновники (наприклад, алюміній, магній) і окислювачі (наприклад, селітра). При випуску металу в ківш, в який завантажені подібні брикети, вони «запалюються», при реакції між відновниками і окислювачами виділяється необхідна кількість тепла, легуючі домішки, що входять до складу оксидів, відновлюються. Метал при такому методі роботи не охолоджується [4].

1.3 Основи процесу модифікування сталі

Застосування різних методів рафінування металу або видалення неметалевих включень, що утворюються в ньому, не завжди виявляється результативним. Крім того, досягнення позитивного результату може бути пов'язане з невиправдано високими витратами й зниженням економічної ефективності процесу позаагрегатної обробки металу. У таких випадках доцільно застосовувати модифікування сталі й неметалевих включень, тобто вплив на кристалічну структуру металу та зміну складу, морфології і розмірів включень. Модифікування неметалевих включень не вимагає обов'язкового

видалення їх з розплаву, що значно знижує питомі витрати на обробку. З метою модифікування найчастіше використовуються модифікатори на основі лужно- і рідкоземельних металів (ЛЗМ і РЗМ). Їх модифікуючу дію спрямовано насамперед на нейтралізацію негативного впливу включень, що містять кисень і сірку.

У більшості випадків модифікування сталі й неметалевих включень передбачає глобуляризацію включень з одночасним зменшенням їх розмірів і рівномірним розподілом в об'ємі металу. Глобуляризація включень дозволяє вирішити проблему концентрування напруг навколо включень неправильної (найчастіше гострокутної) форми і знизити таким чином вірогідність передчасного руйнування сталевих виробів.

Сульфіди, оксиди і оксисульфіди ЛЗМ і РЗМ, що утворюються в результаті модифікування, мають більш високу температуру плавлення, ніж сульфіди і оксиди заліза. Вони не деформуються в процесі гарячої обробки тиском і виключають явище розтріскування й розшарування металу при високій температурі, відоме як красноламкість.

Наявний практичний досвід дозволяє зробити наступні рекомендації з технології модифікування сталі.

1. Модифікатори повинні присаджуватися в попередньо розкислений метал, щоб виключити безпосередню взаємодію активних елементів (ЛЗМ і РЗМ) з киснем розплаву, або вводиться у вигляді порошкового дроту або в струмені інертного газу на глибину, яка виключає їх миттєве випаровування і видалення з розплаву у вигляді пари.

2. Оптимальна питома витрата модифікатора залежить від його складу, способу введення, окисленості й забрудненості металу, конкретних особливостей його позаагрегатної обробки. Для деяких активних елементів (Са, РЗМ, Ті, V та ін) існує їх оптимальна концентрація в металі, при досягненні якої рівень механічних та експлуатаційних характеристик одержуваної продукції максимальний. Наприклад, більшість дослідників

відзначає наявність оптимальної витрати РЗМ, який визначається, в основному, вмістом кисню і сірки в металі.

Як правило, витрата модифікаторів в фракціонованому вигляді (крупці, шматках) становить 2,0–4,0 кг/т сталі. Присадка модифікатора на струмінь металу в ході його розливання дозволяє знизити витрату модифікатора до 1,0 - 1,5 кг/т, а при введенні його в ківш у вигляді порошкового дроту – до 0,5 - 0,7 кг/т.

3. При тривалому знаходженні раскисленого металу в ковші, особливо з кислою футеровкою і наявності окисного шлаку, хімічний склад металу наприкінці розливання може помітно змінюватися в порівнянні з його початком. Зокрема, відбувається збільшення концентрації азоту, істотне зниження вмісту алюмінію і марганцю. Може відбуватися також зменшення концентрації активних елементів (Са, РЗМ, Ті і ін), в результаті чого ефект модифікування знижується і стає нестабільним.

4. Зниження забрудненості металу неметалевими включеннями після обробки його модифікаторами призводить до істотного підвищення рідкоплинності металу, що дозволяє знизити температуру його розливання на 20–30 °С і скоротити час розливання на 20 %.

В цілому модифікування сталі й неметалевих включень дозволяє отримати значний ефект при позаагрегатній обробці металу при мінімальних витратах, що становлять незначну частку в собівартості готового металу [5].

1.3.1 Модифікування неметалевих включень у сталі обробкою лужноземельними металами

У багатьох випадках головним завданням обробки сталі ЛЗМ є не десульфурація, а зміна хімічного складу, форми і властивостей присутніх у сталі неметалічних включень, тобто їх модифікування.

В даний час для розкислення сталі широко використовується алюміній. При високих залишкових концентраціях алюмінію хімічний склад оксидних

включень у сталі наближається до чистого глинозему, що часто є небажаним. Наприклад, під час розливання включення глинозему осідають на стінках розливних стаканів, що може призводити до часткового або повного їх зтягування. При прокатці включення глинозему схильні до крихкого руйнування. При цьому їх уламки витягуються в рядки вздовж напрямку деформації, що призводить до збільшення анізотропії механічних характеристик сталі. Тому в ряді випадків перед розливанням бажано проведення заходів, спрямованих на зміну природи неметалевих включень, які присутні в рідкому металі, а також утворюються при охолодженні і затвердінні сталі. Одним з можливих шляхів вирішення цього завдання є обробка розплаву ЛЗМ.

В даний час для модифікування неметалевих включень в розкисленій алюмінієм сталі частіше за інших застосовується обробка розплаву кальцієм. При цьому кальцій розчиняється в оброблюваному металі і, володіючи високою хімічною активністю по відношенню до кисню, частково заміщає алюміній в складі оксидних включень. При досить високій концентрації розчиненого кальцію оксидні неметалеві включення у сталі представлені головним чином алюмінатами кальцію різного складу. У деяких випадках поверхня алюмінатів може бути покрита сульфідної оболонкою.

Вважається, що в результаті модифікування оксидні неметалеві включення у сталі повинні бути представлені багатими оксидом кальцію алюмінатами складу $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ або фазами з більш високим вмістом оксиду кальцію. З наведеної на рис. 1.1 діаграми стану системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ видно, що температура плавлення цих алюмінатів нижче температур позапічної обробки сталі. Тому в розплаві алюмінати кальцію зазначеного складу знаходяться в рідкому стані і мають форму близьку до глобулярної. У затверділої сталі сприятлива форма неметалічних включень зберігається. Крім того, при гарячій пластичній деформації металу включення такого складу в мінімальному ступені схильні до зміни форми і розмірів, що

позитивно позначається на механічних і експлуатаційних характеристиках сталі.

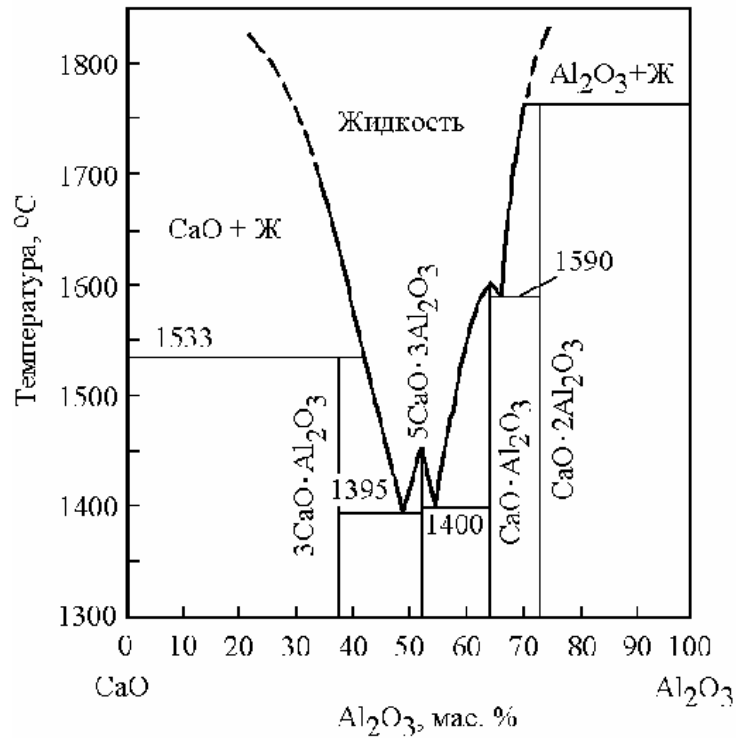


Рисунок 1.1 – Діаграма стану системи CaO – Al₂O₃

Більшість дослідників відзначає, що для отримання в розкисленій алюмінієм сталі оксидних неметалічних включень зазначеного складу сталь перед розливанням повинна містити більше 0,02% алюмінію, при цьому повинні також виконуватися наступні умови: $[\%Ca]/[\%Al] > 0,15$ и $[\%Ca]/[\%S] > 0,2-0,3$ [6].

1.3.2 Математична модель процесу розчинення лужноземельних металів у сталі

Експериментально встановлено, що обов'язковою умовою розчинення значної кількості ЛЗМ у сталі є попереднє розкислення і глибока десульфуріяція металу. При цьому швидкості хімічних реакцій між парою реагентів і домішками розплаву різко зменшуються. Це дає підстави вважати,

що зміна маси спливаючих в металі бульбашок пару ЛЗМ відбувається головним чином в результаті розчинення реагентів у сталі.

Як приклад розглянемо зміна маси спливаючого в сталі бульбашки пари кальцію. Якщо концентрація розчиненого в металі кальцію виражена у відсотках від маси металу, розчинення мішура масою m може бути описано рівнянням:

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

где β_{Ca} – коефіцієнт масовіддачі кальцію у сталі, м/с; $[Ca]_n$ і $[Ca]$ – концентрація кальцію у сталі біля поверхні бульбашок пару кальцію та в обсязі металу, %.

Вираз (1.5) можна привести до виду:

$$dm = -\frac{\beta_{Ca}\rho a m RT ([Ca]_n - [Ca]) dx}{100 \mu v [P_o + \rho g (H - x)]}. \quad (1.6)$$

Рішення рівняння (1.6) може бути отримано у вигляді:

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

$$\psi = \frac{\beta_{Ca} a RT}{100 \mu v g} \ln \frac{P_o + \rho g H}{P_o}. \quad (1.7)$$

При визначенні середньої за час обробки величини ступеня використання кальцію для розчинення у сталі вираз (1.7) слід перетворити до вигляду:

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

де $[\bar{Ca}]_n$ – середнє за період обробки вміст кальцію у сталі, %.

При обробці сталі кальцієм одночасно протікають процеси надходження кальцію в метал зі спливаючих бульбашок пару і видалення його з розплаву в результаті окислення і випаровування. Відомо, що швидкість видалення кальцію з металу може бути описана кінетичним рівнянням реакції першого порядку відносно концентрації розчиненого у

металі кальцію. З урахуванням цього сумарну зміну вмісту кальцію у сталі можна уявити залежністю:

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

де k – константа швидкості реакції видалення кальцію з розплаву, c^{-1} .

Рішення рівняння (1.9) аналітично не може бути отримано. При розгляді залежності ступеня використання кальцію для десульфурзації металу від концентрації сірки у сталі було показано, що окислення частини сульфідів, що утворилися може бути враховано шляхом коригування величини коефіцієнта масовіддачі сірки. Аналогічно цьому можна показати, що втрати кальцію з достатньою точністю можна врахувати, замінивши коефіцієнт масовіддачі кальцію еквівалентним його значенням, величиною якого будуть одночасно враховані швидкості надходження кальцію у розплав і видалення з нього. Це дозволить привести рівняння (1.9) до вигляду:

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

З рівняння (1.10) вираз для визначення питомих витрат кальцію на обробку при заданих значеннях початкового і кінцевого вмісту кальцію у сталі може бути отримано у вигляді:

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

де $[Ca]_n$ и $[Ca]_k$ – початкова і кінцева концентрації кальцію у сталі, % [15].

1.3.3 Особливості використання математичної моделі в розрахунках кінетики розчинення лужноземельних металів у сталі

Практичне використання рівнянь (1.8) і (1.11) можливе тільки за умови, що відома концентрація кальцію у сталі біля поверхні спливаючих бульбашок його пару. Необхідно пам'ятати, що при русі бульбашки у металі тиск пару кальцію в ньому безперервно змінюється. Разом з ним змінюється і

рівноважний вміст кальцію у сталі, який відповідно до закону Генрі пропорційний парціальному тиску пару кальцію у газовій фазі, що контактує з металом. Тому при проведенні розрахунків за формулами (1.8) і (1.11) слід користуватися середньої за час руху бульбашки в металі величиною концентрації кальцію у сталі біля міжфазної поверхні. Припускаючи наявність термодинамічної рівноваги між паром кальцію в бульбашці і вмістом кальцію у сталі біля його поверхні, середню величину концентрації кальцію біля поверхні бульбашки можна розрахувати відповідно до рівняння:

$$[Ca]_n = \frac{[Ca]_H - [Ca]_O}{\ln\left(\frac{[Ca]_H}{[Ca]_O}\right)}, \quad (8.9)$$

де $[Ca]_H$ и $[Ca]_O$ – концентрації кальцію у сталі біля поверхні бульбашки на глибині H і в момент виходу з обсягу металу, %.

Досвід використання залежностей (1.8) і (1.11) для опису кінетики розчинення магнію у чавуні, яка в даний час вивчена набагато повніше, показує, що в реальних процесах модифікування металу середня величина концентрації ЛЗМ біля поверхні бульбашки може істотно відрізнятися від значень, розрахованих за формулою (1.9). Цю відмінність можна пояснити, припускаючи можливість впливу поверхнево-активних компонентів розплаву на величину градієнта концентрації ЛЗМ в пограничному шарі біля поверхні бульбашки.

Відомо, що на поверхні рідини існує обмежена кількість адсорбційних місць, які можуть бути зайняті атомами домішки. За спільної адсорбції кількох домішок частка місць, зайнятих атомами кожної з них, визначається з урахуванням взаємного впливу всіх речовин, що адсорбуються. Розчинення кальцію у сталі протікає шляхом адсорбції його атомів на поверхні спливаючих бульбашок і подальшою масовіддачею їх в обсяг металу. При цьому відповідно до рівнянням Гіббса величина адсорбції кальцію на поверхні розділу фаз Г пов'язана з величиною концентрації кальцію біля поверхні бульбашки співвідношенням:

$$\Gamma = -\frac{[Ca]}{RT} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta[Ca]} \right), \quad (1.10)$$

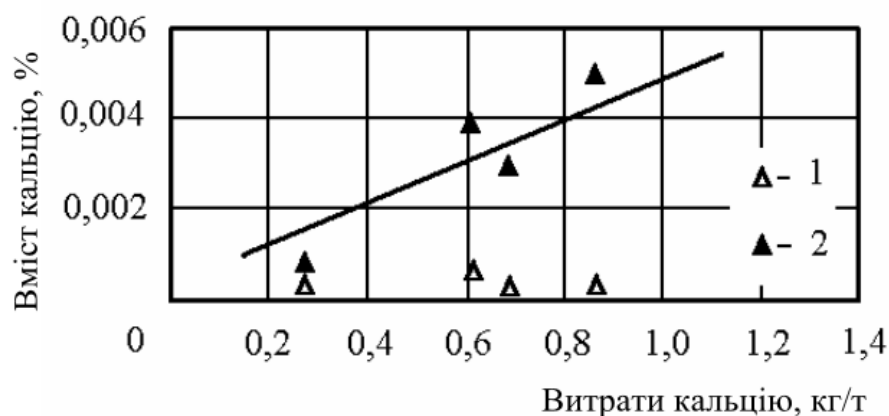
де $\Delta\sigma$ – зміна поверхневого натягу металу при розчиненні кальцію, Дж/м². З рівняння (1.10) видно, що зміна умов адсорбції кальцію на поверхні розділу фаз має супроводжуватися зміною швидкості розчинення його у сталі в результаті зміни величини градієнта концентрації кальцію в металі біля поверхні бульбашки.

До числа домішок, що володіють високою поверхневою активністю в розплавах заліза, відносяться кисень, сірка, а також домішки деяких кольорових металів. Тому в залежності від хімічного складу оброблюваної сталі середнє значення концентрації кальцію біля поверхні бульбашки може істотно змінюватися. У зв'язку з цим значення $[Ca]_n$ в рівняннях (1.8) і (1.11) рекомендується оцінювати на підставі експериментальних даних про величину ступеня використання кальцію при розчиненні у сталі. Для цього необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\ln(1 - \bar{\eta}_1) = -\psi([Ca]_n - [\bar{Ca}]_1); \quad (1.11)$$

$$\ln(1 - \bar{\eta}_2) = -\psi([Ca]_n - [\bar{Ca}]_2);$$

де $[\bar{Ca}]_1$ і $[\bar{Ca}]_2$ – середні значення вмісту кальцію у сталі за час обробки, %.



1 – вихідна концентрація кальцію; 2 – кінцева концентрація.

Рисунок 1.2 – Розрахункові та експериментальні дані про кінетику розчинення кальцію у сталі 20

Як приклад на рис. 1.2 результати розрахунку кінетики розчинення кальцію у сталі 20 зіставлені з даними експериментального дослідження, в ході якого подачу кальцію проводили у вигляді порошкового дроту. Безпосередня обробка експериментальних даних за рівнянням (1.11) дозволила отримати значення $[Ca]_n$ рівне 0,0215%. Розрахунок виконаний з використанням кінетичного коефіцієнта ψ рівного 2,6 [6].

1.4 Основні теоретичні та практичні засади процесу ВЕЛР

Питання про можливість використання установок ківш-піч для вторинного легування і рафінування сталі неодноразово виникало при аналізі розподілу сірки між металом і шлаком в процесі електрошлакової переплавки постійним струмом. Так, в роботі [7] було показано, що коефіцієнт розподілу сірки $(S)/[S]$ змінювався більш ніж два рази при зміні полярності прикладеної до електродів напруги. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей багатоконпонентних систем «метал-шлак-газ» не дозволяла ефективно керувати даним процесом і залишало лише емпіричні можливості для розробки окремих технологічних прийомів, які не виходять за рамки даного металургійного агрегату, даної технології виплавки, заданої марки сталі і заданого складу шлаку.

В роботі А. Г. Пономаренко [8] вперше була введена «електрохімічна» поправка, або «електронний внесок» в логарифм активності шлаку у вигляді додаку μv_i (v_i – валентність елементу i в шлаку). У цій та ряді наступних робіт обговорювався фізичний зміст величини μ . Пропонувалося, наприклад, називати її «рівнем Фермі електронів в шлаку» [8] і «окислювально-відновним потенціалом системи «метал-шлак» [9]. В роботі [10] стверджувалося, що μ є нічим іншим, як невизначеним множником Лагранжа при вирішенні задачі мінімізації енергії Гіббса системи «метал-шлак» за додаткової умови електронейтральності шлакової фази. В роботі [11] було показано, що електронейтральність e , взагалі кажучи, необхідною умовою

дотримання рівняння Гіббса-Дюгема при додаванні «електронного вкладу» в вираз для активності будь-якої фази. Так чи інакше, «електрохімічна» поправка μ_i дозволила істотно поліпшити можливості передбачення фізико-хімічних моделей системи «метал-шлак» і наблизити їх до рівня вимог, що пред'являються до інтелектуального ядра АСУТП промислових металургійних агрегатів.

Системи управління, побудовані на викладених принципах, впроваджувалися на ряді металургійних підприємств: Молдавському металургійному заводі [10], Білоруському металургійному заводі [13], «Запоріжсталі» [14] та інших. Разом з тим, відсутність теплоенергетичної складової в використовуваних фізико-хімічних моделях не дозволяла з достатньою точністю моделювати і прогнозувати сталеплавильні процеси. Впровадження в модель системи «метал-шлак-газ» ентальпійного теплового балансу з невід'ємним розрахунком кінцевої температури [15] і нової термодинамічної моделі конденсованих розчинів [11] практично завершило теоретичну розробку «каркасу» фізико-хімічної моделі, придатної не тільки для побудови повністю автоматизованих систем управління існуючими металургійними процесами, а й відкрило практичні можливості для розробки теоретичних основ і технології принципово нових процесів, таких як вторинне електротермічне легування і рафінування (ВЕЛР) в процесі обробки металу в печі-ковші.

Ключовим елементом теорії ВЕЛР є поняття про криву електронейтральності (КЕ), типовий вигляд якої наведено на рис. 1.3.

У координатах «Заряд шлаку, $e \cdot M_{\text{моль}}$ » - «Рівень Фермі електронів в шлаку, од. RT» КЕ будується як функція $F_1(\mu)$ з рівнянь, яка описує стан системи «метал-шлак-газ» [16]:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \nu_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu \nu_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} = 0; \\ F_2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu \nu_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} - \frac{N}{1 + \exp(Y)[1 + \exp(-Z)]} = 0; \\ F_3 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \nu_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu \nu_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} - \frac{N}{1 + \exp(Z)[1 + \exp(-Y)]} = 0; \end{cases} \quad (1.5)$$

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 – числа молей i -го елементу в системі;

$Y = \ln(N_m / N_s)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності шлаку;

$Z = \ln(N_m / N_g)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності газу;

Результатом рішення нелінійної системи (1.5) є набір величин μ , Y , Z , за якими визначаються рівноважний вміст (числа молей) елементів в шлаку, газі та метали [16].

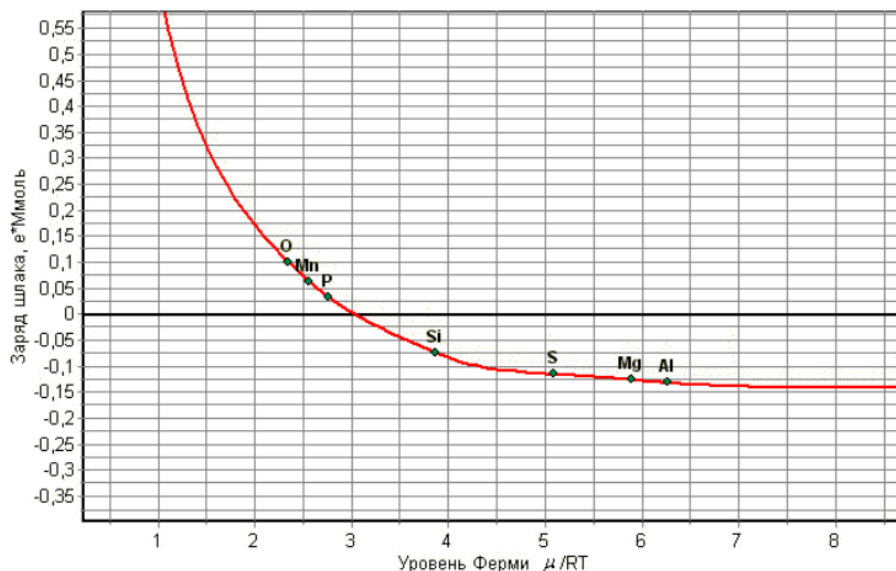


Рисунок 1.3 – Фрагмент кривої електронейтральності

КЕ відображає поточний рівноважний стан елементів в системі. Вона перетинає вісь абсцис в точці рівноважного значення μ . Ця точка відповідає електрично нейтральному шлаку.

У точках перегину кривої нанесені точки, що відповідають окремим елементам. У позначеннях системи рівнянь (1.5) координати цих точок обчислюються наступним чином.

$$\text{Координата X: } X_E = \frac{A_i - Y - \ln[1 + \exp(B_i - Z)]}{v_i} \quad (1.6)$$

$$\text{Координата Y: } Y_E = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{1 + \exp(-A_i + Y + X_E v_i) [1 + \exp(B_i - Z)]} \quad (1.7)$$

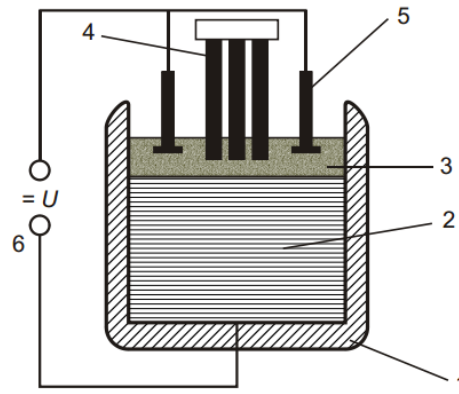
Положення точок окремих елементів щодо осі абсцис відображає здатність шлаку в даних умовах поглинати або віддавати елемент. Якщо точка елемента з позитивною валентністю знаходиться нижче цієї осі, то елемент прагне перейти в шлак. В іншому випадку цей елемент прагне перейти в метал або газ. Елементи з негативною валентністю переходять в шлак у разі, якщо відповідна точка знаходиться вище осі абсцис.

Взаємне положення точок елементів на КЕ відображає черговість окислення або відновлення елементів при зміні окисно-відновного потенціалу системи μ .

Графік на рис. 1.3 свідчить про те, що фосфор, марганець і сірка прагнуть в метал, тоді як кремній, магній і алюміній повинні залишатися в шлаку. При збільшенні ступеня розкислення спочатку відновиться кремній, потім сірка почне поглинатися шлаком, і, нарешті, відновляться магній і алюміній. При збільшенні ступеня окислення спочатку окислиться фосфор, а потім марганець

Таким чином, КЕ дозволяє оцінювати здатність елементів до окислення і відновлення в даних умовах рівноваги. Знання якісних і кількісних характеристик КЕ, а також вміння керувати ними за допомогою зовнішнього електричного поля дозволяє організувати принципово новий процес ВЕЛР на практиці.

Схема найпростішої установки ВЕЛР приведена на рис. 1.4.



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

Рисунок 1.4 – Принципова схема ВЕЛР

На графітові електроди спеціальної форми 5 подається постійна напруга від джерела 6. Елементи на КЕ зміщуються вгору або вниз в залежності від полярності прикладеної до електродів 5 напруги. Передбачається, що метал в печі-ковші постійно переміщується шляхом продувки інертним газом.

Якщо надати шлаку позитивний заряд (електрод 5 – анод), то рівновага в системі зміститься у бік збільшення величини μ , як якщо б нульова вісь абсцис на рис. 1.3 змістилася вниз. Практично це буде еквівалентно збільшенню ступеня розкисленості системи, що призведе до відновлення елементів з позитивною валентністю з шлаку. Одночасно буде відбуватися десульфурація, тобто видалення сірки з металу та поглинання її шлаком, оскільки сірка має негативну валентність. Якщо ж електрод 5 є катодом, створюються умови для дефосфорації металевого розплаву.

Ординати елементів на КЕ дозволяють оцінити величину напруги, необхідної для створення відновлювальних або окисних умов за відомою геометричною конфігурацією шлакового шару і електропровідності шлаку. Оскільки електричний опір шлаку має кінцеву величину, для проведення процесу ВЕЛР необхідні певні енергетичні витрати, які в результаті

теплового ефекту частково компенсують витрати електроенергії, що подається на електроди підігріву 4.

Попередні розрахунки показують, що для відновлення одного молю кремнію зі шлаку методом ВЕЛР потрібно на порядок менша кількість електроенергії, ніж її потрібно було б для виробництва такої ж кількості кремнію у вигляді феросиліцію, доставки феросплаву на завод, введення його в розплав, розплавлення і підігріву до температури розплаву, навіть з урахуванням що супроводжує процес екзотермічна реакція. Подібний ефект досягається також при відновленні марганцю і алюмінію [17].

1.5 Висновки

1. Процес легування металу полягає у впровадженні в сталь легуючих елементів, для отримання сталі з особливими фізико-хімічними властивостями. Зазвичай у якості легуючих використовують елементи, які в невеликій кількості містяться у будь-якій сталі (C, Mn, Si, P, S). Дуже часто легування поєднують з розкисленням (особливо, якщо метал легують марганцем, кремнієм або алюмінієм).

2. Якщо застосування різних методів рафінування металу або видалення неметалевих включень не дають результату, то проводять операцію модифікування сталі та неметалевих включень (змінюють склад та кристалічну структуру металу). Для модифікування найчастіше використовуються лужно- та рідкоземельні метали, тому що їх модифікуюча дія спрямована на нейтралізацію негативного впливу включень, що містять сірку та кисень.

3. Технологія вторинного електротермічного легування і рафінування (ВЕЛР) дозволяє:

- В значній кількості заощадити витрату дорогих феросплавів, модифікаторів і синтетичних шлаків;
- Утилізувати рядові конвертерні, доменні та мартенівські шлаки;

- Проводити процеси дефосфорації та десульфурації без введення у метал реагентів, які підвищують вміст неметалевих включень;
- Вводити у розплав високоактивні легуючі з максимальним ступенем засвоювання;
- Зменшити газовиділення та пилоутворення у порівнянні з існуючими методами легування та розкислення сталі.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР

2.1 Програмне забезпечення «Excalibur»

Однією з перших комп'ютерних програм, розроблених для оптимізації легування сталі, була програма «Форвард» [18]. Наступний крок в розвитку програмних засобів для металургійних розрахунків був реалізований в системі «Оракул» [19], яка була здатна враховувати неметалеву частину шихти в розрахунках рівноваги. Істотним недоліком обох програм була їх нездатність враховувати вплив теплових ефектів і диференціальних коефіцієнтів засвоєння. У програмі «Excalibur» вперше в повному обсязі реалізовані пряма і зворотна задачі, що працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [20] і її подальших модифікаціях [21,22], ентальпійному тепловому балансі [23] і обліку кінетичного запізнювання [24]. В алгоритмі оберненої задачі реалізований універсальний метод фазових операторів [25], окремим випадком яких є диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКУ) в металі [26].

За своїми можливостями програма «Excalibur» значно перевершує раніше створені програми термодинамічної моделювання системи «метал-шлак-газ». Її основні переваги:

- Виконання термодинамічного розрахунку рівноваги в багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» з урахуванням теплоти хімічних реакцій;
- Проведення інтегрованого термодинамічного розрахунку кінцевої температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;
- Можливість розрахунку парціальних тисків всіх атомарних і молекулярних складових газової фази;

- Обчислення і відображення всіх інтегральних та парціальних термодинамічних функцій складових системи, включаючи всі фази і окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;

- Точний облік теплоти енергоносіїв і теплових втрат, температури і агрегатного стану матеріалів;

- Розрахунок і наочне відображення кінетики взаємодії фаз в сталеплавильному агрегаті на основі принципів нерівноважної термодинаміки і рішення динамічної системи диференціальних рівнянь;

- Повний розрахунок плавки в дуговій сталеплавильній печі (ДСП), в тому числі: динаміки плавлення брухту, мас і хімічного складу металу, шлаку і газу, температури по ходу плавки з урахуванням кінетичного запізнювання, скачування шлаку, теплових втрат і геометричних параметрів печі;

В рамках повного і точного розв'язання оберненої задачі термодинамічної моделювання програма «Excalibur» забезпечує:

- Оптимізацію мас всіляких легуючих і шихтових матеріалів (в будь-якому агрегатному стані) і витрати енергоносіїв за критеріями їх сумарної мінімальної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату;

- Задавання та гарантоване виконання комплексу односторонніх і двосторонніх оптимізаційних обмежень за хімічним складом і масам кінцевих металу, шлаку і газу, масам вихідних матеріалів, витраті енергоносіїв, кінцевій температурі системи;

- Застосування матричної алгебри фазових операторів і швидкодіючого алгоритму двоїстого симплекс-методу;

- Розрахунок і облік перехресного впливу вмісту одних елементів на засвоєння інших в кожній з фаз;

- Розрахунок консолідованої матриці впливу добавок матеріалів і енергоносіїв на масу і склад фаз, а також температуру системи;

- Облік невизначеності вихідних і розрахункових даних шляхом задавання відповідних довірчих інтервалів «нижня межа - верхня межа»;

- Практичну реалізацію принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативного вироблення альтернативних варіантів легування, розкислення і позапічної обробки сталі при відсутності рішення оберненої задачі в початковому вигляді.

№	Материал	т	№	Эл	Мет	масс%	Шлак	масс%	Газ	масс%	НВ	масс%	Всего	масс%	ln[K]	It	№	Газ	P >=	P <=
1	FeMn	1,7	0	Fe	98,35	98,29	1,119	1,103	0,013	0,013			97,11	97,05	8,3		1	CO	0,613	0,65
2	SiMn		1	C	0,138	0,149	0	0	42,51	42,52			0,137	0,147	-14,91		2	CO2	4,5e-3	4,7e-3
3	FeSi65	1,5	2	Si	0,561	0,561	40	39,88	0	0			0,783	0,792	32,6		3	Mn	5,2e-4	5,5e-4
4	AB-87	0,05	3	Mn	0,874	0,914	5,353	5,498	0,092	0,093			0,916	0,957	13,14		4	Mg	3,9e-4	4,0e-4
5	Коксик		4	Al	0,01	0,01	3,611	3,641	0	0			0,034	0,035	25,87		5	Fe	7,3e-5	7,3e-5
6	Карбид Si	0,1	5	S	0,036	0,036	0,178	0,181	0	0			0,038	0,038	-6,46		6	Ca	1,4e-6	1,4e-6
7	Синшлак		6	P	0,024	0,024	0,008	0,007	0,0001	0,0001			0,023	0,023	33,22		7	PO	4,1e-7	4,1e-7
8	Футеровка	0,1	7	Mg	0	0	3,559	3,556	0,03	0,03			0,027	0,027	18,98		8	S	1,7e-7	1,7e-7
9	Известь		8	Ca	0	0	46,18	46,13	0,0002	0,0002			0,422	0,422	24,16		9	SO	3,4e-8	3,3e-8
10	Э/з МВтч	0,25	9	O	0,013	0,013			57,36	57,34			0,511	0,511	0		10	MnO	2,6e-8	2,6e-8
			Σ	кг	153202	153206	1983	1984	0	0			155185	155190			11	MgO	2,1e-8	2,1e-8
																	12	Al	2,0e-8	2,0e-8
																	13	S2	1,7e-8	1,7e-8
																	14	Al2O	8,8e-9	9,2e-9
																	15	P	8,3e-9	8,3e-9
																	16	PS	6,7e-9	6,8e-9
																	17	FeO	6,1e-9	6,0e-9
																	18	P2	3,1e-9	3,1e-9
																	19	SO2	2,3e-9	2,2e-9
																	20	PO2	2,1e-9	2,0e-9
																	21	AlO	1,6e-9	1,6e-9
																	22	O	7,3e-10	7,1e-10
																	23	Si	1,7e-10	1,8e-10

Рисунок 2.1 – Робоче вікно програмного забезпечення «Excalibur»

Користувач за допомогою редагованих таблиць і полів може задати будь-які вихідні дані і оптимізаційні обмеження (односторонні і двосторонні) стосовно до металу, шлаку і газу, а також до всіх доступних та недоступних матеріалів та енергоносіїв. Зокрема, тут можна задати хімічний склад і інтервал мас вихідних металу і шлаку, початкову температуру, температуру навколишнього середовища, необхідний склад металу і шлаку, необхідні маси металу, шлаку і газу, обмеження по кінцевій температурі металу, а також вказати величину теплових втрат в МДж.

Крім того, по кожному матеріалу можна вказати рекомендовані маси, фіксовані (обов'язкові) маси і поставити верхню і/або нижню межу використання даного матеріалу у тоннах і/або відсотках від загальної маси всіх матеріалів.

Редактор завдань допускає введення до 100 різних завдань на плавку, які можуть бути збережені в файлі. У межах форми редактора робота з

файлами завдань і окремими завданнями проводиться за допомогою контекстного меню. На головній формі швидке переключення між файлами завдань і окремими завданнями проводиться за допомогою двох випадаючих списків у верхній частині форми.

Програма «Excalibur» дозволяє виконувати термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу і може бути використана в якості навчальної програми для студентів металургійних спеціальностей, а також може служити інструментом дослідника і технолога при розробці нових технологій, так як дозволяє моделювати різні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурзації і дефосфорації сталі [27].

2.2 Об'єкт дослідження

У якості об'єктів дослідження даної дипломної роботи було обрано 4 марки сталі, а саме: 12ГС, 30ГС, 09Г2С та 35ХГСА. Хімічний склад досліджуваних сталей, а також відповідні для шлаку і газу представлено в п. 2.4.3 другого розділу. Вміст елементів у металі та шлаку в даній роботі приведений у масових відсотках.

2.2.1 Сталь 12ГС - Сталь конструкційна для зварних конструкцій

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 12ГС, згідно 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: Зубчасті колеса, ролики, обойми, зубчасті вінці, важелі, фланці, шківни, сектора, колони, ходові колеса і інші деталі.

2.2.2 Сталь 30ГС - Сталь для виливків легована

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі 30ГС, згідно 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: Різні деталі і елементи зварних металоконструкцій, які працюють за температури від -70 до + 425 °С під тиском.

2.2.3 Сталь 09Г2С - Сталь конструкційна для зварних конструкцій

Таблиця 2.3 – Хімічний склад сталі 09Г2С, згідно 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: Різні деталі і елементи зварних металоконструкцій, які працюють за температури від -70 до + 425 °С під тиском.

2.2.4 Сталь 35ХГСА - Сталь конструкційна легована

Таблиця 2.4 – Хімічний склад сталі 35ХГСА, згідно 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

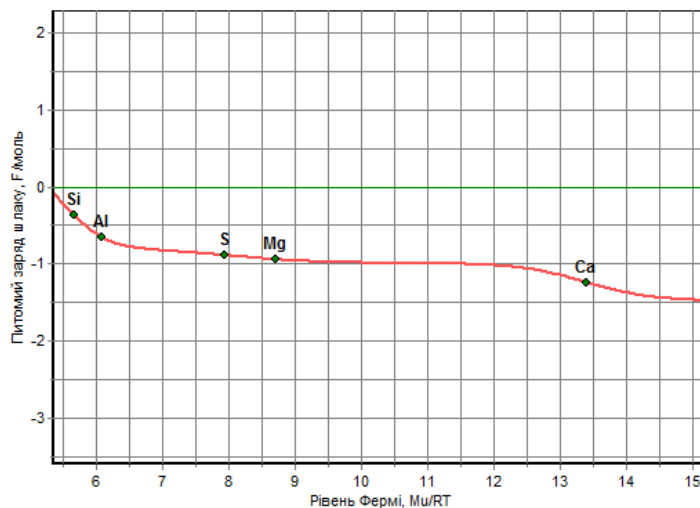
Застосування: Фланці, кулачки, пальці, валики, важелі, осі, деталі зварних конструкцій і інші покращувані деталі складної конфігурації, що працюють в умовах знакозмінних навантажень.

2.3 Крива електронейтральності

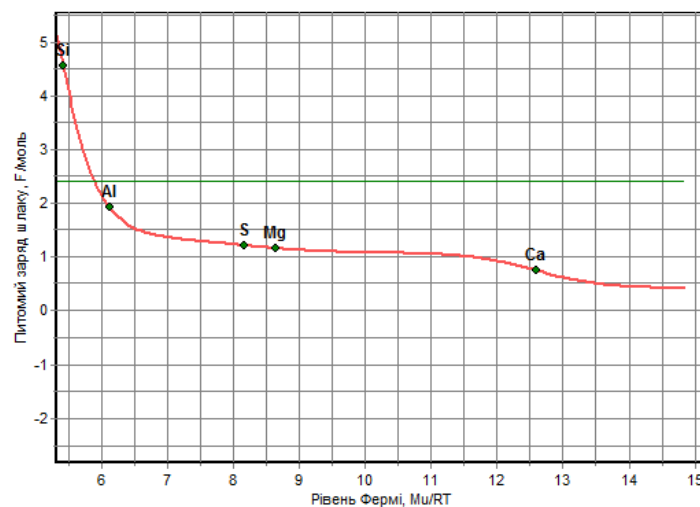
За допомогою ПЗ «Excalibur» можна змоделювати поведінку кривої електронейтральності (КЕ). КЕ показує можливість відновлення того, чи іншого елемента та питомий заряд, який необхідно прикласти до шлаку.

Елементи, що знаходяться у нижній частині КЕ (від'ємній) і мають від'ємну валентність – переходять до шлаку, і навпаки, елементи з позитивною валентністю, що знаходиться у верхній частині КЕ – переходять до металу.

Для прикладу розглянемо КЕ для напівпродукту та сталі 12ГС.



а) напівпродукт



б) сталь 12ГС

Рисунок 2.2 – Крива електронейтральності (заряд шлаку 60 кФ/моль)

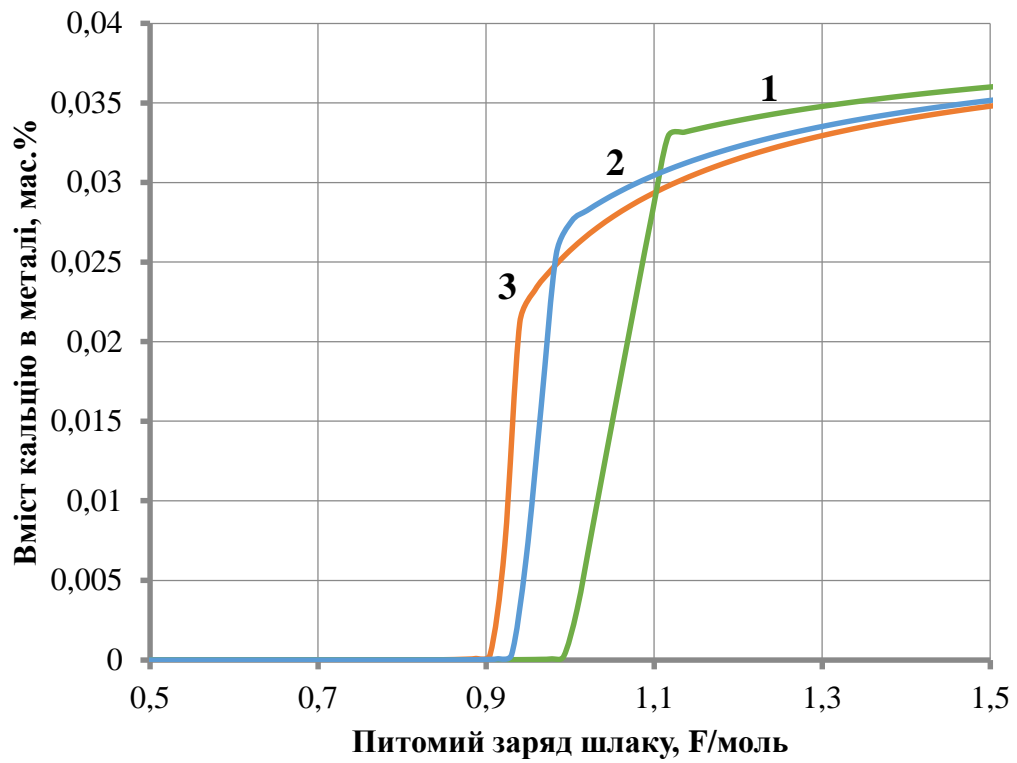
Як видно з рис. 2.2, відновлювальна властивість лужноземельних металів підвищується разом з підвищенням питомого заряду шлаку. Величина заряду повинна бути не більше 60 кF/моль, тому що при більш високих значеннях шлак стає нестійким.

2.4 Результати дослідження

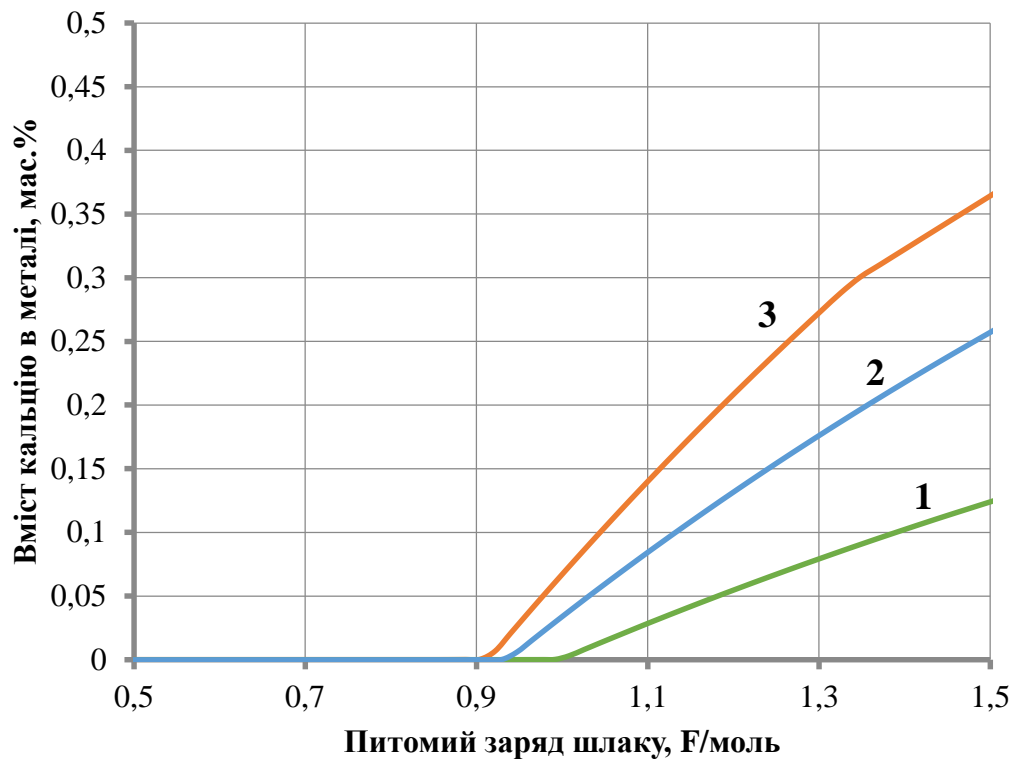
2.4.1 Вміст кальцію і магнію в металі та шлаку

На рисунках 2.3 – 2.18 наведені залежності вмісту кальцію і магнію в металі та шлаку від збільшення питомого заряду та маси останнього. Графіки були побудовані для таких марок сталі, як: 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА. Дослід проводився в умовах звичайного і підвищеного зовнішнього тиску для мас шлаку: 1, 2 і 3 тонни.

Вміст кальцію та магнію в металі

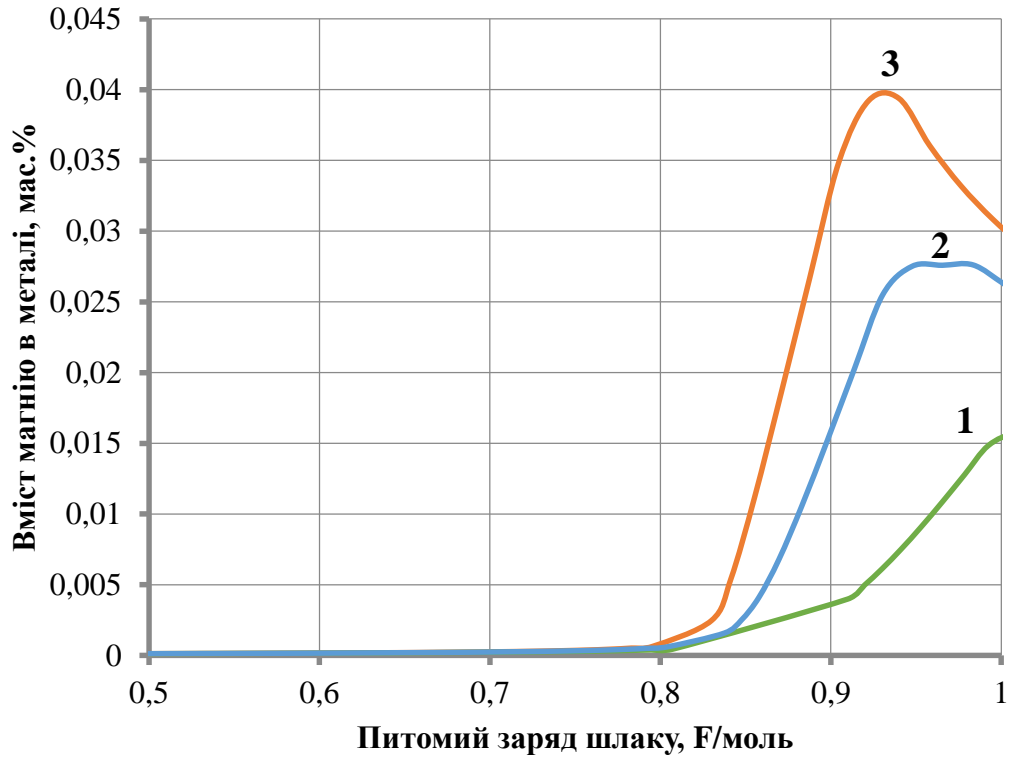


а) 1 атм

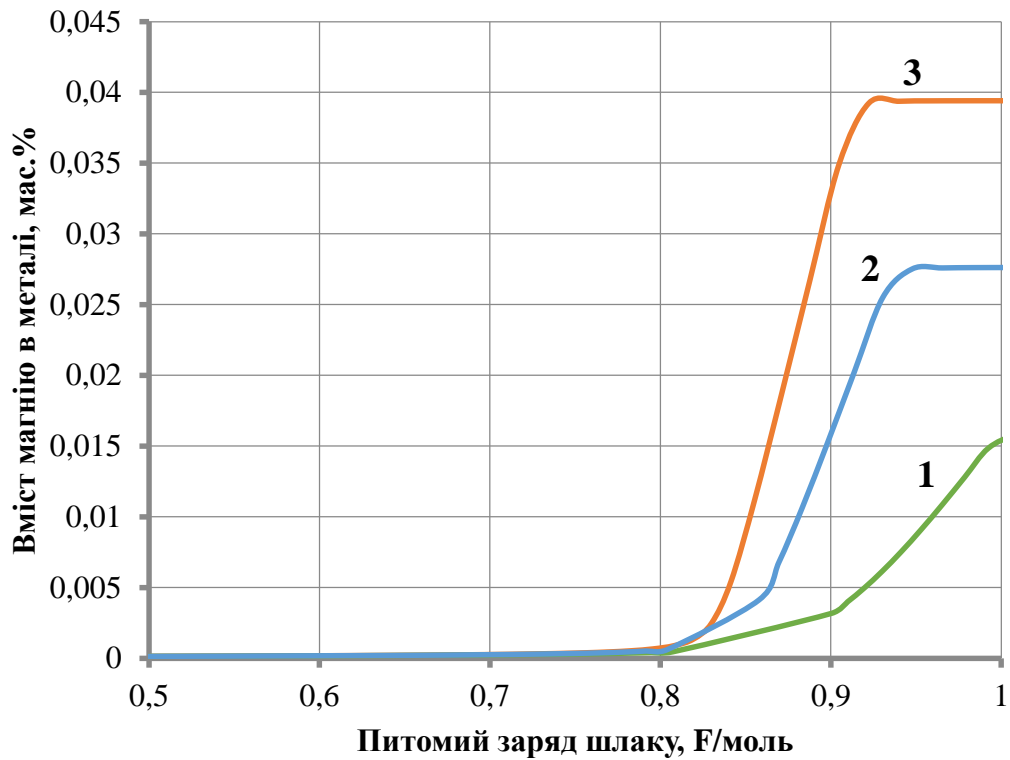


б) 2 атм.

Рисунок 2.3 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в металі для сталі 12ГС

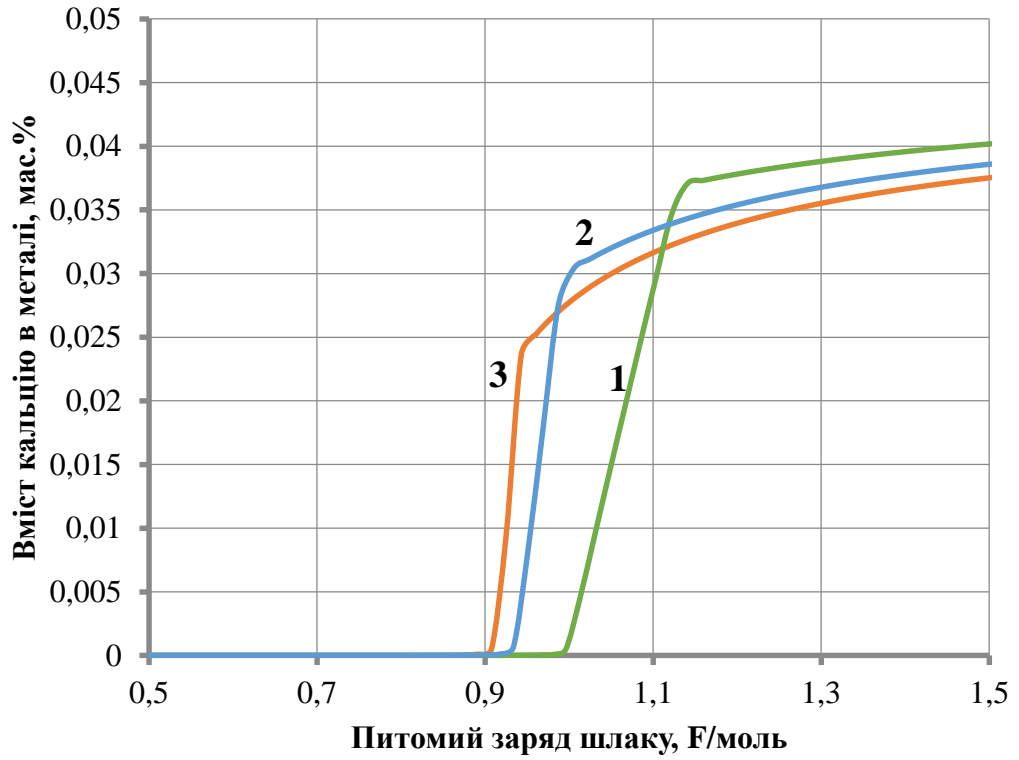


а) 1 атм

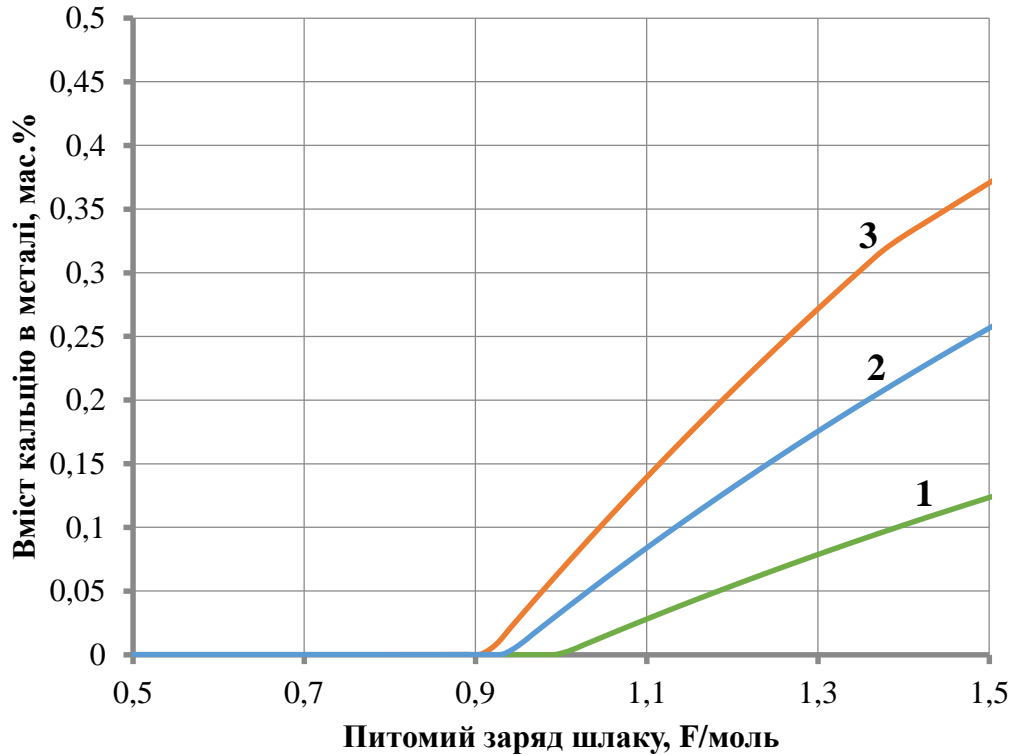


б) 2 атм.

Рисунок 2.4 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в металі для сталі 12ГС

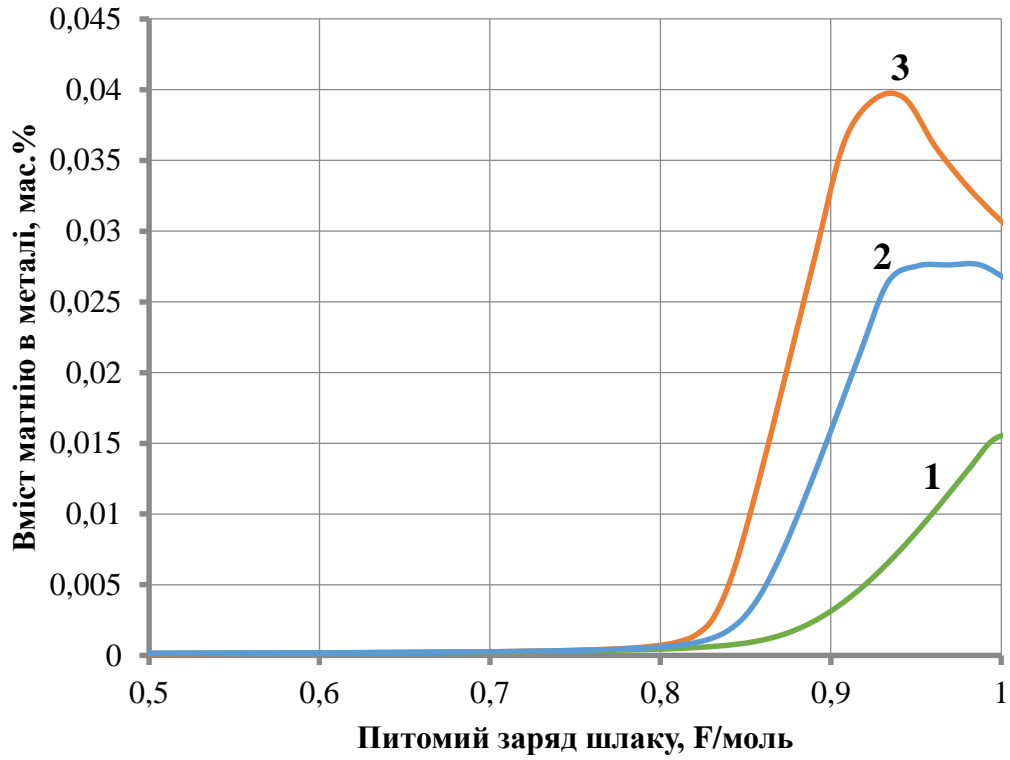


а) 1 атм

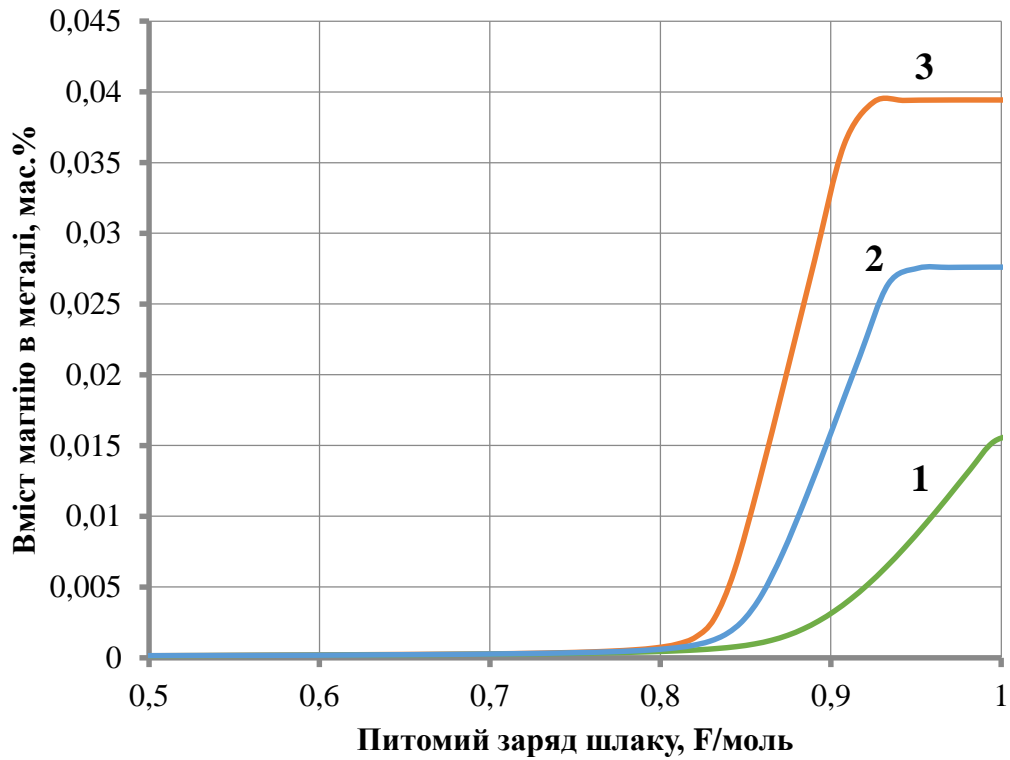


б) 2 атм

Рисунок 2.5 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в металі для сталі 30ГС

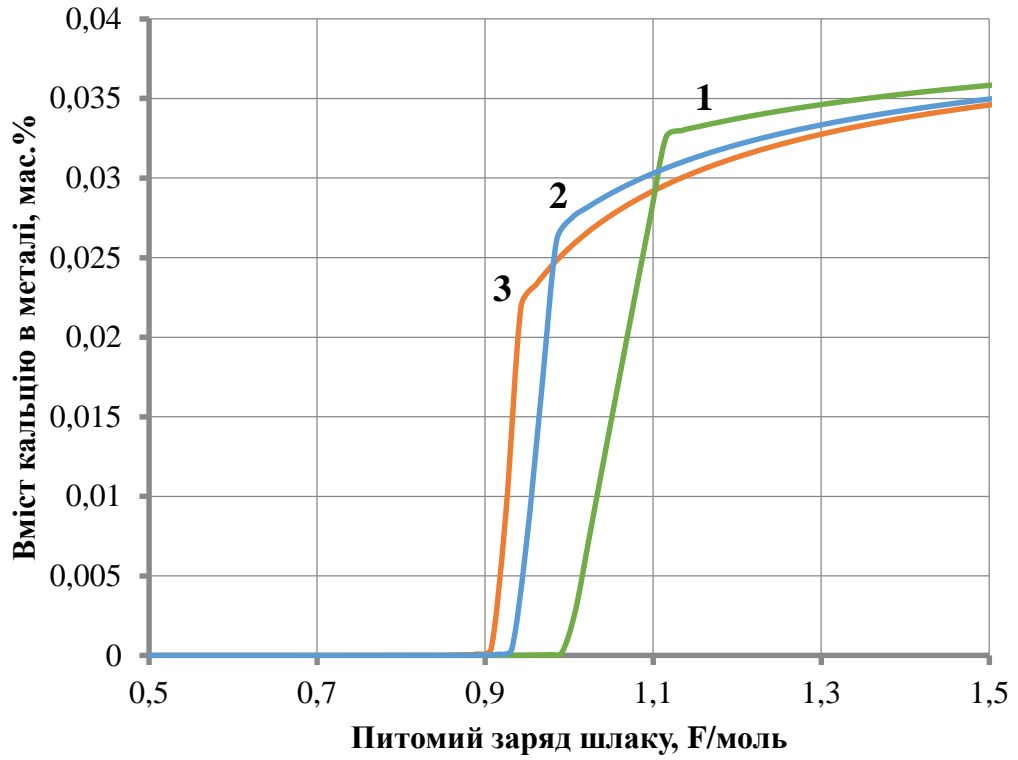


а) 1 атм

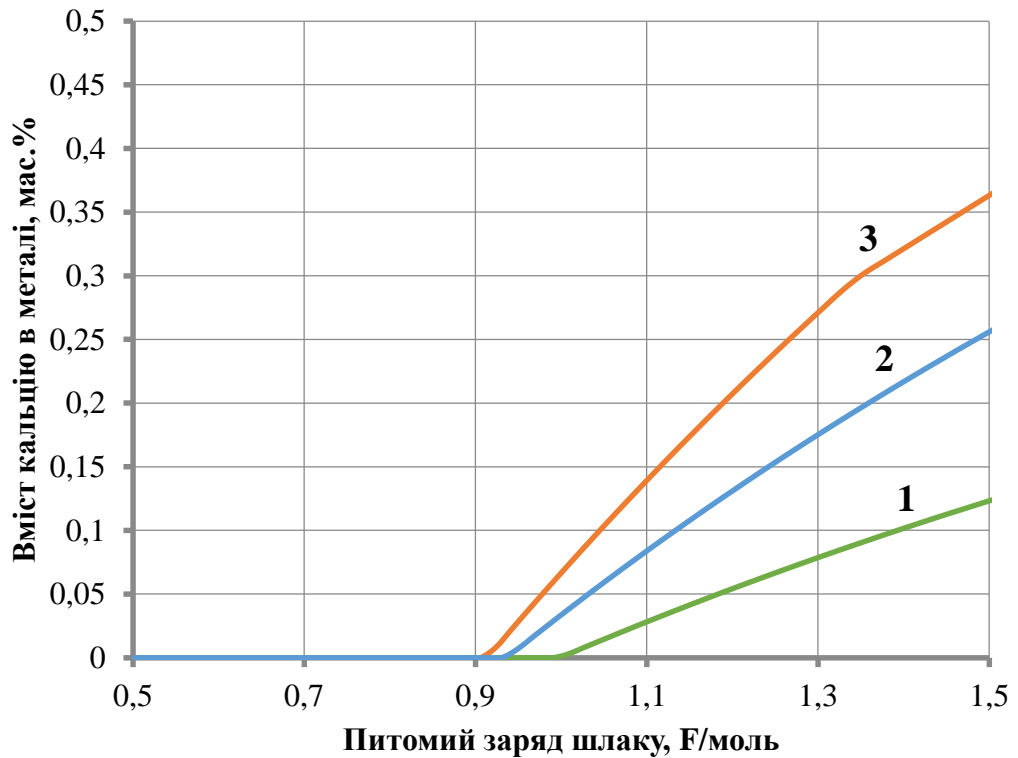


б) 2 атм

Рисунок 2.6 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в металі для сталі 30ГС

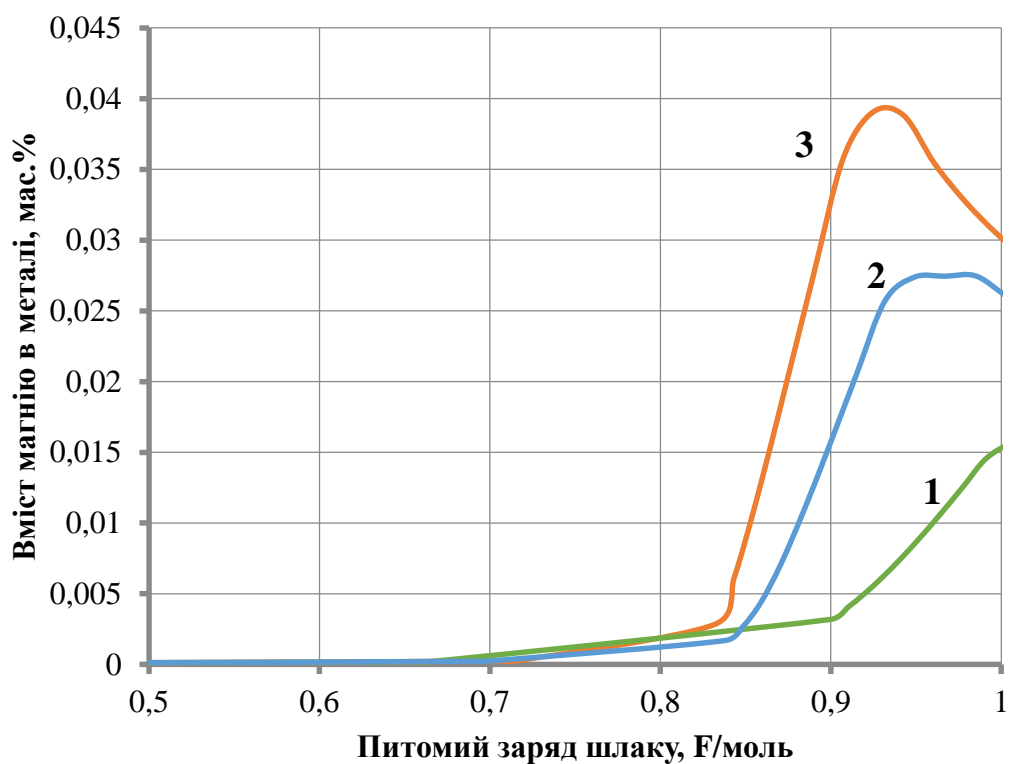


а) 1 атм

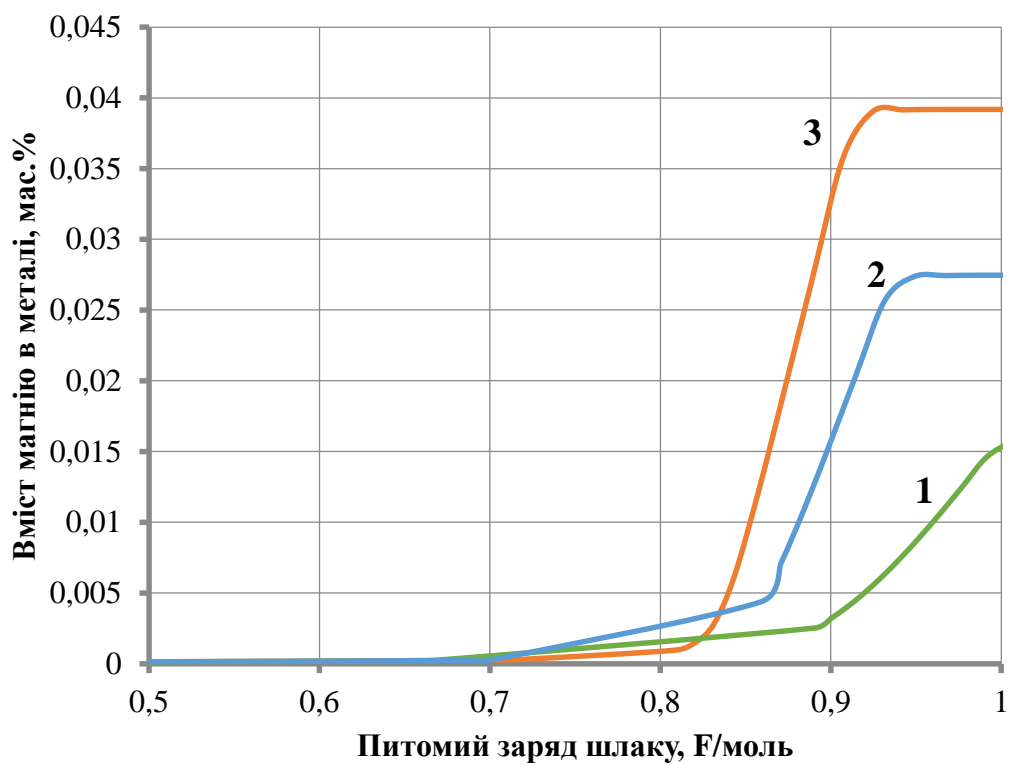


б) 2 атм

Рисунок 2.7 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в металі для сталі 09Г2С

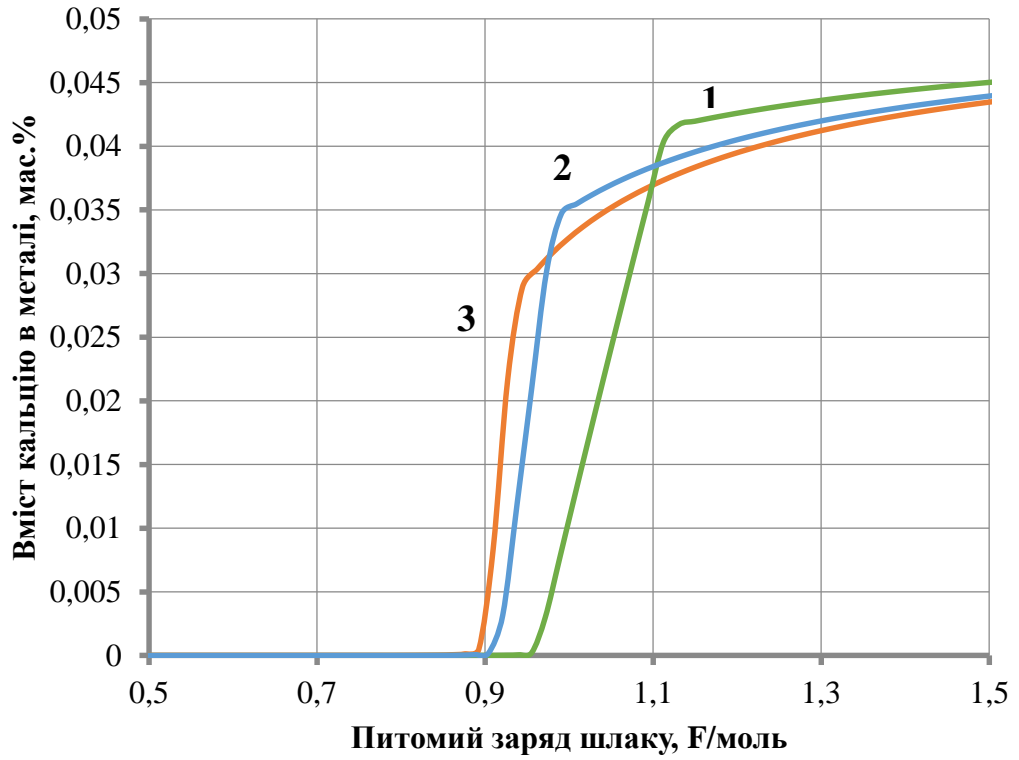


а) 1 атм

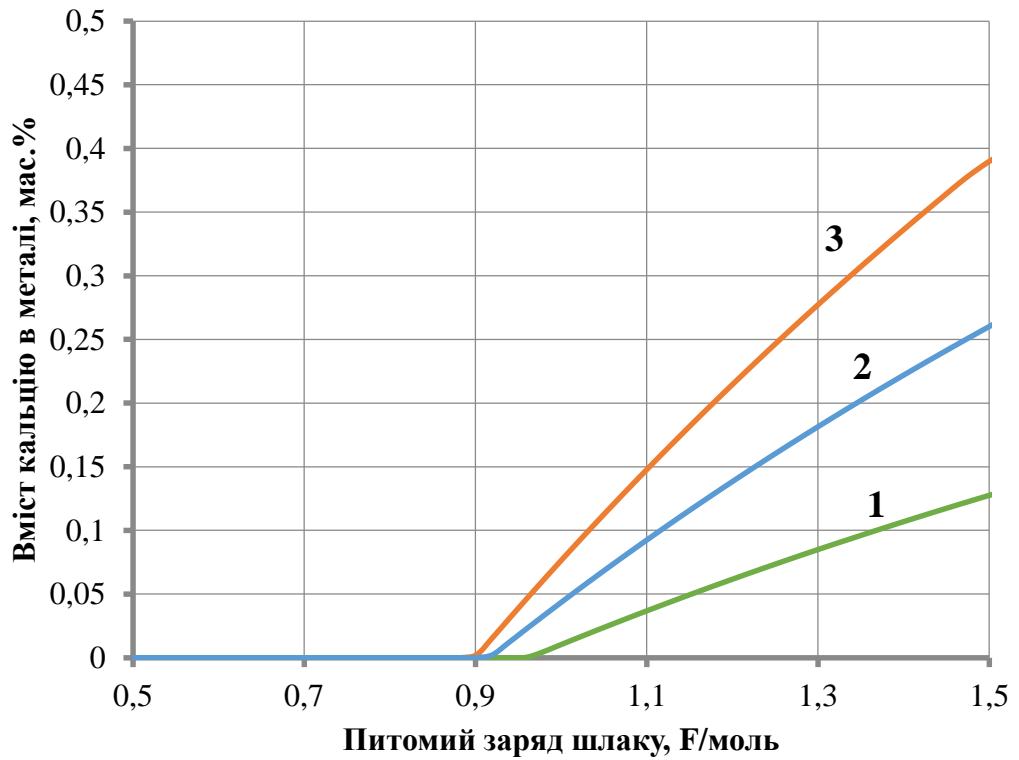


б) 2 атм

Рисунок 2.8 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в металі для сталі 09Г2С

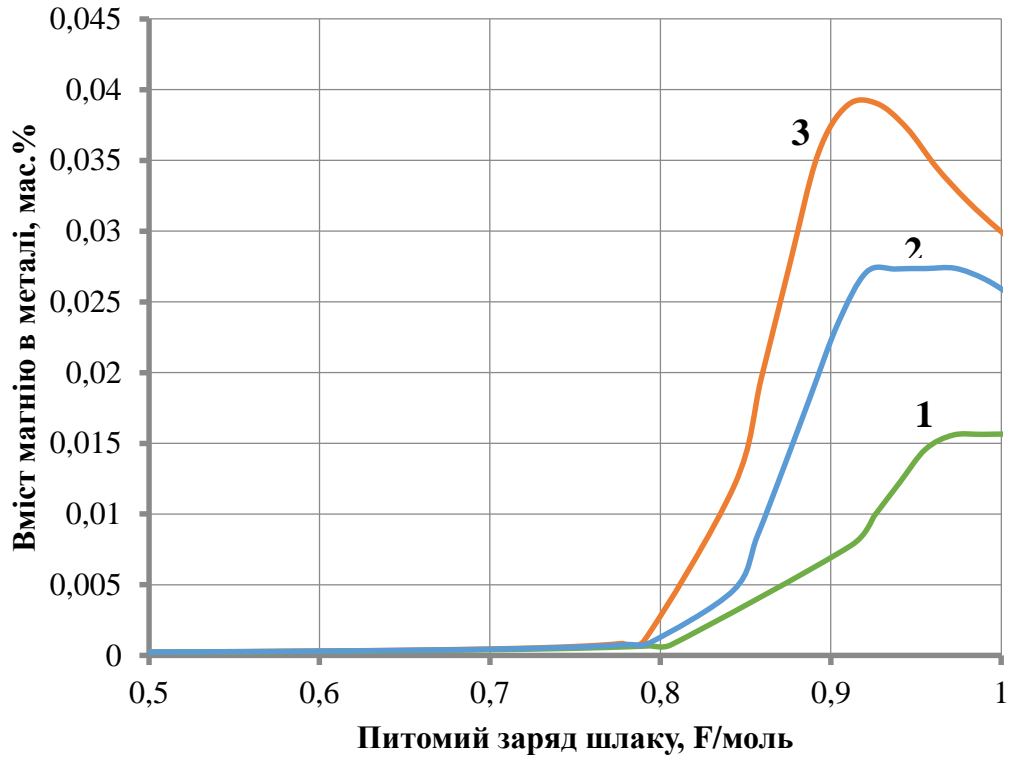


а) 1 атм

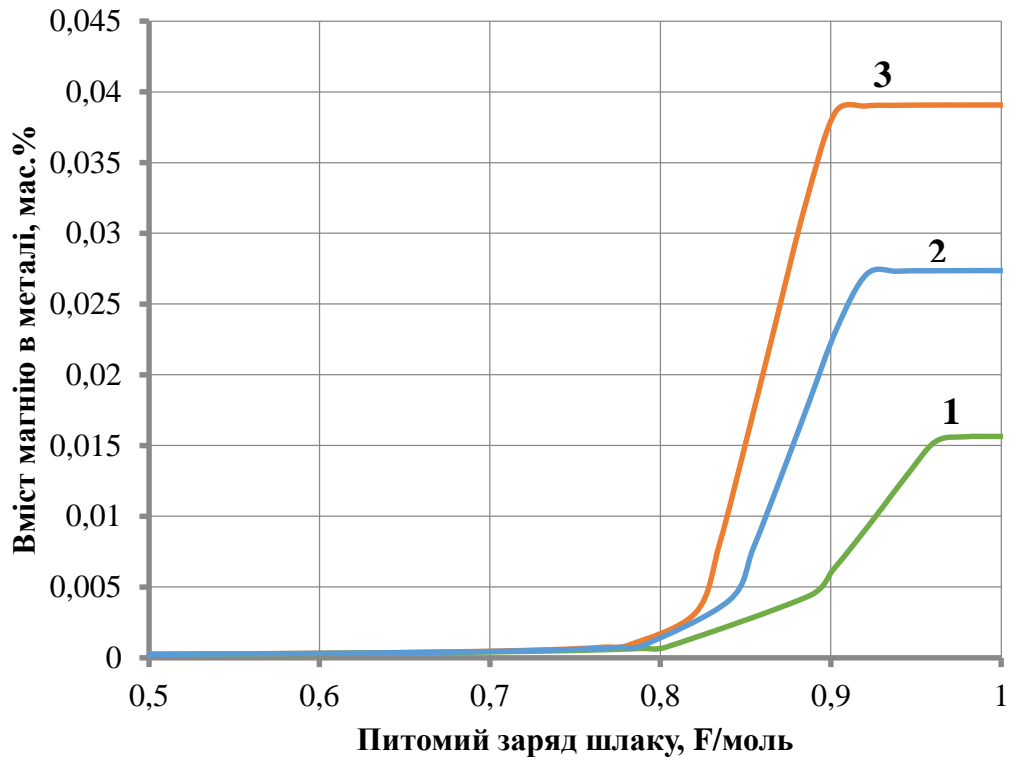


б) 2 атм

Рисунок 2.9 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в металі для сталі 35ХГСА



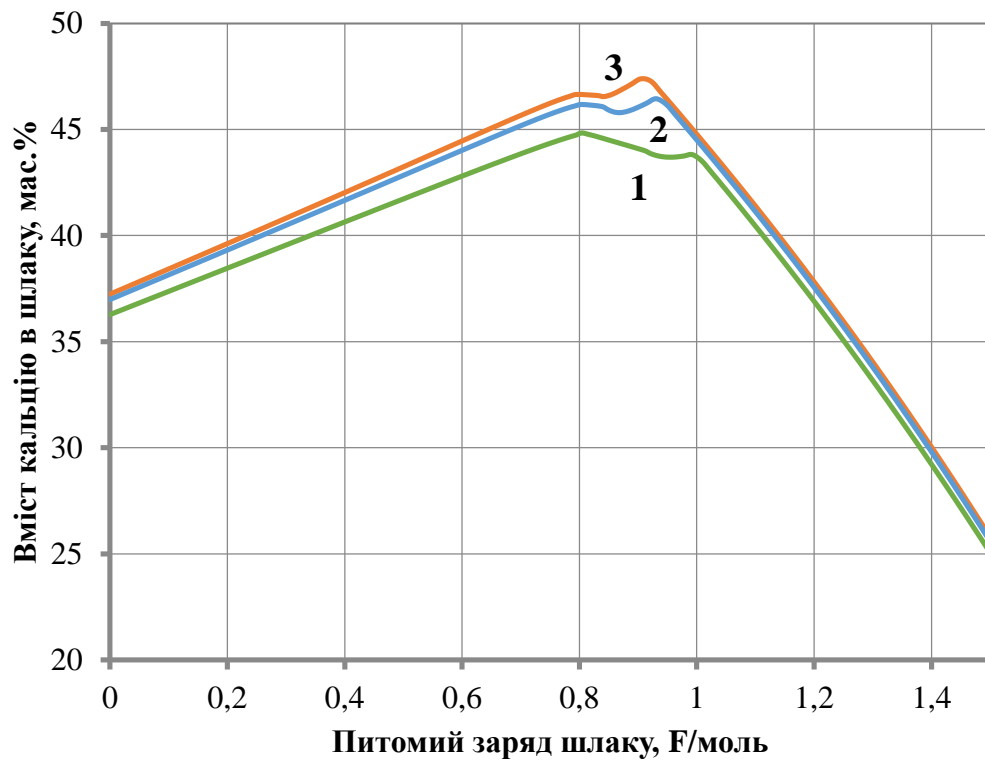
а) 1 атм



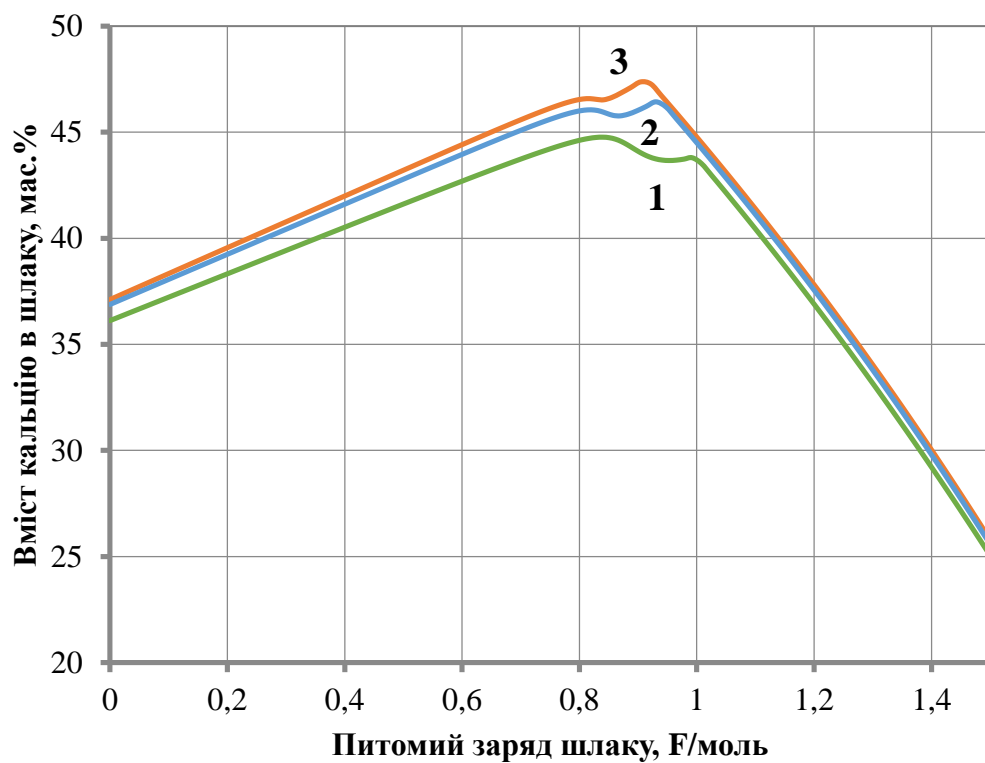
б) 2 атм

Рисунок 2.10 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в металі для сталі 35ХГСА

Вміст кальцію та магнію в шлаку

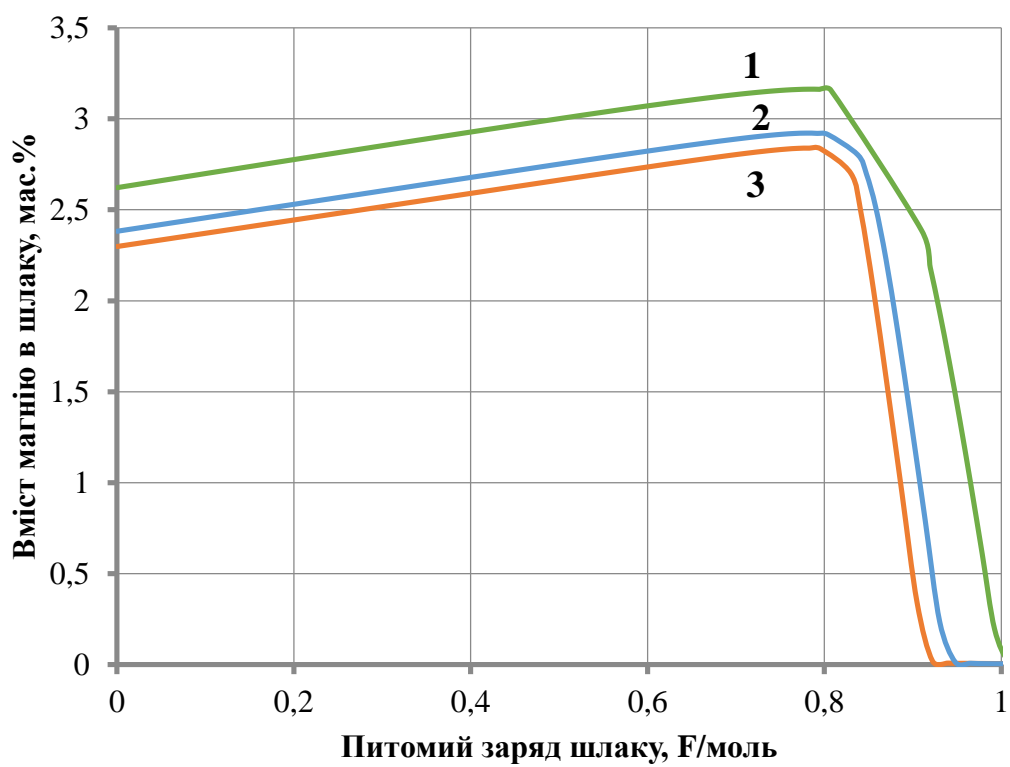


а) 1 атм

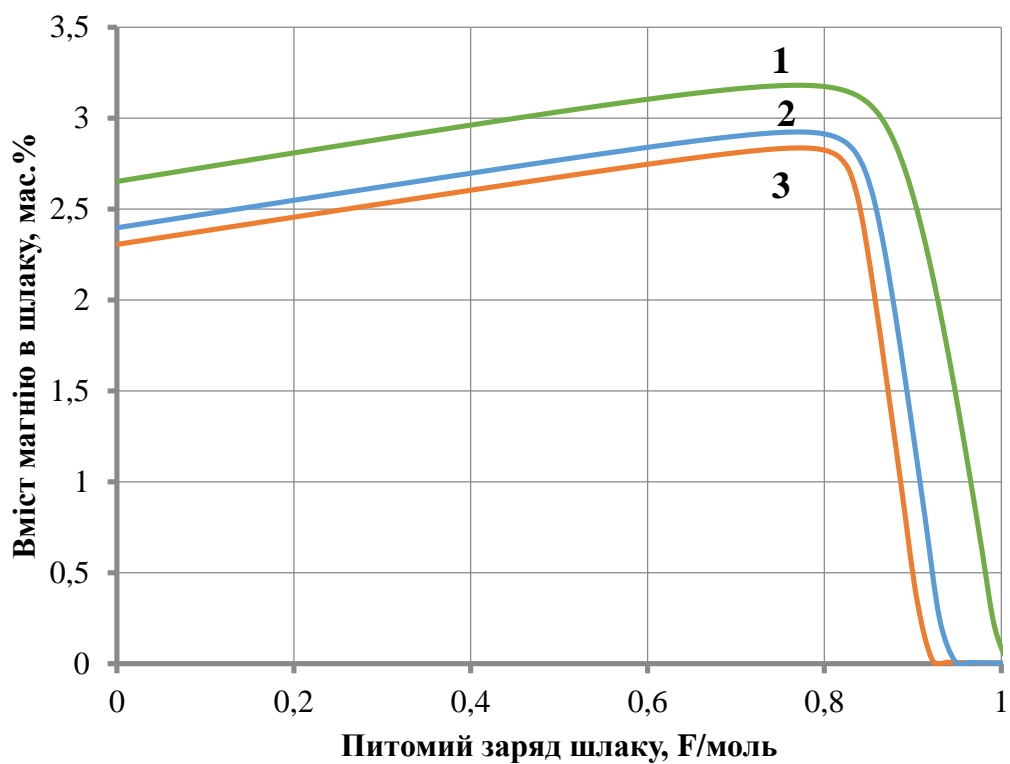


б) 2 атм

Рисунок 2.11 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в шлаку для сталі 12ГС

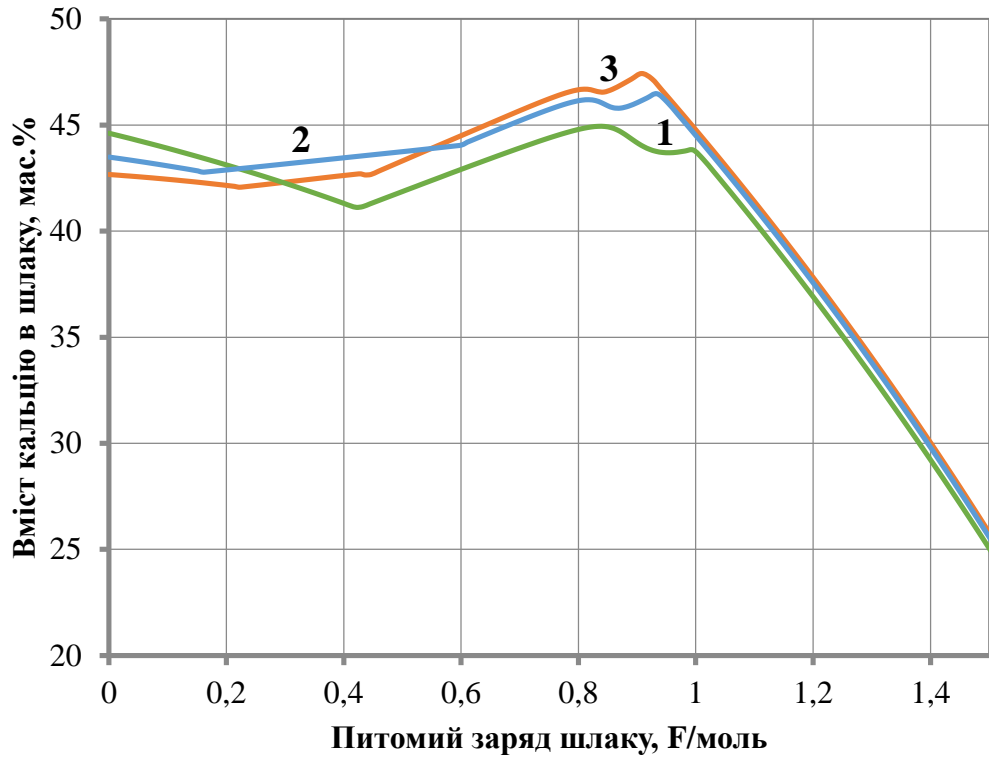


а) 1 атм

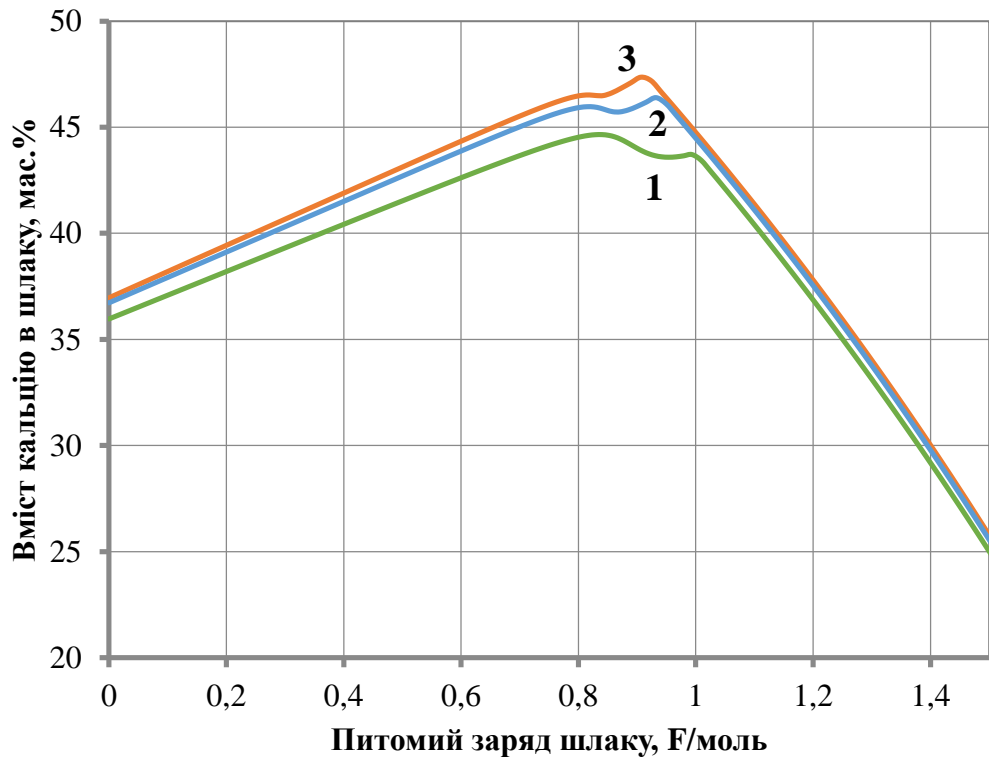


б) 2 атм

Рисунок 2.12 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в шлаку для сталі 12ГС

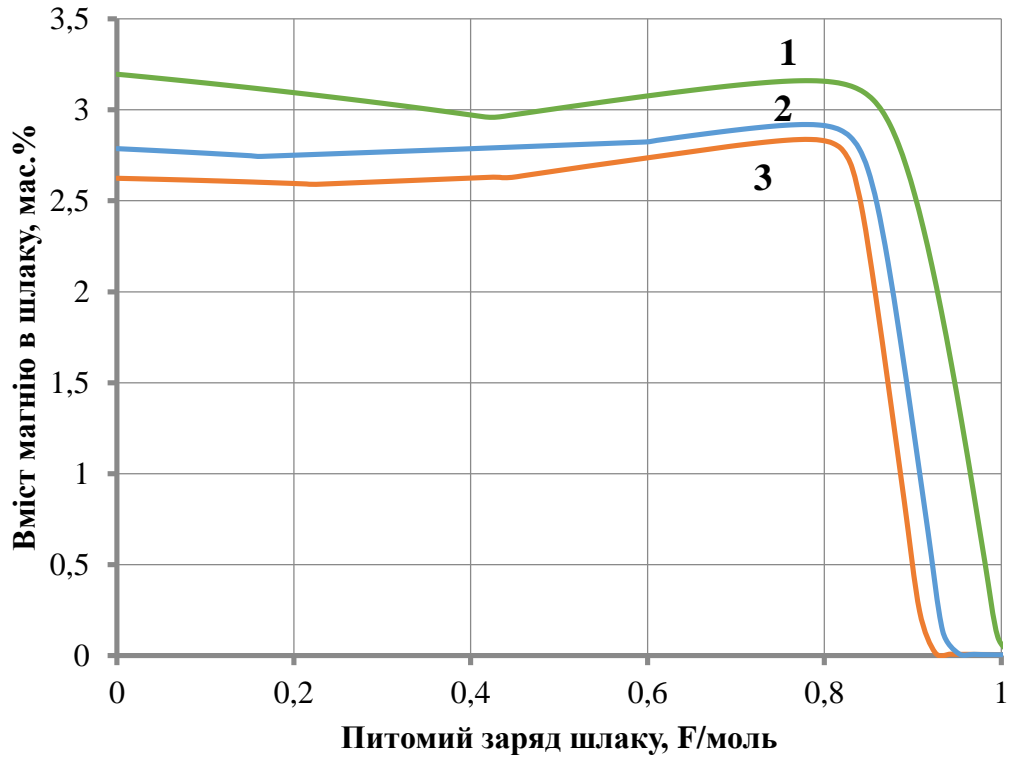


а) 1 атм

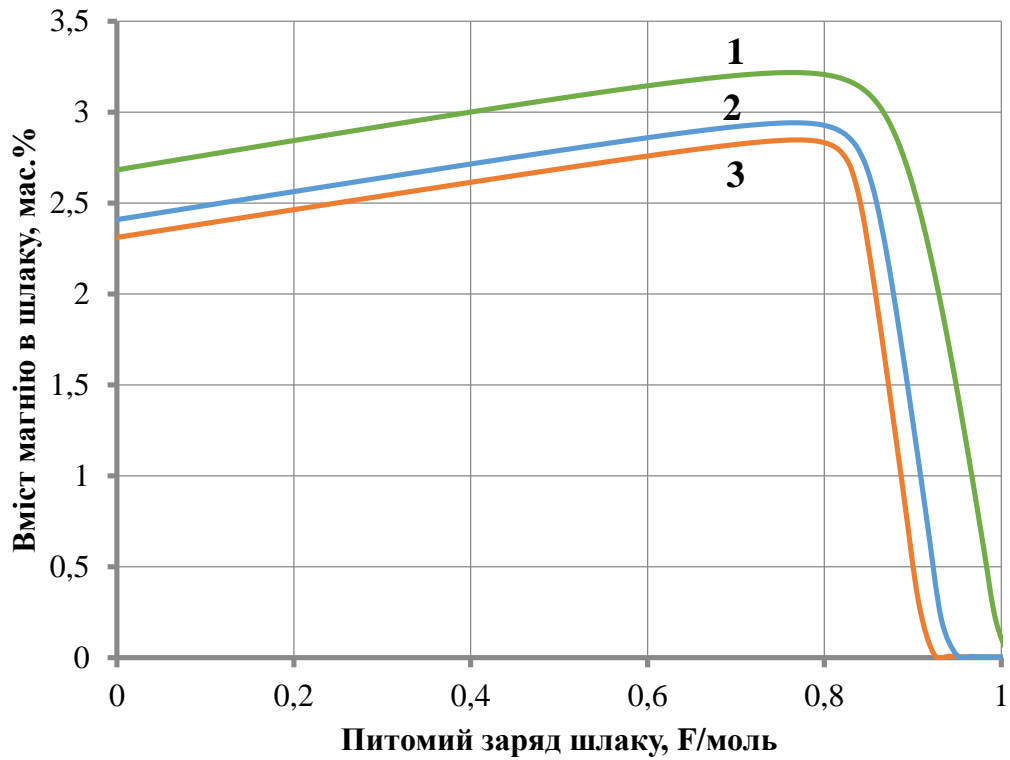


б) 2 атм

Рисунок 2.13 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в шлаку для сталі 30ГС

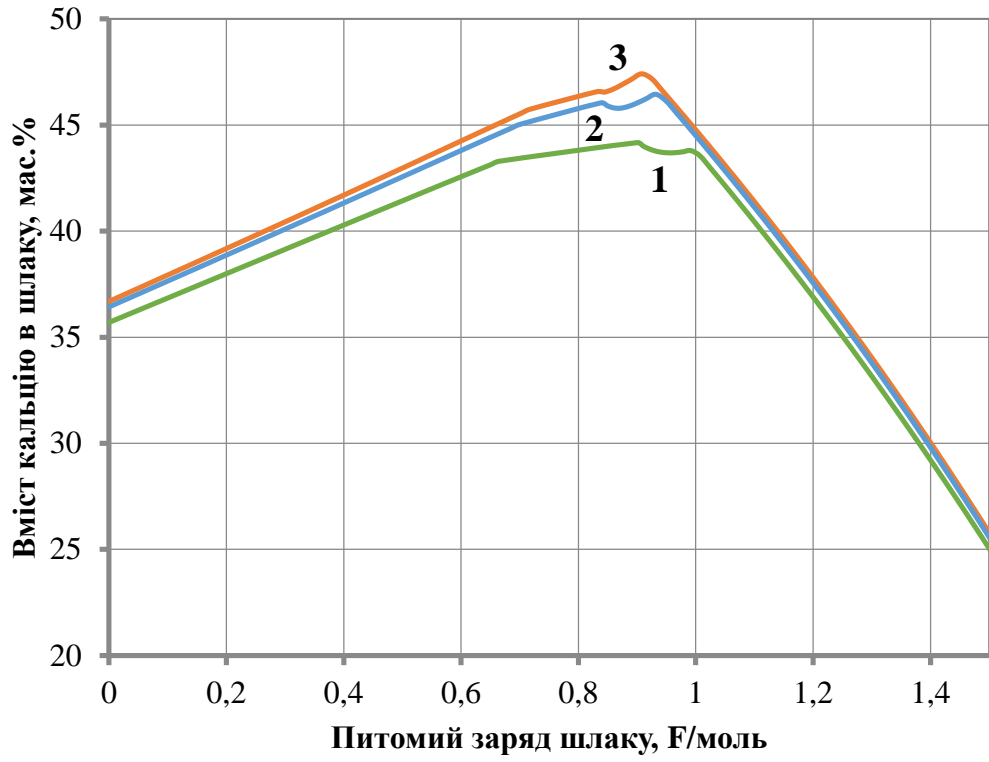


а) 1 атм

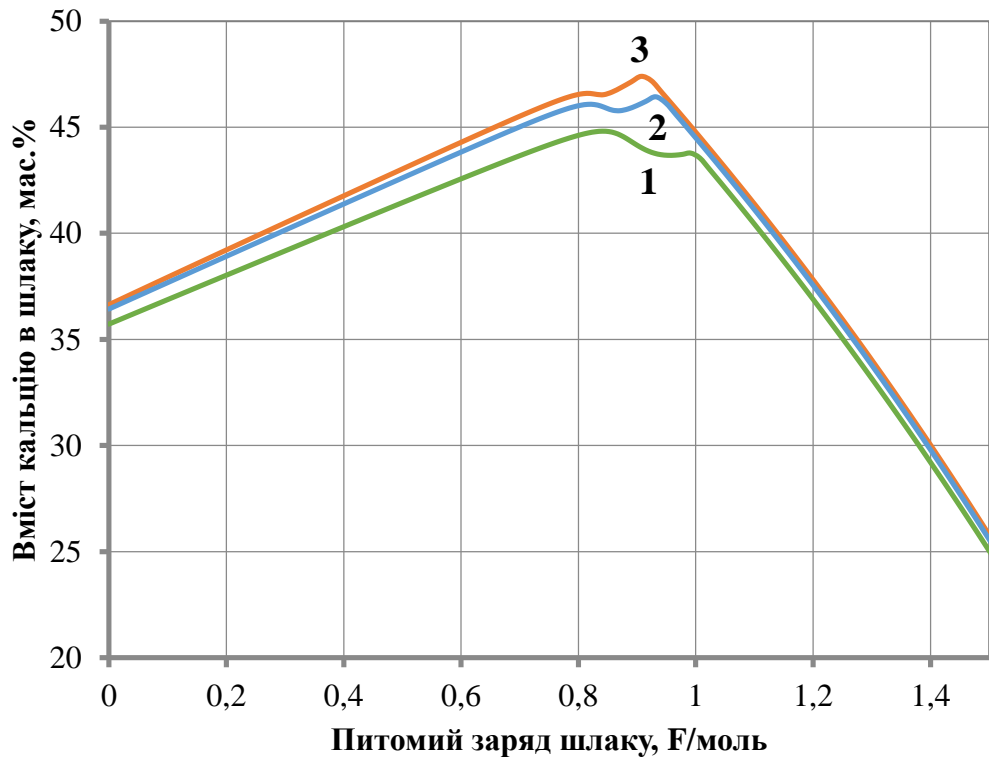


б) 2 атм

Рисунок 2.14 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в шлаку для сталі 30ГС

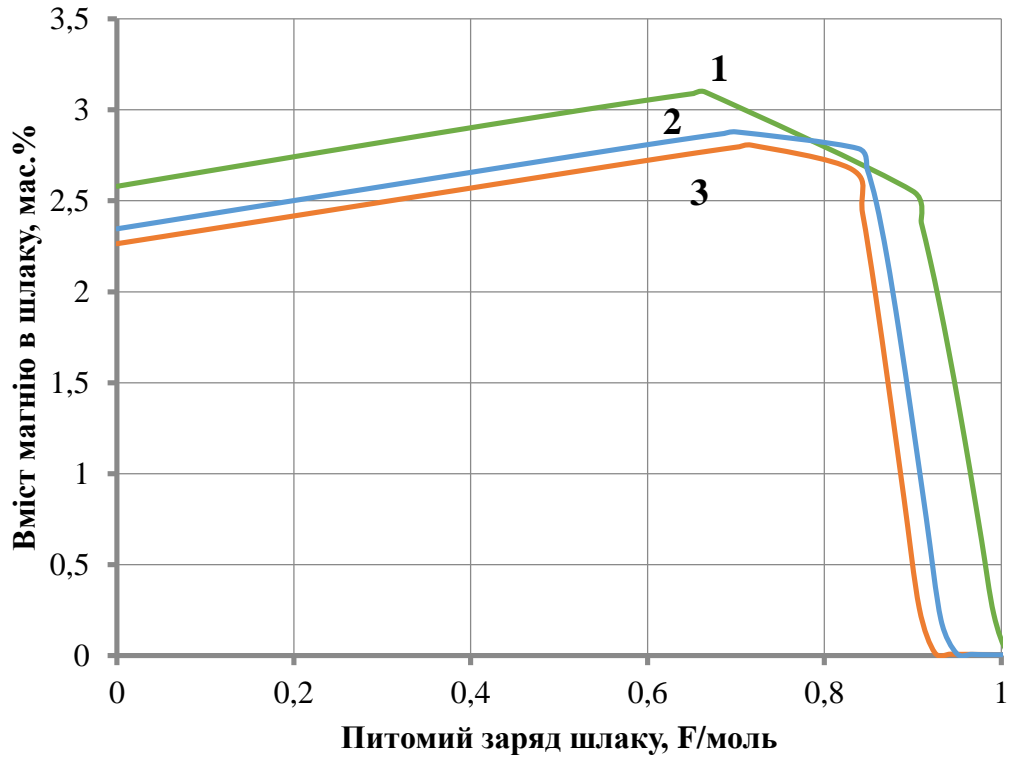


а) 1 атм

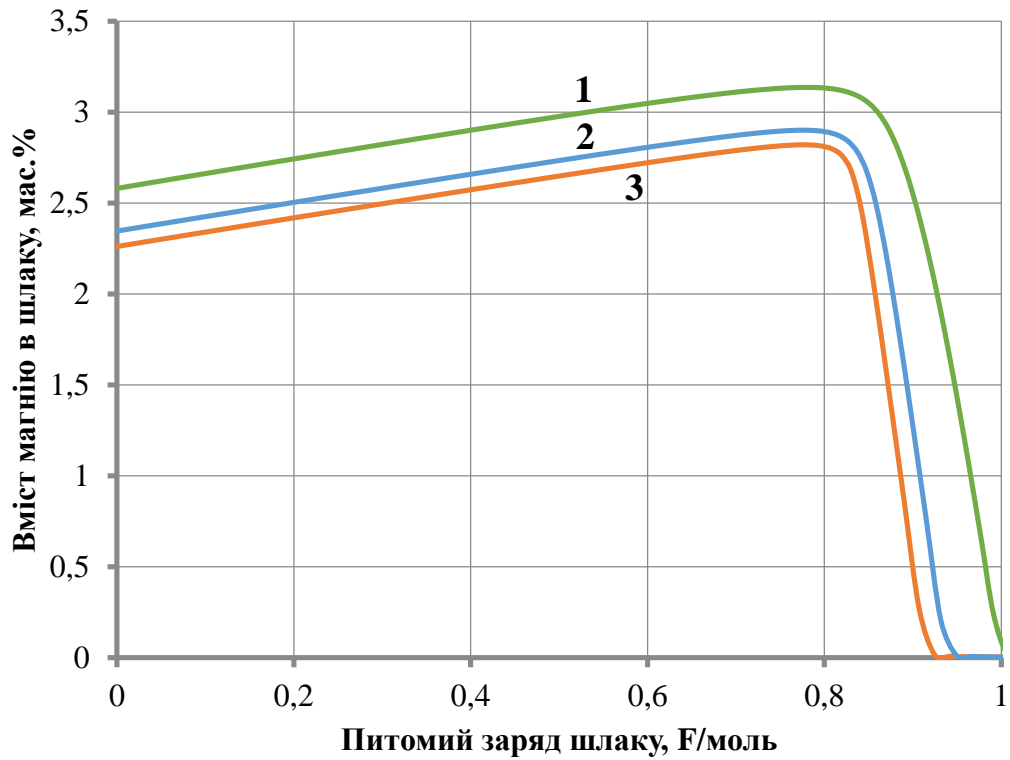


б) 2 атм

Рисунок 2.15 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в шлаку для сталі 09Г2С

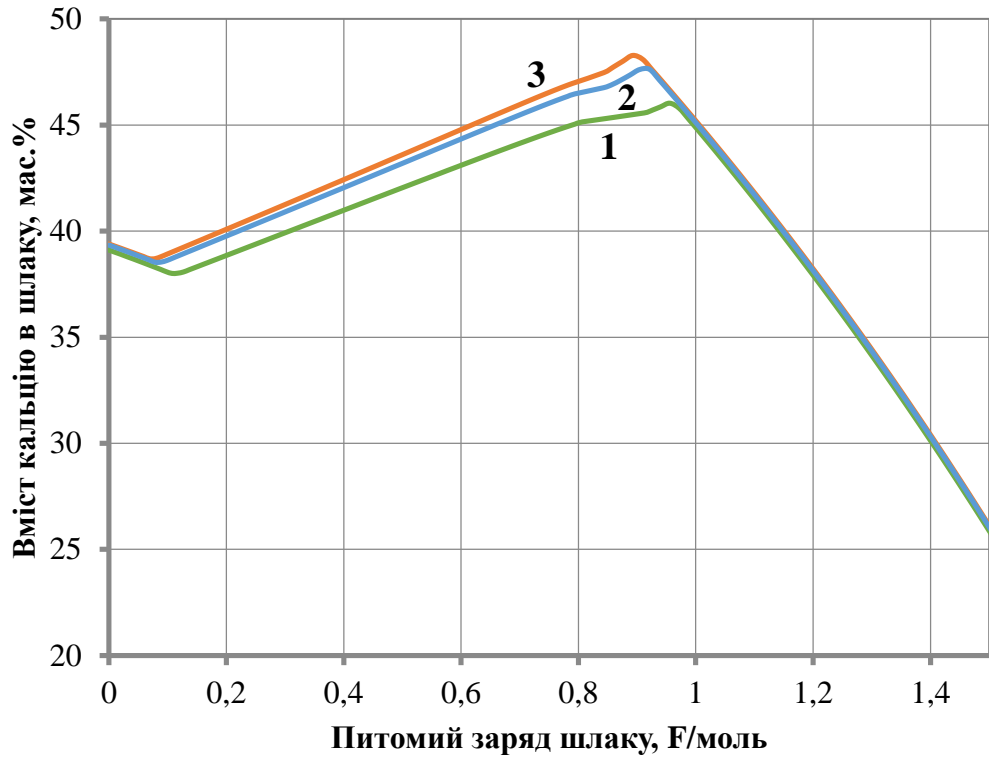


а) 1 атм

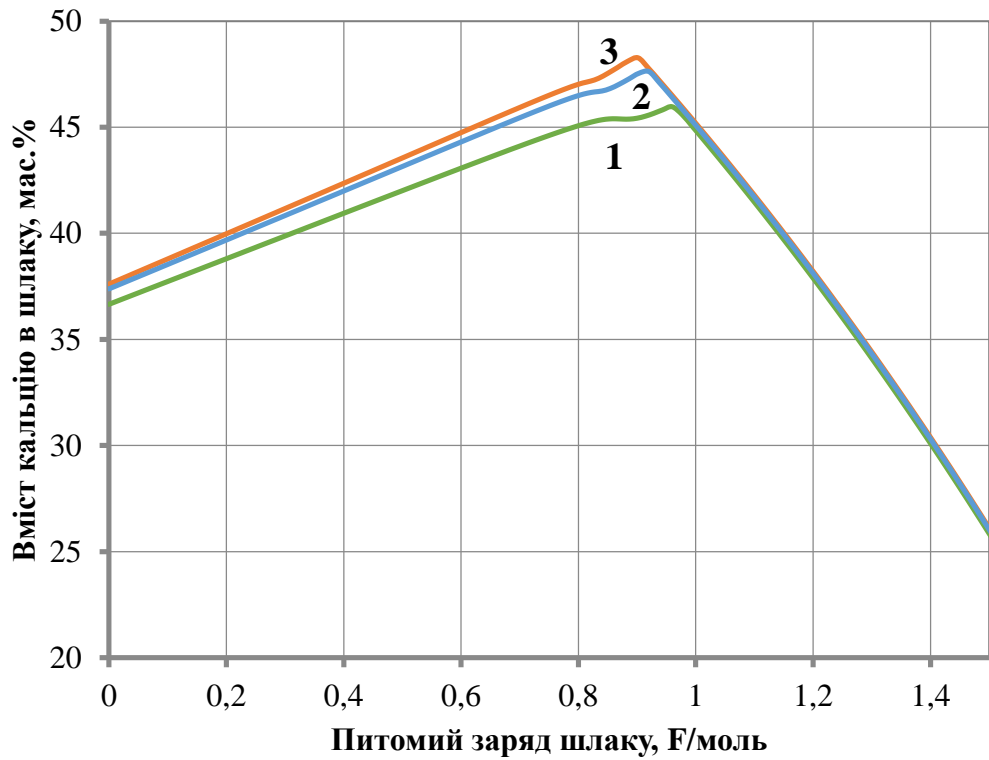


б) 2 атм

Рисунок 2.16 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в шлаку для сталі 09Г2С

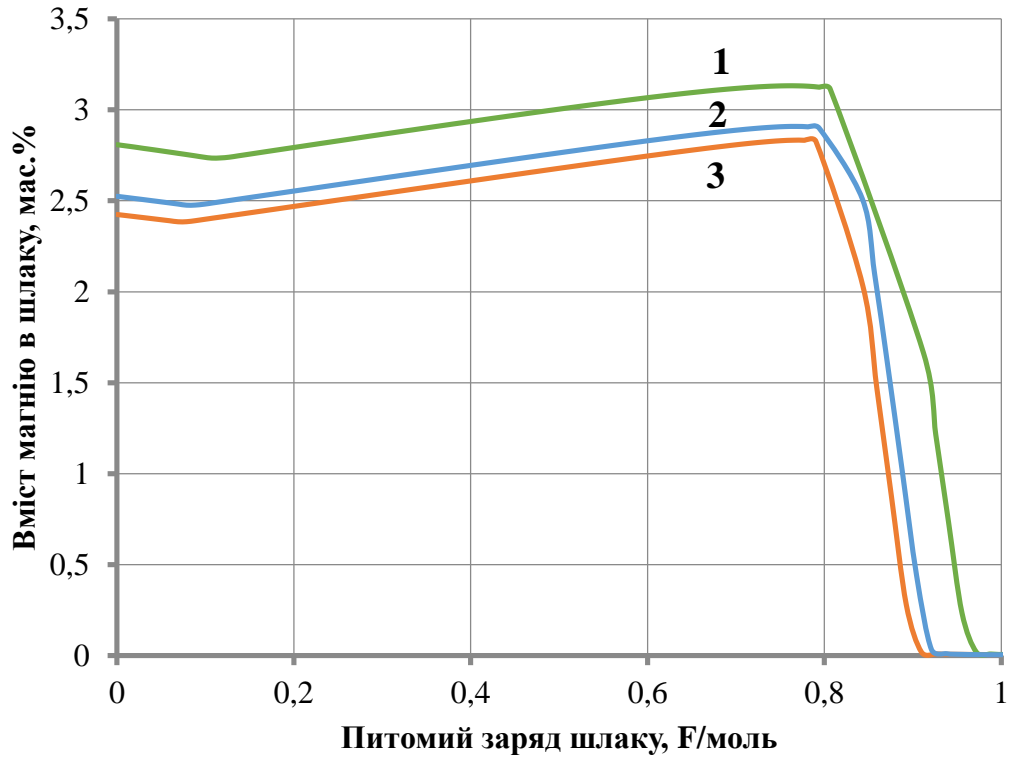


а) 1 атм

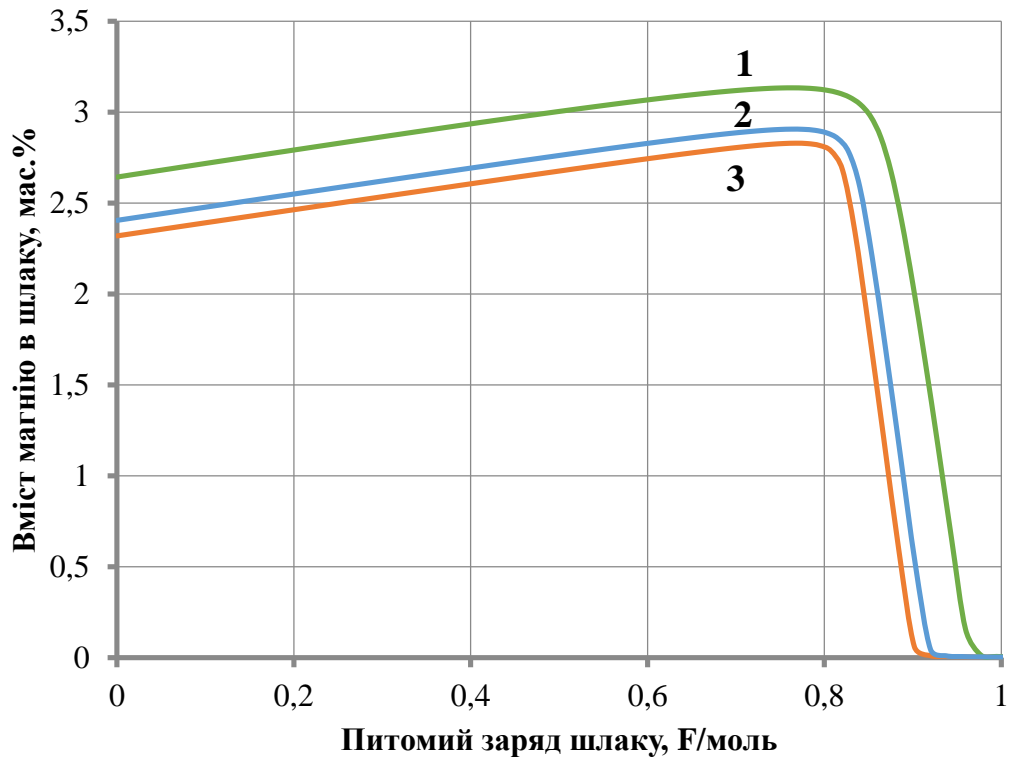


б) 2 атм

Рисунок 2.17 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Са в шлаку для сталі 35ХГСА



а) 1 атм



б) 2 атм

Рисунок 2.18 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст Mg в шлаку для сталі 35ХГСА

На рисунках 2.2 – 2.17 можна побачити, що кількість лужноземельних елементів в металі зростає при збільшенні питомого заряду та підвищенні тиску до 200 кПа, а маса шлаку, відповідно, зменшується.

Детально про ці залежності:

Кальцій (метал): - Звичайний зовнішній тиск (1 атм): при досягненні питомим зарядом шлаку значення 0,9 Ф/моль Са починає свій перехід в метал. За таких умов пікова кількість Са в металі становитиме 0,036%;

- Підвищений зовнішній тиск (2 атм): при підвищеному зовнішньому тиску системи перехід кальцію в метал починається при аналогічних 0,9 Ф/моль та невпинно зростає прямопропорційно підвищенню заряду шлаку. За таких умов можливо отримати понад 0,35% Са в металі.

Магній (метал): - Звичайний зовнішній тиск (1 атм): Mg починає свій перехід в метал приблизно при заряді шл. 0,8 Ф/моль. У цьому випадку кількість елементу в Ме буде рівна не більше 0,02%;

- Підвищений зовнішній тиск (2 атм): за умов підвищеного зовнішнього тиску з'являється можливість відновити понад 0,04 Mg.

Кальцій, Магній (шлак): При підвищенні питомого заряду маса Са і Mg в шлаку спочатку збільшується, а потім різко йде на спад. Це пояснюється тим, що відносний вміст елементів у шлаку підвищується разом з переходом Si та інших елементів в метал, а вже після їх відновлення починає знижуватись. Залежності для звичайного зовнішнього тиску та підвищеного практично ідентичні.

2.4.2 Оптимальна кількість матеріалів для низьколегованих сталей

На рисунках 2.19 – 2.38 показана зміна оптимальної кількості феросплавів, електроенергії та загальної вартості матеріалів в залежності від зміни питомого заряду та маси шлаку. Графіки були побудовані для сталей: 12ГС, 30ГС, 09Г2С, 35ХГСА. Дослід проводився при підвищеному зовнішньому тиску величиною в 2 атм. для мас шлаку: 1, 2 і 3 тонни.

Оптимальна кількість матеріалів для сталі 12ГС

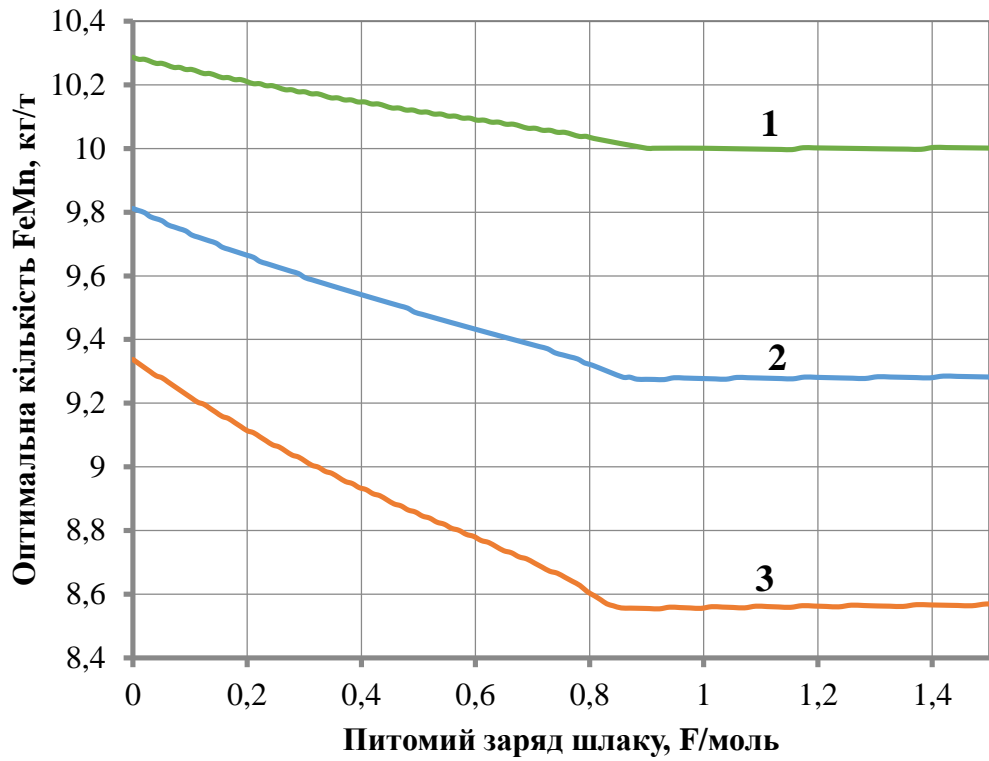


Рисунок 2.19 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeMn для сталі 12ГС

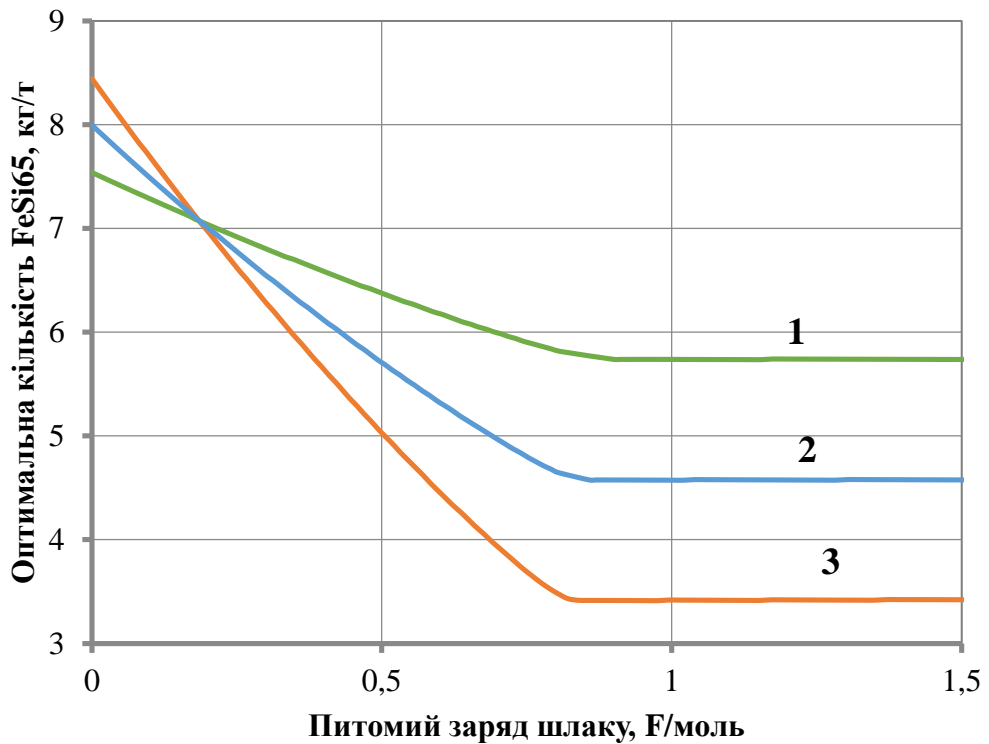


Рисунок 2.20 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeSi65 для сталі 12ГС

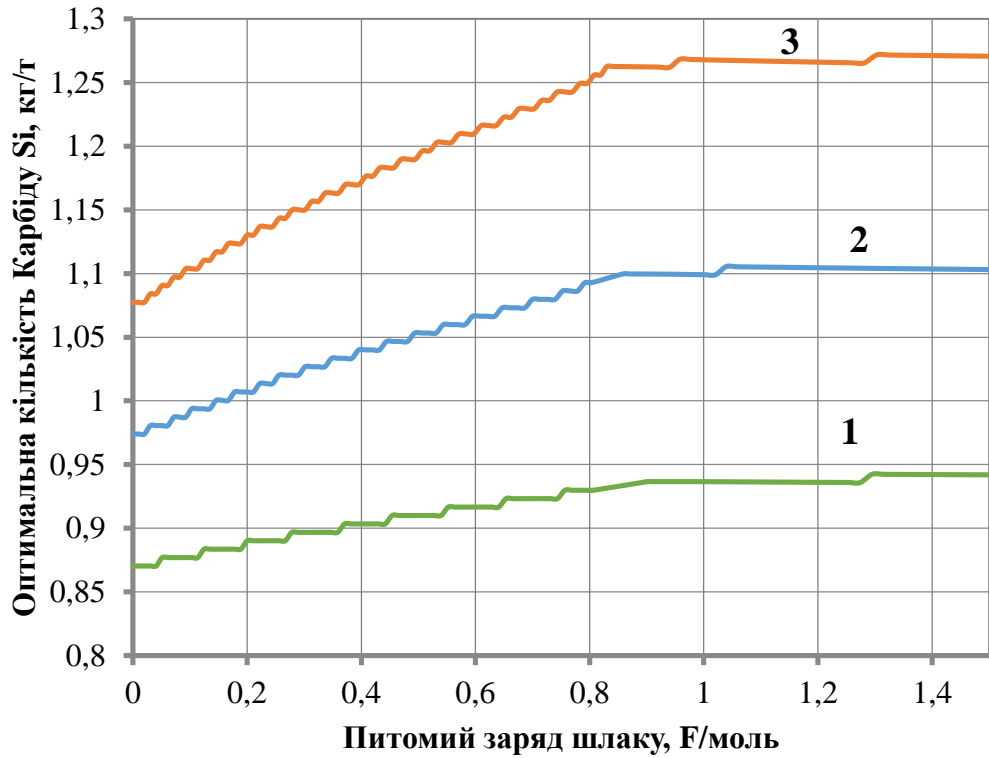


Рисунок 2.21 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість карбіду Si для сталі 12ГС

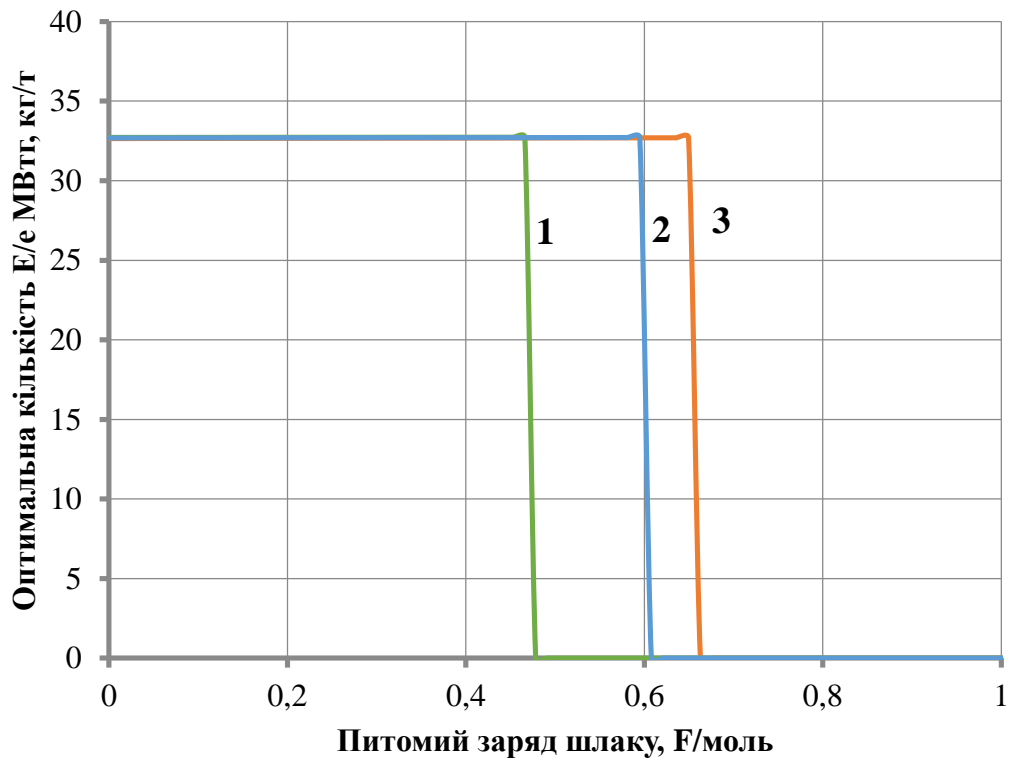


Рисунок 2.22 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість електроенергії для сталі 12ГС

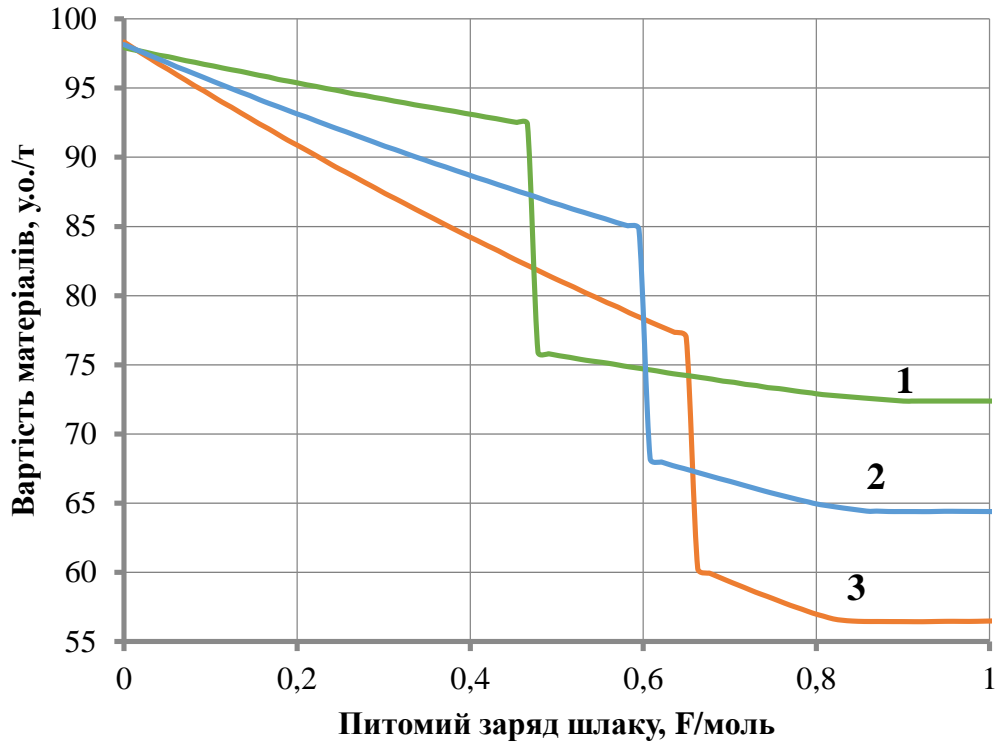


Рисунок 2.23 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну вартість матеріалів для сталі 12ГС

Оптимальна кількість матеріалів для сталі 30ГС

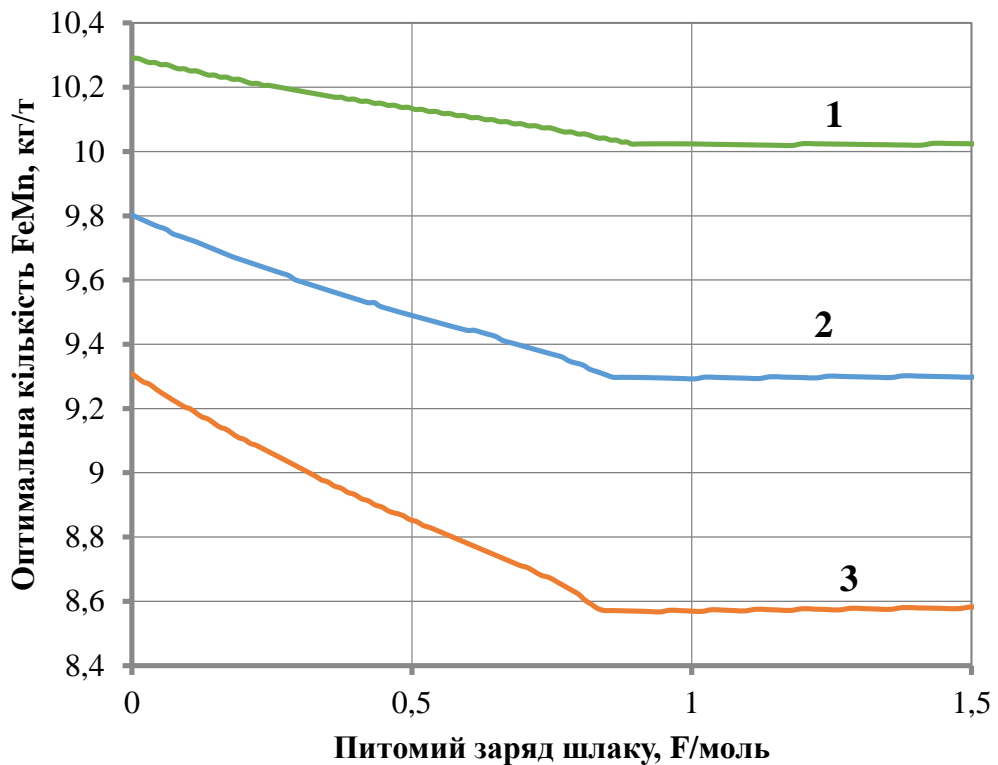


Рисунок 2.24 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeMn для сталі 30ГС

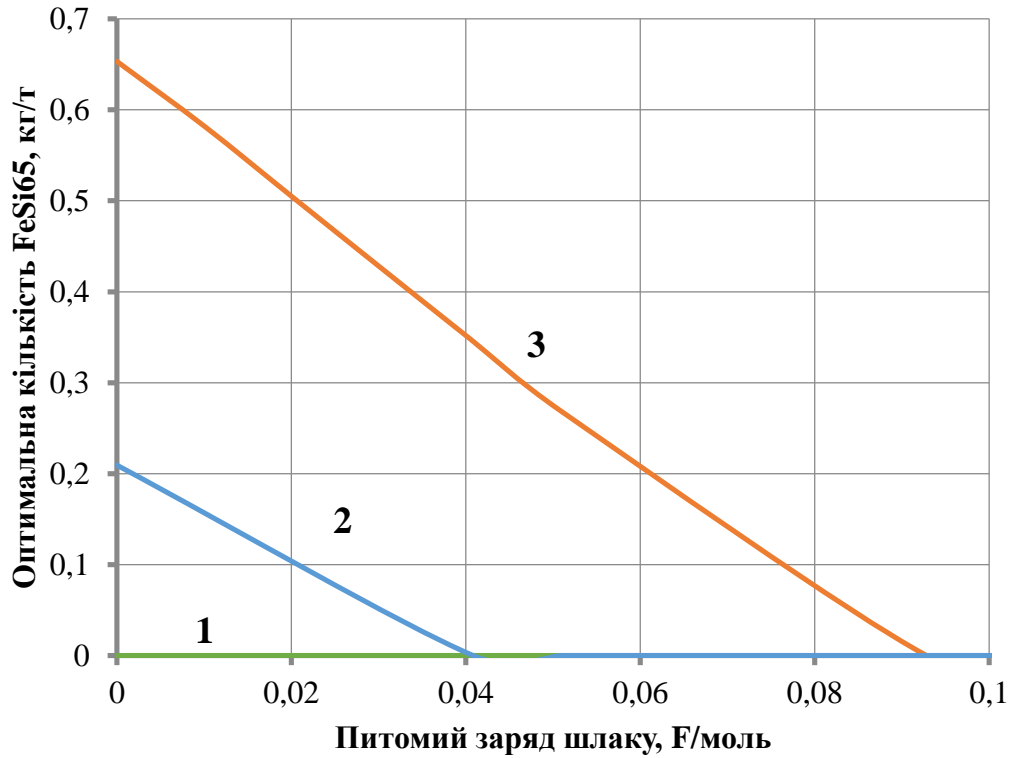


Рисунок 2.25 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeSi65 для сталі 30ГС

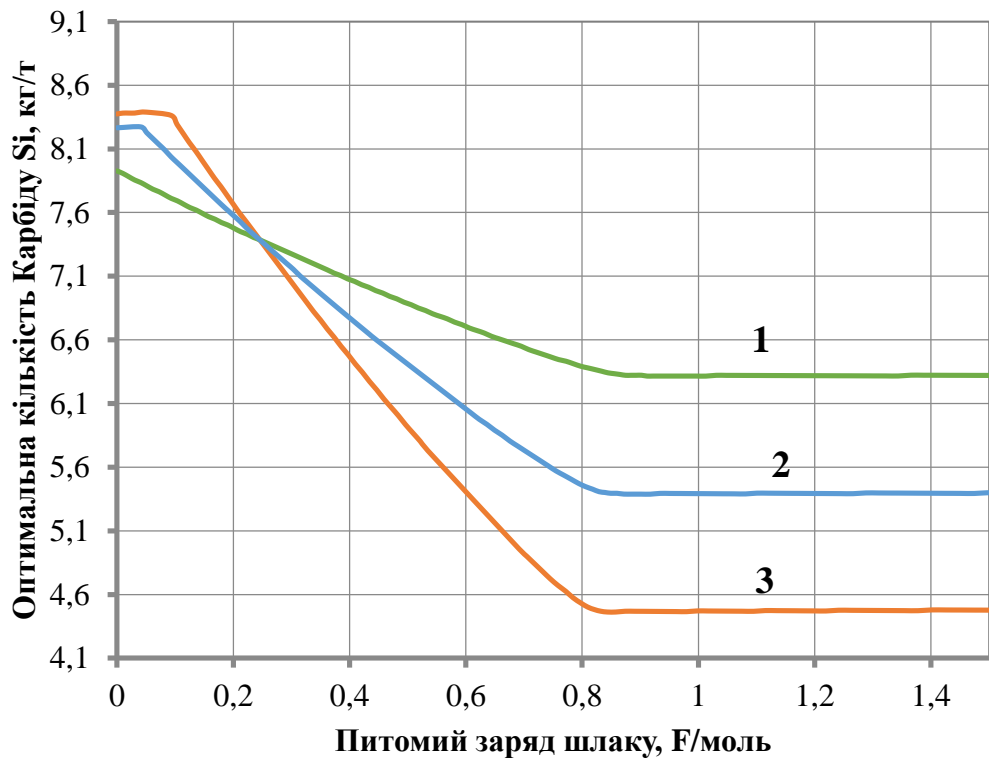
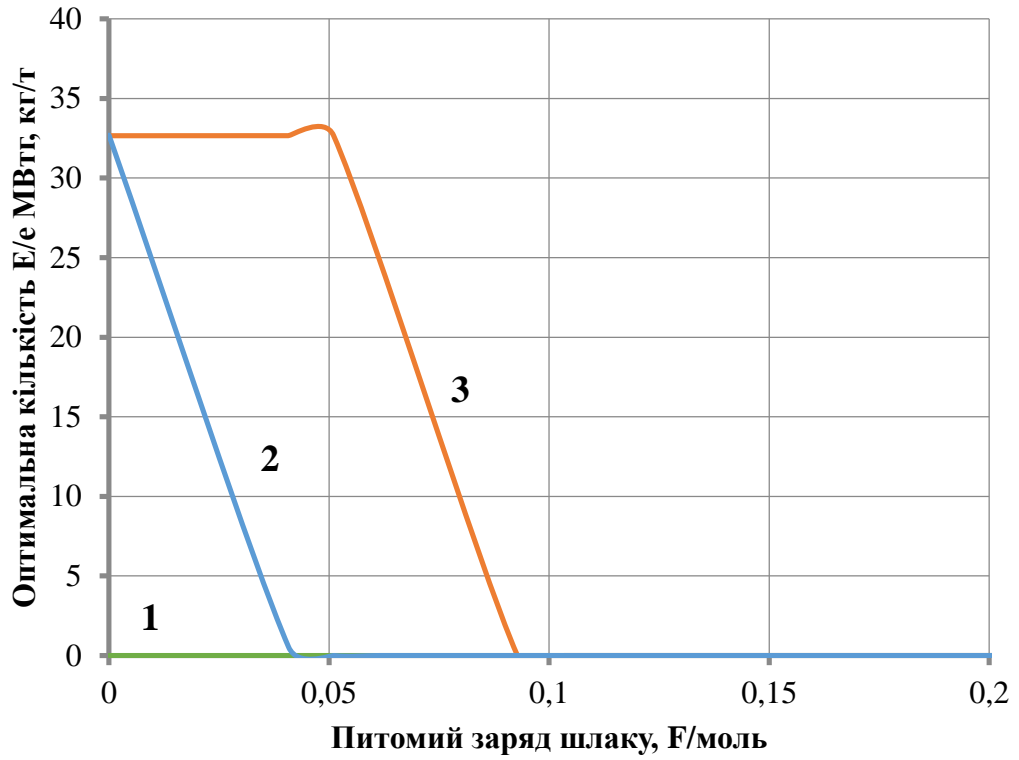
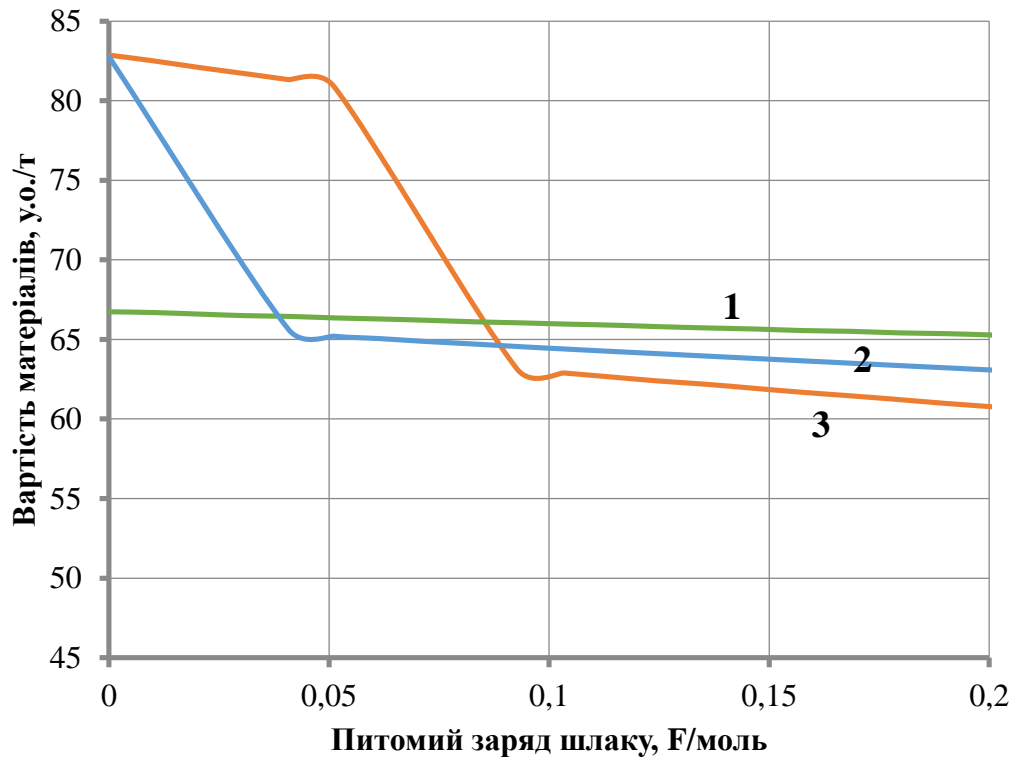


Рисунок 2.26 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість карбиду Si для сталі 30ГС

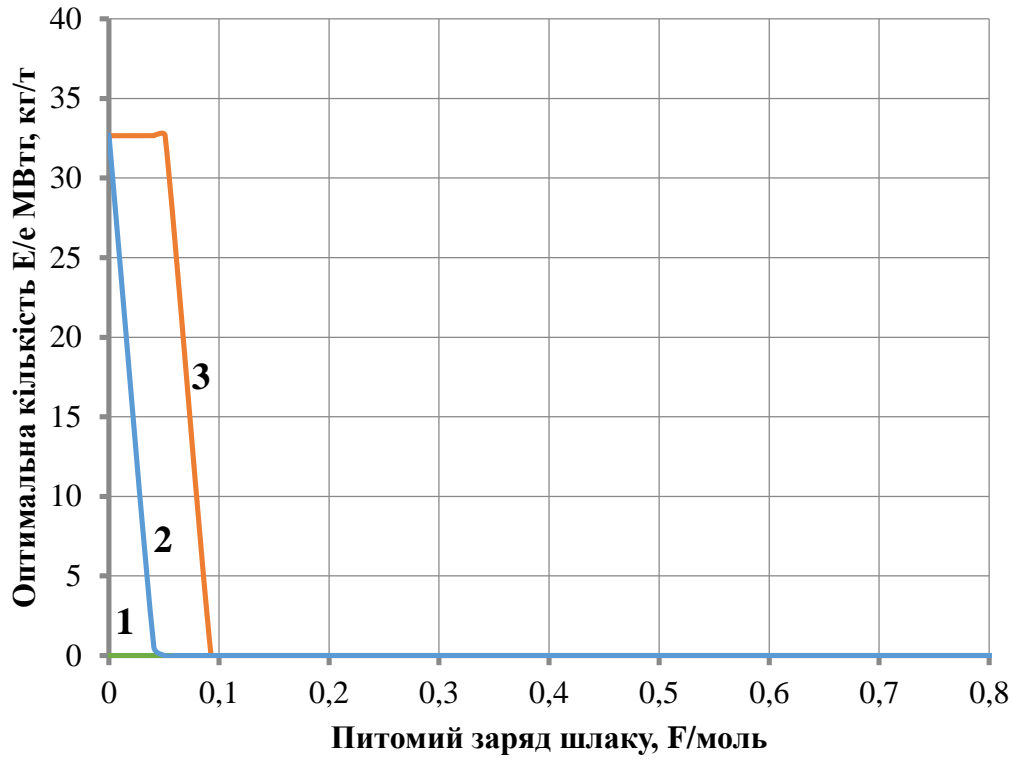


а) Кількість електроенергії

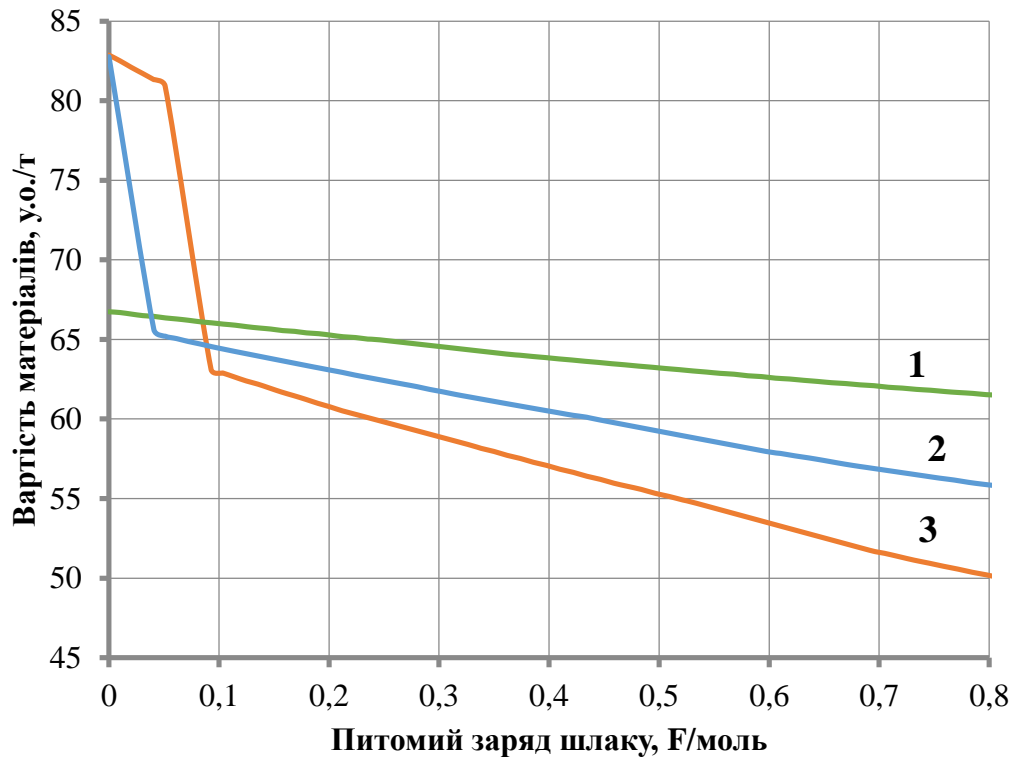


б) Вартість матеріалів

Рисунок 2.27 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальні показники для сталі 30ГС (в інтервалі від 0 до 0,2)



а) Кількість електроенергії



б) Вартість матеріалів

Рисунок 2.28 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальні показники для сталі 30ГС (в інтервалі від 0 до 0,8)

Оптимальна кількість матеріалів для сталі 09Г2С

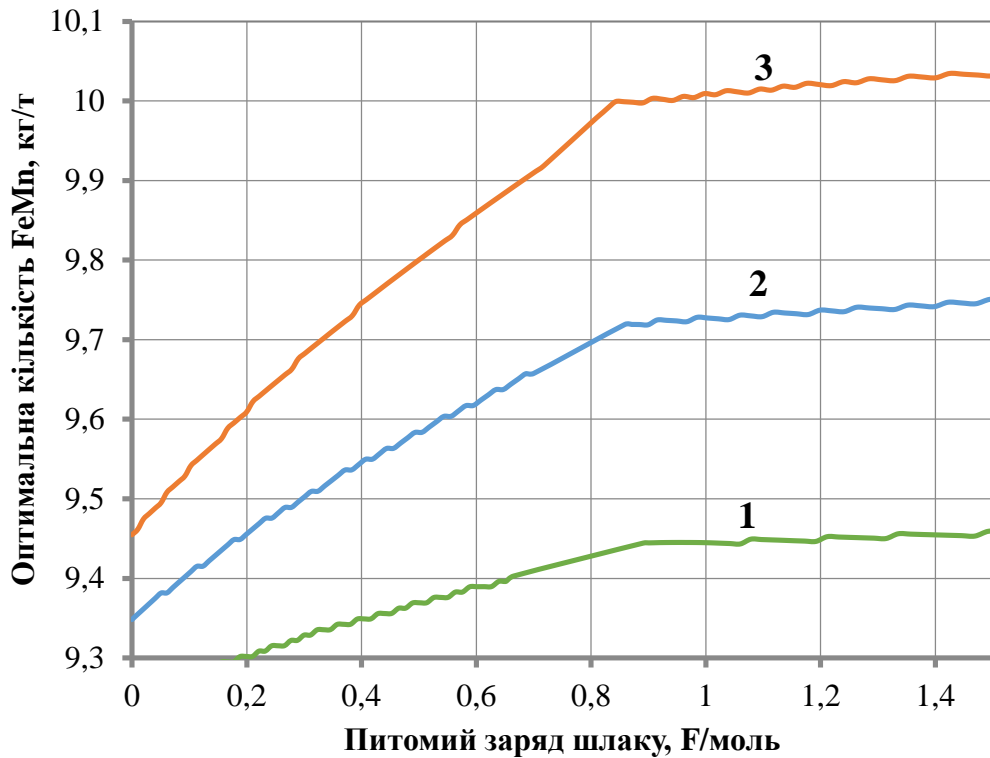


Рисунок 2.29 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeMn для сталі 09Г2С

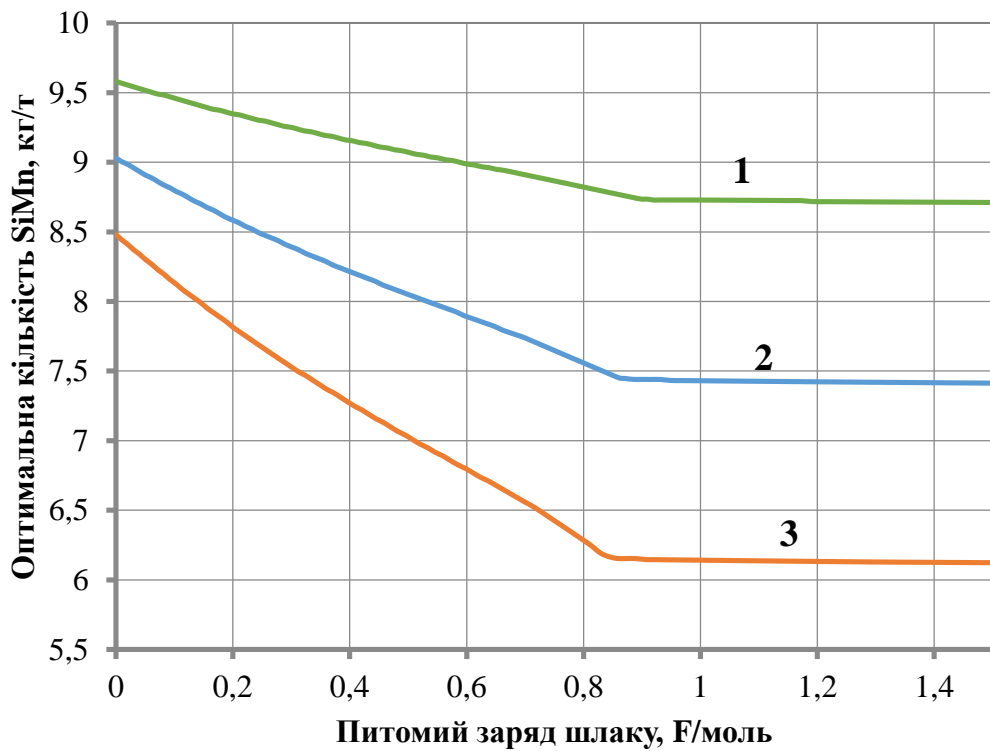


Рисунок 2.30 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість SiMn для сталі 09Г2С

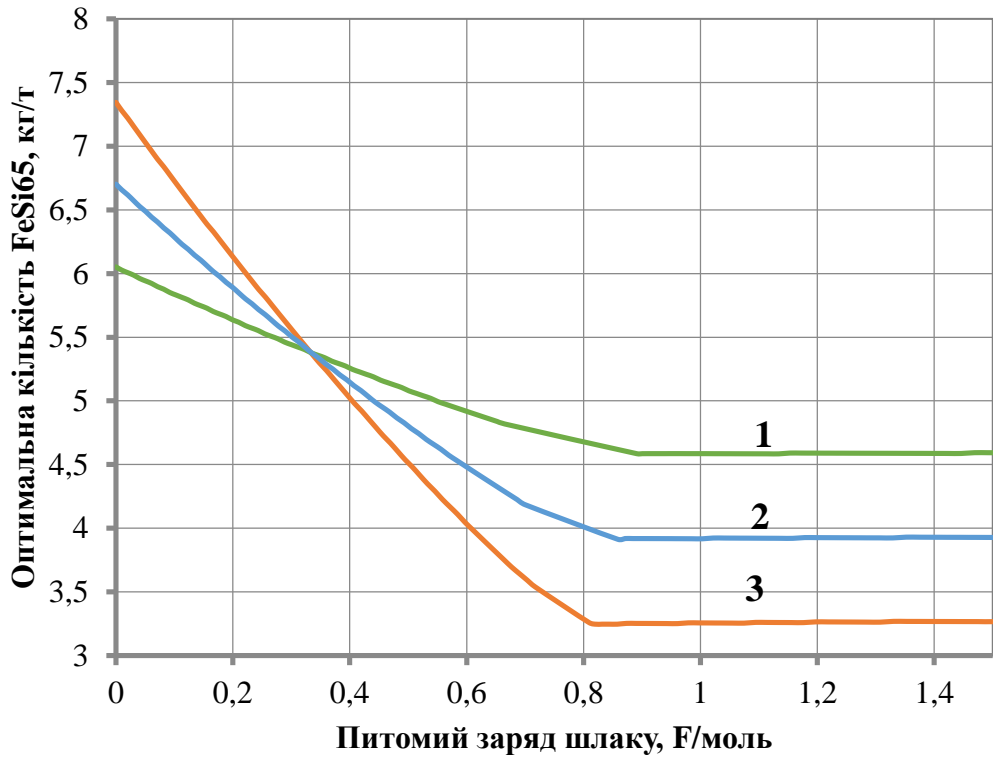


Рисунок 2.31 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeSi65 для сталі 09Г2С

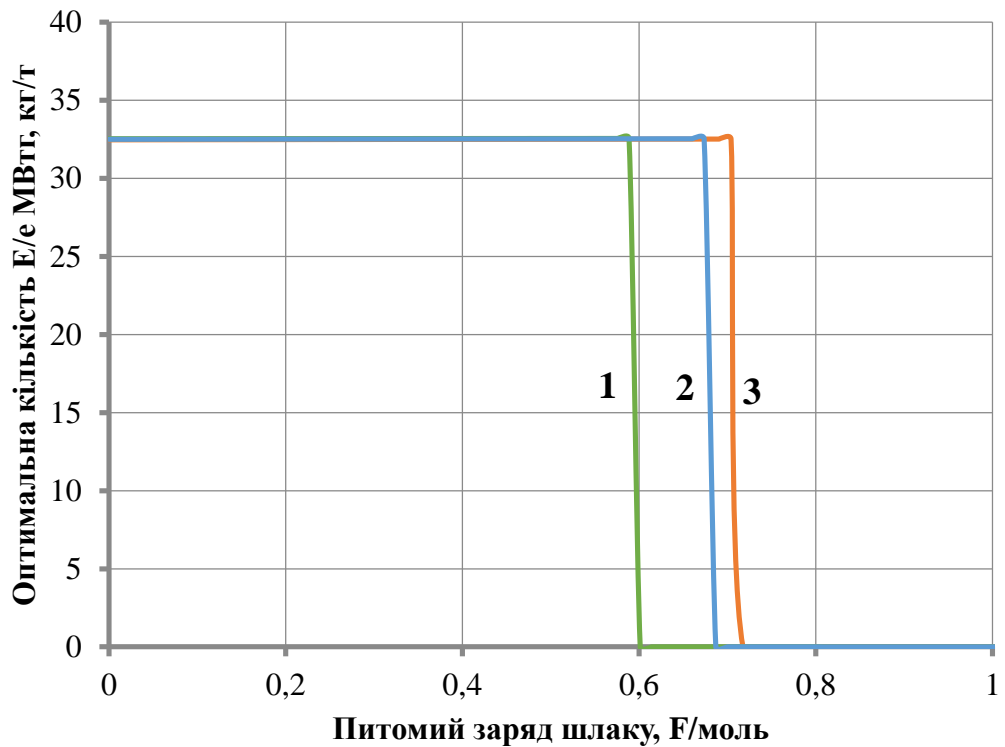


Рисунок 2.32 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість електроенергії для сталі 09Г2С

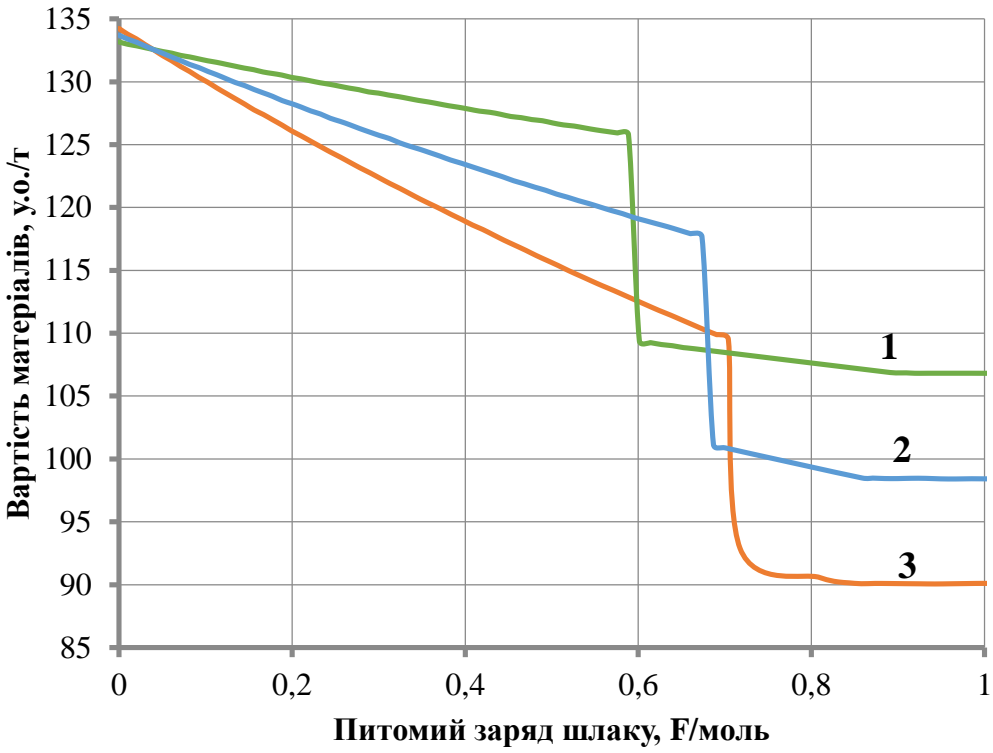


Рисунок 2.33 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну вартість матеріалів для сталі 09Г2С

Оптимальна кількість матеріалів для сталі 35ХГСА

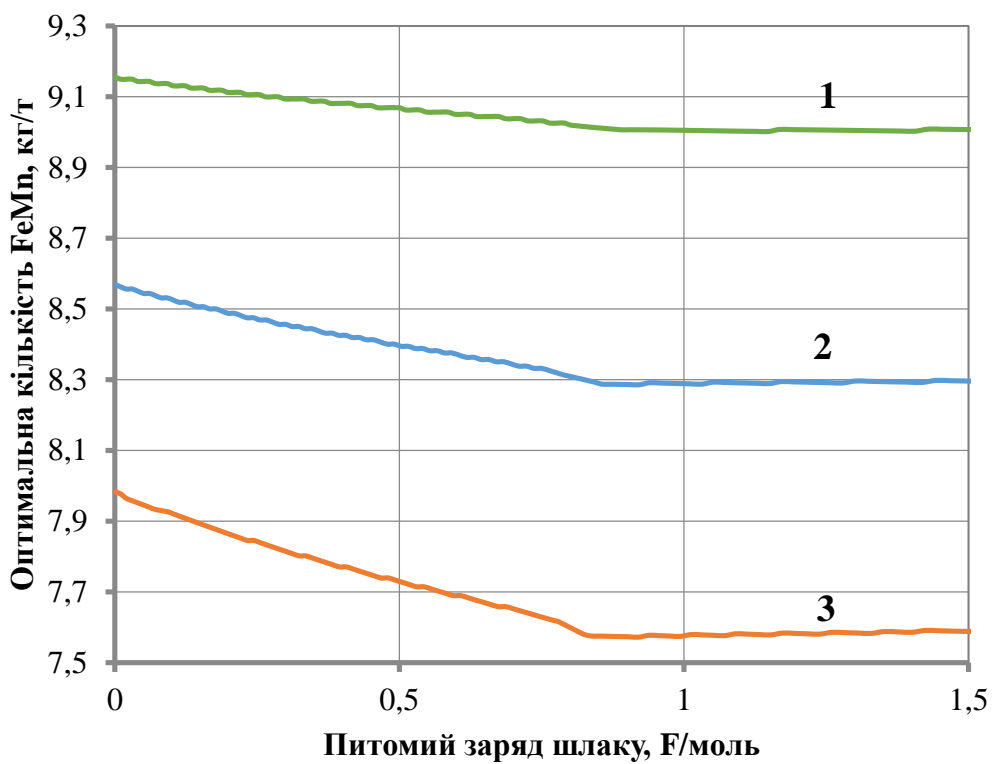


Рисунок 2.34 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeMn для сталі 35ХГСА

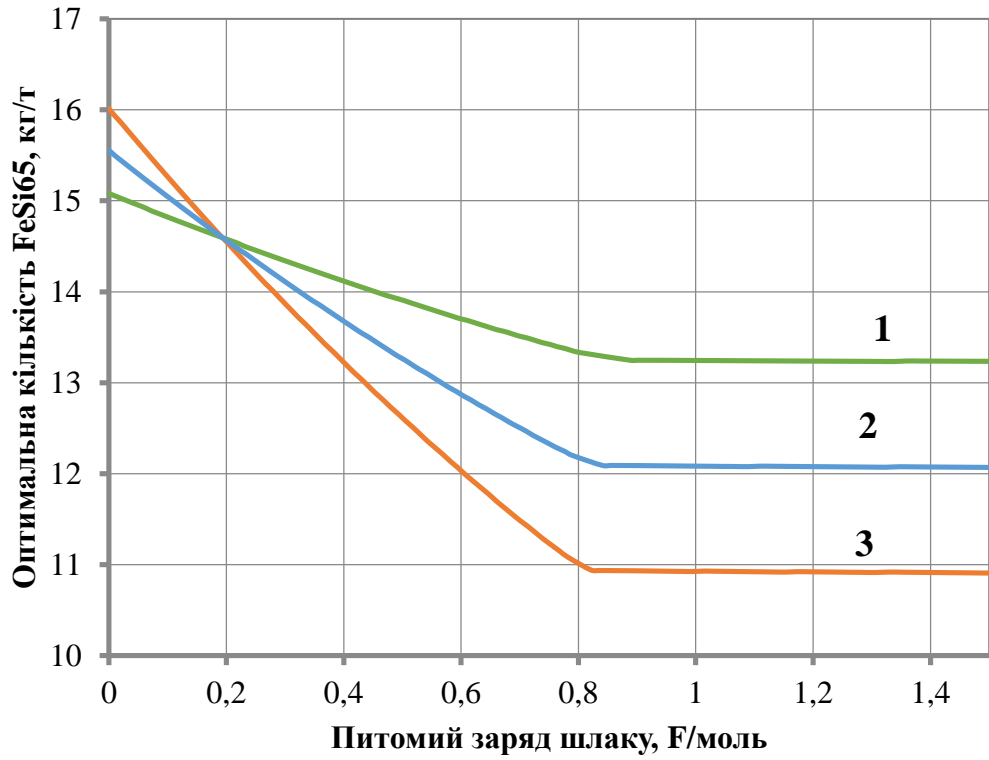


Рисунок 2.35 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість FeSi65 для сталі 35XГСА

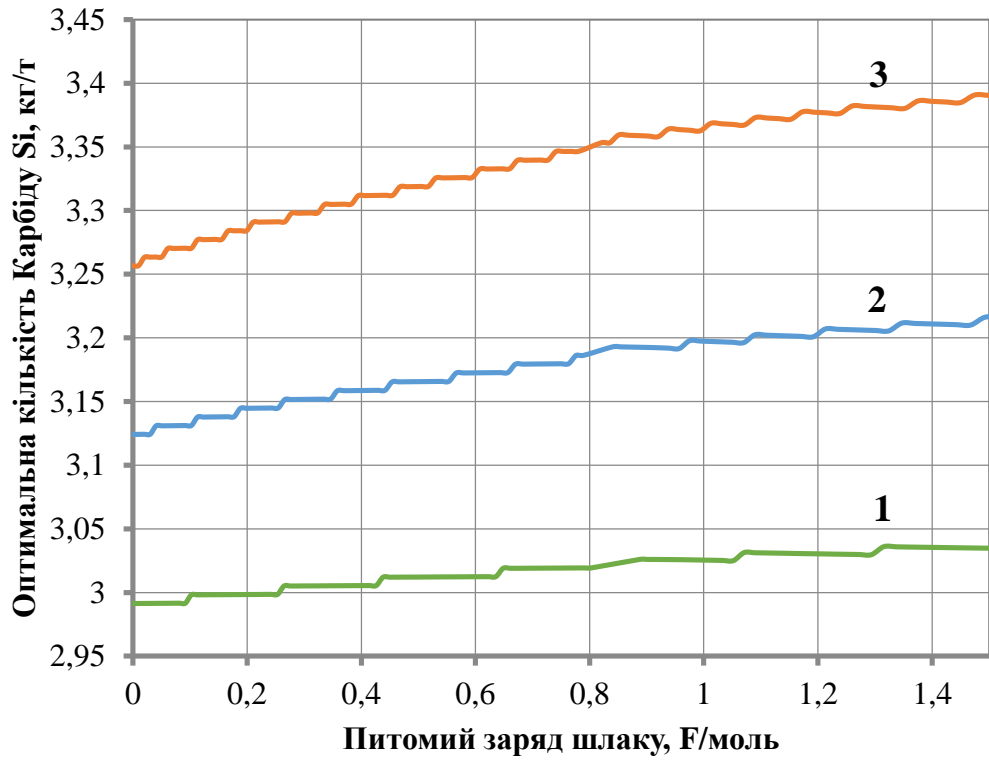


Рисунок 2.36 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість карбиду Si для сталі 35XГСА

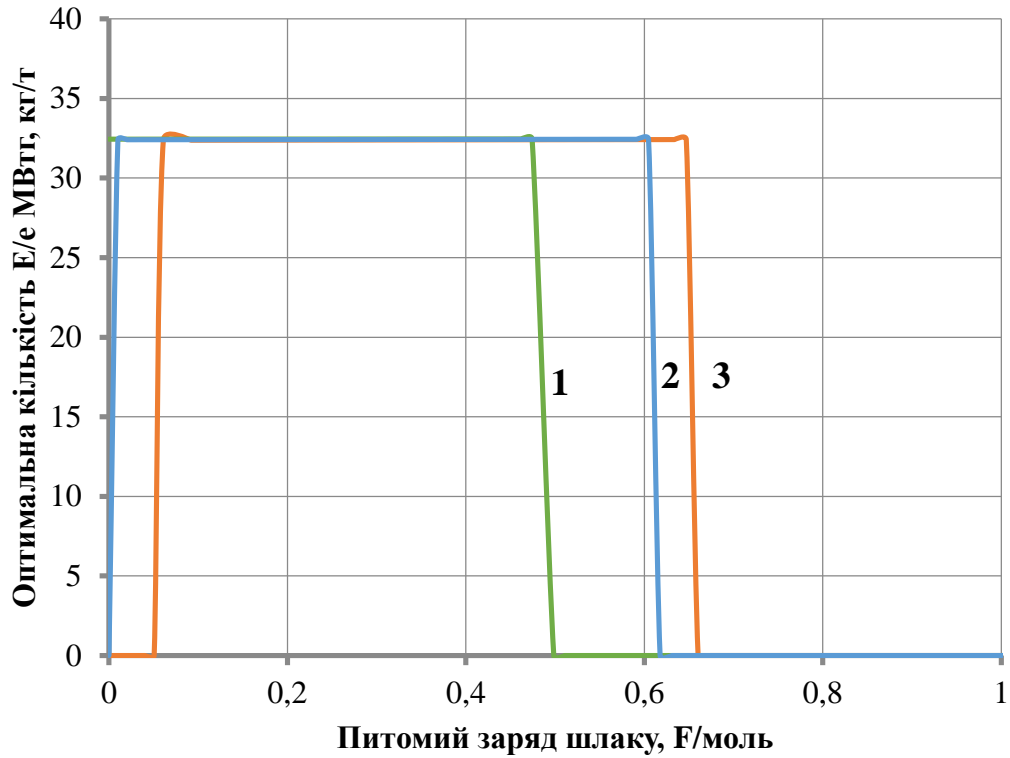


Рисунок 2.37 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість електроенергії для сталі 35ХГСА

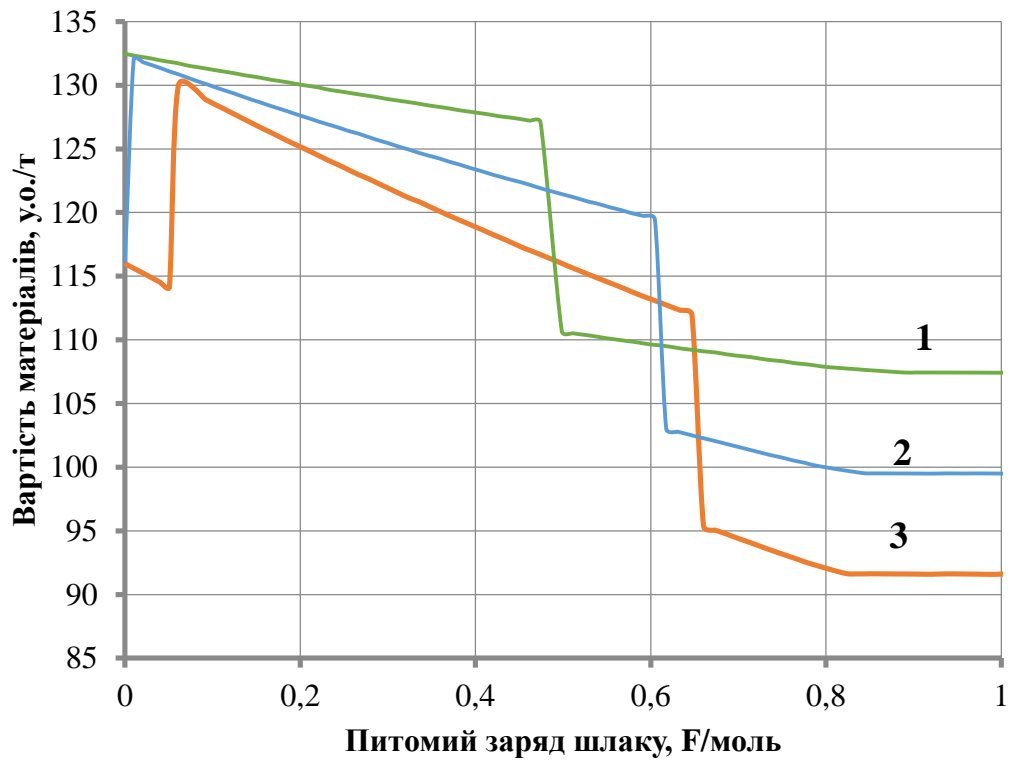


Рисунок 2.38 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну вартість матеріалів для сталі 35ХГСА

На рисунках 2.19 – 2.38 можна побачити залежності для сталей:

- 12ГС: Оптимальна кількість використовуваних феросплавів, електроенергії та загальна вартість матеріалів знижуються, а затрати карбиду кремнію - зростають;
- 30ГС: Оптимальна кількість феросплавів, електроенергії, загальна вартість матеріалів та затрати карбиду кремнію - знижуються;
- 09Г2С: Серед феросплавів спостерігається зростання тільки оптимальної кількості FeMn, тоді як витрата інших матеріалів, електроенергії та загальної вартості - знижується
- 35ХГСА: Всі показники знижуються, окрім карбиду кремнію, витрати якого починають зростати.

2.4.3 Хімічний склад металу

Нижче наведені таблиці з хімічним складом металу, шлаку і газу для сталей: 12ГС, 09Г2С, 30ГС, 35ХГСА за умов підвищеного зовнішнього тиску (2 атм) та мас шлаку одна, дві і три тонни.

Маса шлаку 1 тонна

Таблиця 2.5 – Елементний склад металу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,3	98,3	98,3	150443	150533	150488
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,139	0,149	0,144	212,1	228,3	220,2
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,584	0,594	0,589	894,6	909,2	901,9
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,844	0,884	0,864	1291,7	1353,6	1322,7
5	Al					0,0117	0,0121	0,0119	17,9	18,5	18,2
6	S	0,035		0,04		0,0356	0,0356	0,0356	54,4	54,5	54,4
7	P	0,015		0,035		0,0232	0,0232	0,0232	35,5	35,5	35,5
8	Mg					сліди	сліди	сліди	0,0697	0,0709	0,0703
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0139	0,0139	0,0139	21,2	21,3	21,3

Таблиця 2.6 – Елементний склад шлаку для сталі 12ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,856	0,868	0,862	9,64	9,76	9,7
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				20,1	20,2	20,1	226,3	226,9	226,6
4	MnO	10				4,66	4,8	4,73	52,4	54	53,2
5	Al ₂ O ₃	1,5				2,43	2,45	2,44	27,3	27,6	27,5
6	S	0,3				0,172	0,175	0,173	1,93	1,97	1,95
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0033	0,0034	0,0034	0,0376	0,0387	0,0381
8	MgO	3				2,17	2,18	2,18	24,5	24,5	24,5
9	CaO	45				29,6	29,6	29,6	332,8	332,8	332,8
10	O					39,9	39,9	39,9	449,1	449,1	449,1

Таблиця 2.7 – Елементний склад газу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0122	0,0125	0,0124	сліди	сліди	сліди
2	C					42,5	42,5	42,5	0,0071	0,0073	0,0072
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,086	0,0874	0,0867	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0269	0,0272	0,027	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
10	O					57,4	57,4	57,4	0,0096	0,0099	0,0098

Таблиця 2.8 – Елементний склад металу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,9	97,9	97,9	150522	150576	150549
2	C	0,05		0,12		0,103	0,109	0,106	158,1	167,1	162,6
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,542	0,547	0,545	834	840,5	837,3
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,33	1,36	1,35	2050	2087,2	2068,6
5	Al					0,0026	0,0026	0,0026	3,97	3,99	3,98
6	S	0,035				0,0356	0,0356	0,0356	54,7	54,7	54,7
7	P	0,015				0,028	0,028	0,028	43	43	43
8	Mg					сліди	сліди	сліди	0,0599	0,0604	0,0602
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0145	0,0145	0,0145	22,3	22,3	22,3

Таблиця 2.8 – Елементний склад шлаку для сталі 09Г2С

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,93	0,936	0,933	11,1	11,1	11,1
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO2	20				20,7	20,8	20,8	246,6	246,8	246,7
4	MnO	10				8,2	8,28	8,24	97,5	98,4	97,9
5	Al2O3	1,5				0,578	0,58	0,579	6,87	6,9	6,88
6	S	0,3				0,164	0,166	0,165	1,95	1,97	1,96
7	P2O5	0,2				0,0046	0,0047	0,0046	0,0548	0,0556	0,0552
8	MgO	3				2,03	2,03	2,03	24,1	24,1	24,1
9	CaO	45				28	28	28	332,8	332,8	332,8
10	O					39,3	39,3	39,3	466,9	466,9	466,9

Таблиця 2.10 – Елементний склад газу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0137	0,014	0,0139	сліди	сліди	0
2	C					42,4	42,4	42,4	0,0063	0,0065	0,0064
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,152	0,153	0,152	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0257	0,0261	0,0259	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
10	O					57,4	57,4	57,4	0,0086	0,0088	0,0087

Таблиця 2.11 – Елементний склад металу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98	98,1	98,1	150450	150553	150501
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,243	0,27	0,256	372,6	414,1	393,4
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,57	0,58	0,575	874	889,6	881,8
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,982	1,03	1,01	1507,2	1579,2	1543,2
5	Al					0,0233	0,0241	0,0237	35,8	37	36,4
6	S	0,035		0,04		0,0355	0,037	0,0362	54,4	56,8	55,6
7	P	0,015		0,035		0,0243	0,0244	0,0244	37,4	37,4	37,4
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,0902	0,0924	0,0913
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0135	0,0136	0,0136	20,8	20,9	20,9

Таблиця 2.12 – Елементний склад шлаку для сталі 30ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,833	0,848	0,841	8,78	8,94	8,86
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				17,3	17,4	17,3	182,6	183,3	182,9
4	MnO	10				4,38	4,48	4,43	46,1	47,2	46,7
5	Al ₂ O ₃	1,5				4,16	4,2	4,18	43,9	44,3	44,1
6	S	0,3				0,195	0,209	0,202	2,05	2,2	2,13
7	P ₂ O ₅	0,2				0,003	0,0031	0,0031	0,0319	0,0331	0,0325
8	MgO	3				2,36	2,36	2,36	24,9	24,9	24,9
9	CaO	45				31,6	31,6	31,6	332,8	332,8	332,8
10	O					39,1	39,1	39,1	412	412,2	412,1

Таблиця 2.13 – Елементний склад газу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0096	0,0101	0,0098	сліди	сліди	сліди
2	C					42,6	42,6	42,6	0,0089	0,0093	0,0091
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0797	0,0799	0,0798	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0275	0,0282	0,0279	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
10	O					57,3	57,3	57,3	0,012	0,0125	0,0123

Таблиця 2.14 – Елементний склад металу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,6	97,7	97,6	150418	150500	150459
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,379	0,39	0,384	584,1	600,9	592,5
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,11	1,11	1694,6	1713,4	1704
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,8	0,839	0,819	1232,9	1292,5	1262,7
5	Al					0,0044	0,0044	0,0044	6,77	6,81	6,79
6	S	0,01		0,025		0,0117	0,0117	0,0117	18,1	18,1	18,1
7	P	0,015		0,025		0,0224	0,0224	0,0224	34,5	34,5	34,5
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,144	0,146	0,145
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0117	0,0117	0,0117	18	18	18

Таблиця 2.15 – Елементний склад шлаку для сталі 35ХГСА

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,437	0,442	0,44	4,2	4,25	4,23
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				20,2	20,2	20,2	193,8	194	193,9
4	MnO	10				2,15	2,22	2,18	20,6	21,3	21
5	Al ₂ O ₃	1,5				0,422	0,426	0,424	4,06	4,09	4,07
6	S	0,3				0,101	0,103	0,102	0,974	0,988	0,981
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0009	0,0009	0,0009	0,0089	0,0091	0,009
8	MgO	3				2,5	2,5	2,5	24	24	24
9	CaO	45				34,6	34,6	34,6	332,8	332,8	332,8
10	O					39,5	39,6	39,5	380	380,1	380,1

Таблиця 2.16 – Елементний склад газу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0091	0,0092	0,0092	сліди	сліди	сліди
2	C					42,7	42,7	42,7	0,0097	0,0098	0,0098
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,059	0,0611	0,06	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0421	0,0422	0,0421	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,2	57,2	57,2	0,013	0,0131	0,0131

Маса шлаку 2 тонни

Таблиця 2.17 – Елементний склад металу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,3	98,4	98,3	150590	150679	150635
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,138	0,149	0,144	212,1	228,3	220,2
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,551	0,561	0,556	844,1	858,9	851,5
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,874	0,914	0,894	1339,4	1400,7	1370
5	Al					0,01	0,0103	0,0101	15,3	15,7	15,5
6	S	0,035		0,04		0,0364	0,0365	0,0364	55,8	55,9	55,8
7	P	0,015		0,035		0,0237	0,0237	0,0237	36,3	36,3	36,3
8	Mg					сліди	сліди	сліди	0,0749	0,0761	0,0755
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,013	0,013	0,013	20	20	20

Таблиця 2.18 – Елементний склад шлаку для сталі 12ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,848	0,86	0,854	16,8	17	16,9
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				18,7	18,7	18,7	370,3	371	370,6
4	MnO	10				4,15	4,26	4,21	82,3	84,6	83,4
5	Al ₂ O ₃	1,5				1,91	1,93	1,92	37,9	38,3	38,1
6	S	0,3				0,178	0,181	0,18	3,53	3,59	3,56
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0032	0,0033	0,0032	0,0631	0,0651	0,0641
8	MgO	3				2,15	2,15	2,15	42,6	42,6	42,6
9	CaO	45				33	33	33	654,9	654,9	654,9
10	O					39	39	39	773,4	773,4	773,4

Таблиця 2.19 – Елементний склад газу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0125	0,0129	0,0127	сліди	сліди	сліди
2	C					42,5	42,5	42,5	0,0069	0,0072	0,007
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0916	0,0929	0,0922	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0298	0,0302	0,03	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,3	57,4	57,4	0,0094	0,0096	0,0095

Таблиця 2.20 – Елементний склад металу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,9	98	97,9	150668	150722	150695
2	C	0,05		0,12		0,103	0,109	0,106	158,1	167,1	162,6
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,51	0,514	0,512	784,8	791,4	788,1
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,35	1,38	1,36	2081,1	2117,9	2099,5
5	Al					0,0033	0,0033	0,0033	5,03	5,06	5,05
6	S	0,035				0,0365	0,0365	0,0365	56,1	56,1	56,1
7	P	0,015				0,0285	0,0285	0,0285	43,9	43,9	43,9
8	Mg					сліди	сліди	сліди	0,0671	0,0676	0,0673
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0135	0,0135	0,0135	20,7	20,7	20,7

Таблиця 2.21 – Елементний склад шлаку для сталі 09Г2С

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,922	0,929	0,926	19	19,1	19,1
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				18,9	18,9	18,9	389,3	389,6	389,5
4	MnO	10				6,99	7,05	7,02	143,9	145,2	144,6
5	Al ₂ O ₃	1,5				0,668	0,67	0,669	13,7	13,8	13,8
6	S	0,3				0,171	0,172	0,171	3,51	3,54	3,53
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0043	0,0044	0,0044	0,0895	0,0909	0,0902
8	MgO	3				2,05	2,05	2,05	42,2	42,2	42,2
9	CaO	45				31,8	31,8	31,8	654,9	654,9	654,9
10	O					38,4	38,4	38,4	791,4	791,4	791,4

Таблиця 2.22 – Елементний склад газу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0142	0,0145	0,0144	сліди	сліди	сліди
2	C					42,4	42,4	42,4	0,0061	0,0063	0,0062
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,16	0,161	0,16	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0299	0,0304	0,0302	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,4	57,4	57,4	0,0083	0,0085	0,0084

Таблиця 2.23 – Елементний склад металу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98	98,1	98,1	150596	150700	150648
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,243	0,27	0,256	372,6	414,1	393,4
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,54	0,55	0,545	828,8	844,6	836,7
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	1,01	1,06	1,03	1552,2	1623,4	1587,8
5	Al					0,0181	0,0188	0,0184	27,8	28,8	28,3
6	S	0,035		0,04		0,0363	0,0378	0,037	55,7	58	56,9
7	P	0,015		0,035		0,0249	0,0249	0,0249	38,2	38,2	38,2
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,0892	0,0913	0,0902
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,013	0,0131	0,0131	20	20,2	20,1

Таблиця 2.24 – Елементний склад шлаку для сталі 30ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,826	0,842	0,834	15,8	16,1	16
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO2	20				16,8	16,8	16,8	321,3	322,1	321,7
4	MnO	10				4,12	4,2	4,16	78,8	80,5	79,6
5	Al2O3	1,5				3,12	3,15	3,14	59,8	60,4	60,1
6	S	0,3				0,197	0,211	0,204	3,77	4,03	3,9
7	P2O5	0,2				0,003	0,0031	0,003	0,0573	0,0595	0,0584
8	MgO	3				2,24	2,24	2,24	43	43	43
9	CaO	45				34,2	34,2	34,2	654,9	654,9	654,9
10	O					38,4	38,4	38,4	735,8	735,9	735,9

Таблиця 2.25 – Елементний склад газу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0097	0,0102	0,0099	сліди	сліди	сліди
2	C					42,6	42,6	42,6	0,0088	0,0092	0,009
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0827	0,083	0,0829	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0275	0,0282	0,0278	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,3	57,3	57,3	0,0119	0,0124	0,0121

Таблиця 2.26 – Елементний склад металу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,6	97,7	97,6	150584	150663	150623
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,38	0,39	0,385	585,6	601,8	593,7
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,11	1,11	1697	1715,7	1706,3
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,8	0,837	0,819	1234,4	1291,3	1262,8
5	Al					0,0059	0,006	0,006	9,16	9,23	9,2
6	S	0,01		0,025		0,0129	0,0129	0,0129	19,9	20	20
7	P	0,015		0,025		0,0226	0,0226	0,0226	34,9	34,9	34,9
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,145	0,146	0,146
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0002	0,0002	0,0002
10	O					0,0111	0,0112	0,0112	17,2	17,2	17,2

Таблиця 2.27 – Елементний склад шлаку для сталі 35ХГСА

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,43	0,435	0,433	7,75	7,84	7,8
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				19,2	19,2	19,2	346,2	346,4	346,3
4	MnO	10				1,93	1,99	1,96	34,8	35,9	35,4
5	Al ₂ O ₃	1,5				0,531	0,535	0,533	9,58	9,65	9,61
6	S	0,3				0,116	0,117	0,117	2,09	2,12	2,1
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0009	0,0009	0,0009	0,0155	0,0159	0,0157
8	MgO	3				2,34	2,34	2,34	42,1	42,1	42,1
9	CaO	45				36,3	36,3	36,3	654,9	654,9	654,9
10	O					39	39,1	39,1	703,9	703,9	703,9

Таблиця 2.28 – Елементний склад газу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0093	0,0094	0,0094	сліди	сліди	сліди
2	C					42,7	42,7	42,7	сліди	сліди	сліди
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0605	0,0626	0,0615	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0434	0,0435	0,0434	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0003	0,0003	0,0003	сліди	сліди	сліди
10	O					57,2	57,2	57,2	сліди	сліди	сліди

Маса шлаку 3 тонни

Таблиця 2.29 – Елементний склад металу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98,3	98,4	98,3	150736	150825	150780
2	C	0,06	0,09	0,15	0,12	0,138	0,149	0,144	212,1	228,3	220,2
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,519	0,528	0,523	795,2	810,1	802,7
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	0,902	0,941	0,921	1382,5	1443	1412,8
5	Al					0,0088	0,009	0,0089	13,5	13,9	13,7
6	S	0,035		0,04		0,0373	0,0374	0,0373	57,2	57,3	57,2
7	P	0,015		0,035		0,0242	0,0242	0,0242	37,2	37,2	37,2
8	Mg					сліди	0,0001	сліди	0,0756	0,0769	0,0763
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0128	0,0128	0,0128	19,7	19,7	19,7

Таблиця 2.30 – Елементний склад шлаку для сталі 12ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,866	0,879	0,873	24,6	25	24,8
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				18	18,1	18	512,6	513,5	513,1
4	MnO	10				4,11	4,21	4,16	116,7	119,7	118,2
5	Al ₂ O ₃	1,5				1,68	1,69	1,68	47,7	48,1	47,9
6	S	0,3				0,179	0,183	0,181	5,1	5,2	5,15
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0033	0,0034	0,0034	0,0943	0,0975	0,0959
8	MgO	3				2,13	2,14	2,13	60,7	60,7	60,7
9	CaO	45				34,3	34,4	34,4	977	977	977
10	O					38,6	38,6	38,6	1096,6	1096,7	1096,6

Таблиця 2.31 – Елементний склад газу для сталі 12ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0125	0,0129	0,0127	сліди	сліди	сліди
2	C					42,5	42,5	42,5	0,0069	0,0071	0,007
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0948	0,096	0,0954	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0302	0,0306	0,0304	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,3	57,4	57,3	0,0093	0,0096	0,0095

Таблиця 2.32 – Елементний склад металу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,9	98	97,9	150813	150867	150840
2	C	0,05		0,12		0,103	0,109	0,106	158,1	167,1	162,6
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,48	0,484	0,482	738,8	745,4	742,1
4	Mn	0,12	1,3	1,7	1,5	1,37	1,39	1,38	2106,5	2143	2124,7
5	Al					0,0036	0,0036	0,0036	5,52	5,57	5,54
6	S	0,035				0,0374	0,0374	0,0374	57,5	57,6	57,6
7	P	0,015				0,029	0,029	0,029	44,7	44,7	44,7
8	Mg					сліди	сліди	сліди	0,0692	0,0697	0,0695
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,0132	0,0132	0,0132	20,3	20,3	20,3

Таблиця 2.33 – Елементний склад шлаку для сталі 09Г2С

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,943	0,95	0,946	27,6	27,8	27,7
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO2	20				18	18,1	18	529	529,3	529,1
4	MnO	10				6,69	6,74	6,72	196,1	197,8	196,9
5	Al2O3	1,5				0,723	0,724	0,724	21,2	21,2	21,2
6	S	0,3				0,173	0,175	0,174	5,08	5,13	5,11
7	P2O5	0,2				0,0045	0,0046	0,0045	0,131	0,134	0,132
8	MgO	3				2,06	2,06	2,06	60,3	60,3	60,3
9	CaO	45				33,3	33,3	33,3	977	977	977
10	O					38	38	38	1114,8	1114,8	1114,8

Таблиця 2.34 – Елементний склад газу для сталі 09Г2С

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0143	0,0147	0,0145	сліди	сліди	сліди
2	C					42,4	42,4	42,4	0,0061	0,0062	0,0062
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,163	0,164	0,163	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					0,0001	0,0001	0,0001	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0312	0,0317	0,0314	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,4	57,4	57,4	0,0082	0,0084	0,0083

Таблиця 2.35 – Елементний склад металу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					98	98,1	98,1	150742	150846	150794
2	C	0,1	0,2	0,4	0,3	0,242	0,269	0,256	372,6	414,1	393,4
3	Si		0,5	0,8	0,65	0,509	0,52	0,515	783,1	799,1	791,1
4	Mn	0,05	0,8	1,2	1	1,04	1,08	1,06	1592,6	1663,3	1628
5	Al					0,0149	0,0155	0,0152	22,9	23,8	23,3
6	S	0,035		0,04		0,0371	0,0385	0,0378	57	59,2	58,1
7	P	0,015		0,035		0,0254	0,0254	0,0254	39,1	39,1	39,1
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,0868	0,0889	0,0878
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0001	0,0001	0,0001
10	O					0,013	0,0131	0,0131	20	20,2	20,1

Таблиця 2.36 – Елементний склад шлаку для сталі 30ГС

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,845	0,862	0,853	23,5	23,9	23,7
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				16,6	16,6	16,6	460,4	461,4	460,9
4	MnO	10				4,17	4,25	4,21	115,9	118,2	117
5	Al ₂ O ₃	1,5				2,62	2,64	2,63	72,6	73,4	73
6	S	0,3				0,196	0,209	0,202	5,43	5,81	5,62
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0032	0,0033	0,0032	0,0883	0,0918	0,09
8	MgO	3				2,2	2,2	2,2	61,1	61,1	61,1
9	CaO	45				35,2	35,2	35,2	977	977	977
10	O					38,1	38,1	38,1	1058,8	1059	1058,9

Таблиця 2.37 – Елементний склад газу для сталі 30ГС

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0097	0,0101	0,0099	сліди	сліди	сліди
2	C					42,6	42,6	42,6	0,0089	0,0093	0,0091
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,0842	0,0846	0,0844	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,0266	0,0272	0,0269	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0002	0,0002	0,0002	сліди	сліди	сліди
10	O					57,3	57,3	57,3	0,012	0,0125	0,0122

Таблиця 2.38 – Елементний склад металу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					97,6	97,7	97,6	150750	150825	150787
2	C	0,25	0,32	0,39	0,355	0,38	0,39	0,385	586,7	602,4	594,6
3	Si		1,1	1,4	1,25	1,1	1,11	1,11	1699,1	1717,7	1708,4
4	Mn	0,12	0,8	1,1	0,95	0,8	0,835	0,817	1235,2	1289,4	1262,3
5	Al					0,0069	0,007	0,007	10,7	10,8	10,8
6	S	0,01		0,025		0,014	0,014	0,014	21,6	21,7	21,7
7	P	0,015		0,025		0,0228	0,0228	0,0228	35,3	35,3	35,3
8	Mg					0,0001	0,0001	0,0001	0,145	0,147	0,146
9	Ca					сліди	сліди	сліди	0,0002	0,0002	0,0002
10	O					0,0109	0,011	0,011	16,9	17	16,9

Таблиця 2.39 – Елементний склад шлаку для сталі 35ХГСА

№	Комп-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий (елем.), %			Кінцевий (елем.), кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	FeO	20				0,428	0,432	0,43	11,3	11,4	11,4
2	C					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
3	SiO ₂	20				18,8	18,8	18,8	497,5	497,8	497,7
4	MnO	10				1,85	1,91	1,88	49	50,5	49,7
5	Al ₂ O ₃	1,5				0,604	0,607	0,606	16	16	16
6	S	0,3				0,128	0,129	0,128	3,37	3,41	3,39
7	P ₂ O ₅	0,2				0,0008	0,0009	0,0008	0,0222	0,0227	0,0225
8	MgO	3				2,28	2,28	2,28	60,2	60,2	60,2
9	CaO	45				37	37	37	977	977	977
10	O					38,9	38,9	38,9	1027,1	1027,2	1027,2

Таблиця 2.40 – Елементний склад газу для сталі 35ХГСА

№	Ел-ти	Вихід., %	Заданий, %			Кінцевий, %			Кінцевий, кг		
			Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.	Мін	Макс	Сер.
1	Fe					0,0094	0,0095	0,0095	сліди	сліди	сліди
2	C					42,7	42,7	42,7	сліди	сліди	сліди
3	Si					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
4	Mn					0,061	0,063	0,062	сліди	сліди	сліди
5	Al					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
6	S					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
7	P					сліди	сліди	сліди	сліди	сліди	сліди
8	Mg					0,044	0,0441	0,044	сліди	сліди	сліди
9	Ca					0,0003	0,0003	0,0003	сліди	сліди	сліди
10	O					57,2	57,2	57,2	сліди	сліди	сліди

2.5 Висновки

1. За допомогою програми «Excalibur» можливо здійснити термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ», а також побачити вміст різних хімічних елементів та їх сполук у металічній, газовій та шлаковій фазах за різних технологічних умов.

2. Побудовано графічні залежності, які детально показують процеси, що відбуваються в установці ківш-піч в процесі ВЕЛР. Ця інформація в перспективі може стати корисною при проектуванні технологічного процесу ВЕЛР на металургійних підприємствах.

3. Отримані відповіді на питання, пов'язані з легуванням сталі лужноземельними металами з використанням технології ВЕЛР.

4. При збільшенні питомого заряду шлаку починає утворюватись газова фаза, в яку переходять потенційно корисні елементи, такі як кальцій та магній. Для утримання цих елементів у металі необхідно підвищити зовнішній тиск. Для збільшення економічної доцільності легування та модифікування процес ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки. Зі збільшенням маси шлаку збільшується кількість корисних елементів, які відновляються в метал; зменшується оптимальна кількість необхідних для легування феросплавів та інших матеріалів, а також їх загальна вартість.

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. При звичайному атмосферному тиску значна частина кальцію у системі переходить до газової фази, що не дозволяє отримати його вміст у сталі вище 0,04%.

3. Збільшення зовнішнього тиску до 200 кПа разом з підвищенням питомого заряду шлаку до величини $q \geq 1$ F/моль дозволяють значно підвищити ефективність легування сталі лужноземельними металами, а саме: збільшити верхню межу вмісту кальцію у сталі до 0,35% та магнію до 0,04% за рахунок зменшення їх втрат у газовій фазі.

4. Для легування сталі лужноземельними металами технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дорогої порошкової проволочи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Харченко А. В., Пономаренко А. Г. Термодинамическое моделирование системы металл-шлак-газ с учетом тепла химических реакций // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2004. - №8. - С. 40-43.
2. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. Пер. с англ. // *М. - Metallurgia*. - 1989. - 503 С.
3. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса [Текст] / А. В. Харченко // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 13-17.
4. Общая металлургия [Текст]: учебник для вузов / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. - 6-е изд., перераб. и доп. - М. : Академкнига, 2002. - 768 С.
5. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу [Текст]: навч. посібник для студ. ЗДІА спец. 6.050401 "МЧМ" ден. та заоч. форм навчання : навч. посібник / С. А. Воденніков, О. В. Харченко, Н. В. Лічконенко, Г. А. Громак ; ЗДІА. - Запоріжжя : ЗДІА, 2015. - 108 С.
6. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу [Текст]: навч. посібник / Зборщик О.М. – Донецьк: ДонНТУ, 2001. – 154 С.
7. Дакуорт У. Э. Электрошлаковый переплав / У. Э. Дакуорт, Дж. Хойл. - М.: Металлургия, 1973. - 192 С.
8. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему / А. Г. Пономаренко // *ЖФХ*. - 1974. - Т.48. - № 7. - с. 668-674; № 8. - С. 950-958.
9. Харченко А. В. Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // *Сб. научных трудов ДонНТУ. Серия: Металлургия. Вып. 66*. - 2003. - с. 17-24.

10. Храпко С. А. Термодинамика и кинетика взаимодействия фаз при внепечной обработке / С. А. Храпко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2002. - № 10. - С. 121-123.

11. Харченко А. В. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, Е. Л. Корзун // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2004. - № 8. - С. 135-139.

12. Старосоцкий А. В. Создание системы автоматического ведения плавки в ДСП как первый шаг развертывания интеллектуальных систем управления в сталеплавильном производстве / А. В. Старосоцкий, А. К. Бабичев, И. В. Дервянченко и др. // *Труды Шестого конгресса сталеплавильщиков*. - М.: Черметинформация, 2001. - С. 300-308.

13. Синяков Р. В. Промышленное освоение системы управления внепечной обработкой стали (печь-ковш - вакууматор) ГИББС® на БМЗ / Р. В. Синяков, М. П. Гуляев, Р. Н. Мартынов и др. // *Металл и литье Украины*. - 2005. - № 3-4. - С. 98-100.

14. Харченко А. В. Оптимизация параметров раскисления кипящей и полуспокойной стали с помощью аппаратно-программного комплекса «Мастер» / А. В. Харченко, Д. В. Гогенко, А. В. Борщев, В. А. Аксененко и др. // *Труды Девятого конгресса сталеплавильщиков, 17-19 октября 2006 г., Старый Оскол: сб.тр.* - М.: Черметинформация, 2007. - С. 367-371.

15. Харченко А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса / А. В. Харченко // *Металл и литье Украины*. - 2005. - № 6. - С. 13-17.

16. Харченко А. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. В. Довгонюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2002. - № 10. - С. 131-137.

17. Харченко, А. В. Вторичное легирование и рафинирование стали в установках печь-ковш / А. В. Харченко, Н. В. Личконенко, Ю.В. Мосейко и др. // Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія, 2012. – Вип. 1(26). – С. 17-21.

18. Разработка информационно–технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. А. Храпко, Е. Н. Иноземцева // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – №12. – С. 89-91.

19. Храпко, С. А. Термодинамическая модель системы «металл-шлак-газ» и интегрированная система «Оракул»: использование для прогнозных расчетов и управления в составе АСУТП и разработки сталеплавильных процессов [Текст] / С. А. Храпко, Е. Н. Иноземцева, А. В. Харченко // Тез. докл. Всесоюзн. конф. «Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии». – Новокузнецк: Наука, 1991. – С. 222-223.

20. Пономаренко, А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему [Текст] / А. Г. Пономаренко // Журнал физической химии. – 1974. – Т. 48, №7. – С. 1668-1674; №8. – С. 1950-1958.

21. Харченко, А. В. Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // Сб. научн. трудов Донецк. нац. техн. университета. – Серия: Металлургия. – 2003. – Вып. 66. – С. 17-24.

22. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом тепла химических реакций [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №8 (228). – С. 40-43.

23. Харченко, А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса [Текст] / А. В. Харченко // Металл и литье Украины. – 2005. – №6. – С. 13-17.

24. Харченко, А. В. О кинетике межфазного массопереноса в металлургических агрегатах [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко // *Металл и литье Украины*. – 2002. – №12. – С. 41-42.

25. Харченко, А. В. Оптимизация внепечной обработки и легирования стали на основе решения обратной задачи термодинамического анализа [Текст] / А. В. Харченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – №8 (228). – С. 115-120.

26. Харченко, А. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. В. Довгонюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №10 (215). – С. 131-137.

27. Харченко, А. В. Возможности и перспективы использования программы «EXCALIBUR» в учебном процессе / А. В. Харченко, Н. В. Личконенко, Ю.В. Мосейко и др. // *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*, 2013. – Вип. 1(29). - С. 7.

28. ГОСТ 19281 – 2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. [Текст]; утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2014 г. № 1430-ст. 46 С.

29. ГОСТ 977 – 88. Отливки стальные. Общие технические условия. [Текст]; утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 22.12.88 № 4458. 1988. 36 С.

30. ГОСТ 4543 – 71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технічні умови. [Текст]; утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 18.06.71 № 1148. 46 С.

ДОДАТОК А

В додатку приведені основні хімічні, фізичні і термодинамічні показники для сталей: 12ГС, 09Г2С, 30ГС, 35ХГСА за умов підвищеного зовнішнього тиску (2 атм) та мас шлаку одна, дві і три тонни.

Маса шлаку 1 тонна

Таблиця А.1 – Загальні показники сталі 12ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,1
9	Маса шлаку вихідна	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	1,125	1,126	1,126
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	1,04	1,05	1,05
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,004652	0,005091	0,004872
17	Маса матеріалів факт.	т			3,45
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			15002,49

Таблиця А.2 – Матеріали для сталі 12ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,7		1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,05		0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,1		0,1					
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВгч	0,25		0,25			5		

Таблиця А.3 – Загальні показники сталі 09Г2С

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,7
9	Маса шлаку вихідна	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	1,188	1,189	1,189
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			0,958
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,003279	0,003529	0,003404
17	Маса матеріалів факт.	т			4,3
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			20642,8

Таблиця А.4 – Матеріали для сталі 09Г2С

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1		1					
2	SiMn	2,2		2,2					
3	FeSi65	1		1					
4	AB-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно						2		
10	Е/е МВтч	1		1			5		

Таблиця А.5 – Загальні показники сталі 30ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,5
9	Маса шлаку вихідна	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	1,054	1,055	1,055
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	1,29	1,3	1,3
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,008966	0,01027	0,009618
17	Маса матеріалів факт.	т			3,9
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			16860,77

Таблиця А.6 – Матеріали для сталі 30ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	2		2					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,1		0,1					
5	Коксик	0,2		0,2					
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВтч	1		1			5		

Таблиця А.7 – Загальні показники сталі 35ХГСА

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154,1
9	Маса шлаку вихідна	т	1	1	1
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	0,9608	0,9612	0,961
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,22
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,01128	0,01161	0,01145
17	Маса матеріалів факт.	т			4,337
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			20602,95

Таблиця А.8 – Матеріали для сталі 35ХГСА

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,416	1,416	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	2,362	2,362	2,5					
4	AB-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,459	0,459						
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВтч	5	5	1			5		

Маса шлаку 2 тонни

Таблиця А.9 – Загальні показники сталі 12ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,2
9	Маса шлаку вихідна	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	1,983	1,984	1,984
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	1,24	1,25	1,25
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,004299	0,004704	0,004502
17	Маса матеріалів факт.	т			3,45
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			15002,49

Таблиця А.10 – Матеріали для сталі 12ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,7		1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,05		0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,1		0,1					
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВгч	0,25		0,25			5		

Таблиця А.11 – Загальні показники сталі 09Г2С

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,9
9	Маса шлаку вихідна	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	2,058	2,059	2,059
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,18
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,002961	0,003186	0,003074
17	Маса матеріалів факт.	т			4,3
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			20642,8

Таблиця А.12 – Матеріали для сталі 09Г2С

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1		1					
2	SiMn	2,2		2,2					
3	FeSi65	1		1					
4	AB-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно						2		
10	Е/е МВтч	1		1			5		

Таблиця А.13 – Загальні показники сталі 30ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,6
9	Маса шлаку вихідна	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	1,914	1,916	1,915
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т	1,43	1,44	1,44
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,008736	0,01	0,0094
17	Маса матеріалів факт.	т			3,9
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			16860,77

Таблиця А.14 – Матеріали для сталі 30ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	2		2					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,1		0,1					
5	Коксик	0,2		0,2					
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВтч	1		1			5		

Таблиця А.15 – Загальні показники сталі 35ХГСА

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154,3
9	Маса шлаку вихідна	т	2	2	2
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т			1,802
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,33
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3			сліди
17	Маса матеріалів факт.	т			4,346
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			18112,48

Таблиця А.16 – Матеріали для сталі 35ХГСА

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,327	1,327	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	2,438	2,438	2,5					
4	AB-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,481	0,481						
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВтч			1			5		

Маса шлаку 3 тонни

Таблиця А.17 – Загальні показники сталі 12ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			153,3
9	Маса шлаку вихідна	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	2,843	2,845	2,844
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,34
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,004263	0,004662	0,004463
17	Маса матеріалів факт.	т			3,45
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			15002,49

Таблиця А.18 – Матеріали для сталі 12ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,7		1,7					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,05		0,05					
5	Коксик								
6	Карбід Si	0,1		0,1					
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВгч	0,25		0,25			5		

Таблиця А.19 – Загальні показники сталі 09Г2С

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154
9	Маса шлаку вихідна	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	2,932	2,933	2,933
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,3
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,00289	0,003108	0,002999
17	Маса матеріалів факт.	т			4,3
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			20642,8

Таблиця А.20 – Матеріали для сталі 09Г2С

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1		1					
2	SiMn	2,2		2,2					
3	FeSi65	1		1					
4	AB-87						0,5		
5	Коксик								
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно						2		
10	Е/є МВтч	1		1			5		

Таблиця А.21 – Загальні показники сталі 30ГС

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т	153,7	153,8	153,8
9	Маса шлаку вихідна	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	2,776	2,778	2,777
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,49
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3	0,008909	0,01019	0,00955
17	Маса матеріалів факт.	т			3,9
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			16860,77

Таблиця А.22 – Матеріали для сталі 30ГС

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	2		2					
2	SiMn								
3	FeSi65	1,5		1,5					
4	AB-87	0,1		0,1					
5	Коксик	0,2		0,2					
6	Карбід Si								
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1			0,1				
9	Вапно								
10	Е/є МВтч	1		1			5		

Таблиця А.23 – Загальні показники сталі 35ХГСА

№	Показник	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Середнє
1	Тиск	ат			2
2	Температура навк. середовища	С			
3	Температура вихідна	С			1600
4	Температура задана	С	1600		
5	Температура кінцева	С			1600
6	Маса металу вихідна	т	150	150	150
7	Маса металу задана	т			
8	Маса металу кінцева	т			154,4
9	Маса шлаку вихідна	т	3	3	3
10	Маса шлаку задана	т			
11	Маса шлаку кінцева	т	2,642	2,643	2,643
12	Основність шлаку задана	т			
13	Основність шлаку кінцева	т			1,38
14	Маса газу задана	т			
15	Маса газу кінцева	т			сліди
16	Об'єм газу кінцевий	м3			сліди
17	Маса матеріалів факт.	т			4,352
18	Вартість матеріалів факт.	у.о.			18110,41

Таблиця А.24 – Матеріали для сталі 35ХГСА

№	Матеріал	Факт, т	Оптим, т	Реком, т	Обов, т	Мін, т	Макс, т	Мін, %	Макс, %
1	FeMn	1,237	1,237	1,5					
2	SiMn								
3	FeSi65	2,513	2,513	2,5					
4	AB-87								
5	Коксик			0,15					
6	Карбід Si	0,502	0,502						
7	Син. шлак								
8	Футерівка	0,1	0,1		0,1				
9	Вапно								
10	Е/е МВтч			1			5		