

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

Металургія
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Особливості електролітичного розчинення і рафінування сталі у процесі ВЕЛРД

Виконав: студент 2 курсу, групи З.1369-мч
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми металургія чорних металів
(назва освітньої програми)

Д.М. Сердюк
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. к.т.н. Карпенко Г.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. мет. доц. к.т.н. Волар 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 Металургія
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма металургія чорних металів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри А. Косин
« 01 » вересня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Сердюк Денис Максимович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Особливості електрохімічного легування і розчинювання сталі у процесі ВЕЛР

керівник роботи Карпенко Тетяна Володимирівна канд. техн. наук
(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 _____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Розділ 1. Методичні вимоги, Розділ 2. Дослідження електрохімічного легування і розчинювання сталі у процесі ВЕЛР, Висновки, Список джерел посилань

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Розділ 1, Розділ 2, 13 креслень

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| I | Карпенко Т.В | <i>Т.В.</i> | <i>Т.В.</i> |
| II | Карпенко Т.В | <i>Т.В.</i> | <i>Т.В.</i> |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7 Дата видачі завдання 25.05.2020р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1 | Теоретичні вправи | 01.11.2020 | закінч. |
| 2 | Скелери. механізми. розрах. | 01.12.2020 | закінч. |
| 3 | Аналіз ситуацій з технік безпеки | 05.11.2020 | закінч. |
| 4 | Вибір елементів машини | 09.11.2020 | закінч. |
| 5 | Матеріали та Б. для виготовлення | 12.11.2020 | закінч. |
| 6 | Виробництво по роботі | 14.11.2020 | закінч. |
| 7 | Надання предметної (граф. мат.) | 17.11.2020 | закінч. |

Студент *Сендрук Р.М.* (підпис) Сендрук Р.М. (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено
 Нормоконтролер *Р.М. Волар* (підпис) Р.М. Волар (ініціали та прізвище)

Сер
 сталі у пр
 Ква
 спеціаль
 «Металу
 Інженер
 універс
 В
 обробк
 газ» п
 шлаку
 Терм
 Гіббс
 узгод
 досл
 на
 еле
 12I
 оп
 ВІ
 ко
 к
 і

АНОТАЦІЯ

Сердюк Д.М. Особливості електрохімічного легування та рафінування сталі у процесі 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.

В роботі наведено результати досліджень нового способу позапічної обробки сталі, заснованого на зміщенні рівноваги в системі «метал-шлак-газ» під дією позитивного електричного заряду, прикладеного до рідкого шлаку – вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР). Термодинамічне моделювання ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність даного процесу і добре узгоджується з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень. У роботі виконано дослідження впливу питомого заряду шлаку на вміст домішок і легуючих елементів в процесі вторинного електротермічного легування та рафінування низьколегованої сталей 09Г2С, 12ГС, 30ГС, 35ХГСА. Визначено основні параметри ВЕЛР для технологічних операцій розкислення, легування і десульфурзації рідкої сталі. Технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дефіцитних і коштовних матеріалів, що, в свою чергу, сприяє отриманню конкурентоспроможної сталі з мінімальними витратами. На відміну від інших методів позапічного легування та рафінування технологія ВЕЛР має ряд переваг, в числі яких можливість часткової утилізації конвертерних і доменних шлаків, значне зменшення забруднення сталі неметалевими включеннями в процесі обробки, зменшення викидів і димоутворення, висока економічна ефективність..

Ключові слова: РОЗКИСЛЕННЯ, ЛЕГУВАННЯ, РАФІНУВАННЯ, ЗАРЯД ШЛАКУ, ТЕРМОДИНАМІКА, НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ.

ABSTRACT

Serdjuk D.M. Features of electrothermal alloying and steel refining in the SEAR process.

Applicant degree higher education «master» by speciality 136 «Metallurgy» of education and professional program «Ferrous metallurgy» qualification work, scientific director docent, candidate of technical sciences G. V. Karpenko. Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, department of metallurgy, 2020.

The results of new AOD process method researching that was based on balance displacement in system «metal - slag - gas» with positive electric charge effect, applied to liquid slag – secondary electrothermal alloying and refining (SEAR). The high efficiency of this process is confirmed by the thermodynamic SEAR modeling based on the Gibbs potentials and agrees well with the previously obtained result of experimental studies. Research of influence of the specific charge of the slag on impurity and alloying elements content in SEAR process for low alloyed steel grades 09G2S, 12GS, 30GS, 35HGSA was completed. Main parameters for technical operations of deoxidation, alloying and desulfurization of liquid steel was identified. SEAR technology allows to use metallurgical slags instead of scarce and valuable materials, what contributes to the production of competitive steel. Instead of other out-of-furnace alloying and refining methods SEAR process makes it possible to recycle converter and domain slags, high economic efficiency, significant decrease non-metallic inclusions pollutions and decrease air pollutions with smoke formation.

Key words: DEOXIDATION ALLOYING, REFINING, SLAG CHARGE, THERMODYNAMIC, LOW ALLOY STEEL.

АННОТАЦІЯ

Сердюк Д.М. Особенности електрохімічного легирования и рафинирования стали в процессе ВЕЛР.

В работе приведены результаты исследований нового способа внепечной обработки стали, основанного на смещении равновесия в системе «металл - шлак - газ» под действием положительного электрического заряда, приложенного к жидкому шлаку - вторичного электротермического легирования и рафинирования (ВЕЛР). Термодинамическое моделирование ВЕЛР на основе метода химических потенциалов Гиббса подтверждает высокую эффективность данного процесса и хорошо согласуется с полученными ранее результатами экспериментальных исследований. В зависимости от полярности электрического заряда, приложенного к шлаку, ВЕЛР может применяться как собственно для раскисления-легирования и десульфурации, так и для окислительного рафинирования и обезуглероживания жидкой стали. В работе выполнено исследование влияния удельного заряда шлака на содержание примесей и легирующих элементов в процессе вторичного электротермического легирования и рафинирования низколегированной сталей 09Г2С, 12ГС, 30ГС, 35ХГСА. Определены основные параметры ВЕЛР для технологических операций раскисления, легирования и десульфурации жидкой стали. Технология ВЕЛР позволяет использовать металлургические шлаки вместо дефицитных и ценных материалов, что, в свою очередь, способствует получению конкурентоспособной стали с минимальными затратами. В отличие от других методов внепечного легирования и рафинирования технология ВЕЛР имеет ряд преимуществ, в числе которых возможность частичной утилизации конвертерных и доменных шлаков, значительное уменьшение загрязнения стали неметаллическими включениями в процессе обработки, уменьшение выбросов и дымообразования, высокая экономическая эффективность.

Ключевые слова: РАСКИСЛЕНИЕ, ЛЕГИРОВАНИЕ, РАФИНИРОВАНИЕ, ЗАРЯД ШЛАКА, ТЕРМОДИНАМИКА, НИЗКОЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 8 |
| 1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ..... | 10 |
| 1.1 Термодинамічне моделювання системи «метал – шлак – газ» | 10 |
| 1.2 Легування..... | 25 |
| 1.3 Установа «Піч-ківш» | 28 |
| 1.4 ВЕЛР..... | 31 |
| 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР..... | 37 |
| 2.1 Програма «Excalibur» в дослідженні електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР | 37 |
| 2.2 Обчислювальний експеримент | 44 |
| 2.2.1 Вміст елементів у металі та шлаку..... | 44 |
| 2.2.2 Вміст феросплавів..... | 76 |
| 2.2.3.Хімічний склад сталей..... | 77 |
| ВИСНОВКИ..... | 81 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 82 |

ВСТУП

Мета і задачі роботи. Дослідити особливості електрохімічного легування та рафінування сталі у процесі розкислення-легування сталей 09Г2С, 12ГС, 30ГС, 35ХГСА.

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

Предмет дослідження: вплив питомого заряду шлаку на засвоєння елементів зі шлаку у метал та навпаки.

Методи дослідження: Аналіз хімічного складу сталей та

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає у дослідженні особливостей легування та рафінування сталей 12ГС, 09Г2С, 30ГС, 35ХГСА та розширення результатів цього дослідження.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень особливостей електрохімічного легування та рафінування сталей 12ГС, 09Г2С, 30ГС та 35ХГСА можуть бути використані для більш ефективного використання енергії, феросплавів та уникання використання реагентів, що підвищують вартість сталі.

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

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

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 2 розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання.

Загальний обсяг роботи становить 81 сторінку, 6 таблиць, 38 рисунків, 30 джерел посилання.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Термодинамічне моделювання системи «метал – шлак – газ»

У загальному вигляді пряме завдання формулюється у вигляді системи рівнянь щодо рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі :

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

Де \mathbf{m} - вектор мас елементів в системі;

$\bar{\mathbf{m}}_{\text{п}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{о}}, \bar{\mathbf{m}}_{\text{г}}$ -- 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] :

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

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 заснованої на методі хімічних потенціалів Гіббса.

У початковому стані система може складатися з розплавленої системи «метал-шлак» і будь-яких завантажуваних шихтових і легуючих матеріалів (брухту, чавуну, вапна, феросплавів і т. д.) – в процесі плавки або на випуску з печі, або тільки з завантажуваних шихтових матеріалів - на початку плавки. Крім того, в систему потрапляє матеріал футеровки печі або ковша, кількість якого визначається статистично. В кінцевому стані система має температуру T і в загальному випадку складається з розплавлених металу, шлаку і газової фази.

Внесену електроенергію зручно вважати матеріалом з нульовою масою, але зі стандартною ентальпією, рівній кількості внесених в систему джоулів тепла на 1 кВт·год. Для більш точних розрахунків можна також врахувати, що, якщо електроенергія надходить через графітові електроди, то в систему вноситься деяка кількість вуглецю, тобто матеріал «електроенергія» містить вуглець і власне енергію. Аналогічно можна вчинити і з іншими енергоносіями.

У кожен момент часу, або по завершенню будь-якої операції введення матеріалів і енергії, система вважається закритою за матеріальним балансом, але відкритою для енергії, що надходить і теплових втрат. При безперервному введенні матеріалів і енергії загальний час розбивається на короткі періоди, протягом яких відбувається проплавлення матеріалів, що надійшли. При цьому розглядається послідовність початкових і кінцевих станів системи.

З урахуванням визначення енергоносіїв як специфічних матеріалів, рівняння теплового балансу запишеться наступним чином :

$$F(T) = H(T) - H_0 + Q_L = 0, \quad (1.5)$$

З огляду на те, що розглянута система «метал-шлак-газ» є гетерогенною, існує проблема вибору єдиного стандарту для вираження термодинамічних функцій в різних фазах. Енергія Гіббса системи в стандартному стані «рідкий метал» має вигляд [1] :

$$G = \sum_{i=1}^k n_i \mu_{[i]}^{\circ} + RT \sum_{i=1}^k [n_{[i]} \ln x_{[i]} \gamma_{[i]} + n_{(i)} (\ln x_{(i)} \gamma_{(i)} - \ln K_{[i]}) + n_{\{i\}} (\ln x_{\{i\}} \gamma_{\{i\}} - \ln K_{\{i\}})] \quad (1.6)$$

де $n_i, n_{[i]}, n_{(i)}, n_{\{i\}}$ - числа молей i -го елемента в системі, в металі, шлаку і газі; $x_{[i]}, x_{(i)}, x_{\{i\}}$ - молярні частки i -го елемента в металі, шлаку і газі; $\gamma_{[i]}, \gamma_{(i)}, \gamma_{\{i\}}$ - коефіцієнти активності i -го елемента в металі, шлаку і газі, що обчислюються у відповідних термодинамічних моделях фаз.

Величини $\ln K_{[i]}, \ln K_{(i)}$ визначені в такий спосіб :

$$\ln K_{[i]} = (\mu_{[i]}^{\circ} - \mu_{(i)}^{\circ}) / RT; \quad (1.7)$$

$$\ln K_{(i)} = (\mu_{[i]}^{\circ} - \mu_{\{i\}}^{\circ}) / RT; \quad (1.8)$$

де $\mu_{[i]}^{\circ}, \mu_{(i)}^{\circ}, \mu_{\{i\}}^{\circ}$ - стандартні молярні енергії Гіббса i -го елемента в металі, шлаку і газі.

При використанні єдиного стандарту енергії Гіббса переходу атомів з інших фаз в фазу, прийняту за стандарт, необхідним чином стають частиною функцій змішування. При цьому повні (абсолютні) активності елементів в стандартному стані «рідкий метал» виражаються наступним чином :

$$\begin{aligned} \ln a_{[i]} &= \ln x_{[i]} \gamma_{[i]}; \\ \ln a_{(i)} &= \ln x_{(i)} \gamma_{(i)} - \ln K_{[i]}; \\ \ln a_{\{i\}} &= \ln x_{\{i\}} \gamma_{\{i\}} - \ln K_{\{i\}}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Таким чином, при виборі будь-якого стандартного стану енергія Гіббса системи в термінах повних (абсолютних) активностей матиме вигляд :

$$G = \sum_{i=1}^k n_i \mu_i^\circ + RT \sum_{i=1}^k (n_{[i]} \ln a_{[i]} + n_{(i)} \ln a_{(i)} + n_{\{i\}} \ln a_{\{i\}}), \quad (1.10)$$

де μ_i° – мольна енергія Гіббса i -го елемента в обраному стандартному стані.

З моменту вибору єдиного стандартного стану будуть виконуватися наступні співвідношення, що спрощують термодинамічний формалізм :

$$\mu_{[i]}^\circ = \mu_{(i)}^\circ = \mu_{\{i\}}^\circ = \mu_i^\circ. \quad (1.11)$$

$$h_{[i]}^\circ = h_{(i)}^\circ = h_{\{i\}}^\circ = h_i^\circ. \quad (1.12)$$

З наведених рівнянь ясно, що не існує принципової різниці у виборі єдиного стандарту, якщо розглядається лише система «метал-шлак-газ» при високій температурі у вигляді розплаву металу, шлаку і газової фази. Традиційно в якості єдиного стандарту вибирають рідкий метал, так як саме метал є переважаючим і кінцевим продуктом будь-якого сталеплавильного процесу.

В кінцевому стані система «метал-шлак-газ» з температурою T має інтегральну ентальпію :

$$H(T) = H^\circ(T) + H^M(T) = H_m(T) + H_s(T) + H_g(T), \quad (1.13)$$

де $H^\circ(T)$ – стандартна інтегральна ентальпія системи при; $H^M(T)$ – інтегральна ентальпія змішування системи; $H_m(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого металу; $H_s(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого шлаку; $H_g(T)$ – інтегральна ентальпія кінцевого газу.

Ентальпії металу, шлаку і газу складаються з ентальпій в стандартному стані і ентальпій змішування :

$$H_m(T) = H_m^\circ(T) + H_m^M(T); \quad (1.14)$$

$$H_s(T) = H_s^\circ(T) + H_s^M(T); \quad (1.15)$$

$$H_g(T) = H_g^\circ(T) + H_g^M(T); \quad (1.16)$$

де $H_m^\circ(T)$, $H_s^\circ(T)$, $H_g^\circ(T)$ – інтегральні ентальпії фаз в стандартному стані; $H_m^M(T)$, $H_s^M(T)$, $H_g^M(T)$ – інтегральні ентальпії змішування фаз.

Інтегральні ентальпії, в свою чергу, обчислюються через парціальні величини. У відповідності до єдиного стандарту $h_{[i]}^\circ = h_{(i)}^\circ = h_{\{i\}}^\circ = h_i^\circ$, тому :

$$H^\circ(T) = H_m^\circ(T) + H_s^\circ(T) + H_g^\circ(T) = \sum_{i=1}^k [n_{[i]} h_{[i]}^\circ(T) + n_{(i)} h_{(i)}^\circ(T) + n_{\{i\}} h_{\{i\}}^\circ(T)] = \sum_{i=1}^k n_i h_i^\circ(T), \quad (1.17)$$

де $h_{[i]}^\circ(T)$, $h_{(i)}^\circ(T)$, $h_{\{i\}}^\circ(T)$ – парціальні стандартні ентальпії в металі, шлаку і газі при температурі T ; $h_i^\circ(T)$ – парціальна стандартна ентальпія i -го елемента в будь-якій фазі, прийнятої за стандарт.

Аналогічно, інтегральна ентальпія змішування системи дорівнює сумі ентальпій змішування фаз і виражається через відповідні парціальні величини :

$$H^M(T) = H_m^M(T) + H_s^M(T) + H_g^M(T) = \sum_{i=1}^k [n_{[i]} h_{[i]}^M(T) + n_{(i)} h_{(i)}^M(T) + n_{\{i\}} h_{\{i\}}^M(T)]. \quad (1.18)$$

У початковому стані система «метал-шлак-матеріали» має інтегральну ентальпію :

$$H_0 = H_0^\circ + H_0^M = H_{ms0}(T_0) + \sum_{j=1}^M H_j(T_j), \quad (1.19)$$

де H_0° – інтегральна стандартна ентальпія системи в початковому стані;
 H_0^M – інтегральна ентальпія змішування системи в початковому стані;
 $H_{ms0}(T_0)$ – інтегральна ентальпія підсистеми вихідних металу і шлаку, що мають температуру T_0 ; $H_j(T_j)$ – інтегральна ентальпія j -го матеріалу, що має температуру T_j .

При обчисленні термодинамічних функцій початкового стану підсистема «метал-шлак» і кожен матеріал розглядаються в загальному випадку як незалежні термодинамічні системи «метал-шлак-газ», які не обов'язково знаходяться в рівновазі. Іноді буває зручно вихідні метал і шлак уявити в якості особливого матеріалу з фіксованою масою.

Термодинамічні функції вихідних металу і шлаку обчислюються так само, як і для кінцевого стану, але при відомій температурі T_0 . Для інтегральної стандартної ентальпії підсистеми «метал-шлак» маємо :

$$H_{ms0}^\circ(T_0) = H_{m0}^\circ(T_0) + H_{s0}^\circ(T_0) = \sum_{i=1}^k [n_{[i]0} h_{[i]}^\circ(T_0) + n_{(i)0} h_{(i)}^\circ(T_0)] = \sum_{i=1}^k n_{i0} h_i^\circ(T_0). \quad (1.20)$$

Інтегральна ентальпія змішування підсистеми «метал-шлак» дорівнює :

$$H_{ms0}^M(T_0) = H_{m0}^M(T_0) + H_{s0}^M(T_0) = \sum_{i=1}^k [n_{[i]0} h_{[i]}^M(T_0) + n_{(i)0} h_{(i)}^M(T_0)]. \quad (1.21)$$

Якщо довільний матеріал знаходиться в рідкому, газоподібному або змішаному стані, його стандартна ентальпія дорівнює :

$$H_j^\circ = \sum_{i=1}^k [n_{[ij]} h_{[i]}^\circ(T_j) + n_{(ij)} h_{(i)}^\circ(T_j) + n_{\{ij\}} h_{\{i\}}^\circ(T_j)] = \sum_{i=1}^k n_{ij} h_i^\circ(T_j), \quad (1.22)$$

де $n_{[ij]}$, $n_{(ij)}$, $n_{\{ij\}}$, n_{ij} – числа молей i -го елемента в j -тому матеріалі, відповідно в металевій частині, неметалевої частини, в газовій фазі і в цілому;

Тут парціальні стандартні ентальпії мають таке ж значення, що і для підсистеми «метал-шлак».

Інтегральна ентальпія змішування довільного j -го матеріалу в твердому, рідкому, газоподібному або гетерогенном стані дорівнює :

$$H_j^M = \sum_{i=1}^k [n_{[ij]} h_{[i]}^M(T_j) + n_{(ij)} h_{(i)}^M(T_j) + n_{\{ij\}} h_{\{i\}}^M(T_j)]. \quad (1.23)$$

Для j -го матеріалу в твердому стані стандартна ентальпія обчислюється таким чином :

$$H_j^\circ = \sum_{i=1}^k [n_{[ij]} h_{[i]}^{\circ C}(T_j) + n_{(ij)} h_{(i)}^{\circ C}(T_j)] = \sum_{i=1}^k n_{ij} h_i^{\circ C}(T_j), \quad (1.24)$$

де $h_{[i]}^{\circ C}(T_j)$, $h_{(i)}^{\circ C}(T_j)$ – парціальні стандартні ентальпії i -го елемента в металевій і неметалевій частинах; $h_i^{\circ C}(T_j) = h_{[i]}^{\circ C}(T_j) = h_{(i)}^{\circ C}(T_j)$ – парціальна ентальпія i -го елемента j -го матеріалу в стандартному стані (переважно «твердий метал»).

Термодинамічні функції елементів в стандартному стані обчислюються відповідно до баз даних Астра [3].

Термодинамічні функції змішування багатоконпонентної конденсованої фази обчислюються відповідно до модифікованої МКЕ [4]. Основні інтегральні і парціальні молярні функції змішування в металі і шлаку наведені відповідно в таблицях 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1. – Інтегральні і парціальні молярні функції змішування в багатокомпонентній конденсованій фазі «метал»

| Функція | Символ | Формула | № |
|--------------------------|----------------|--|--------|
| Енергія Гіббса | G_m^M | $RT \sum_{i=1}^k x_{[i]} \ln(x_{[i]} \psi_{[i]}), \text{ де } \psi_{[i]} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k x_{[j]} \beta_{[ij]}}; \beta_{[ij]} = e^{-\frac{\varepsilon_{[ij]}}{RT}}$ | (1.25) |
| Продовження таблиці 1.1. | | | |
| Енергія Гіббса | $\mu_{[i]}^M$ | $RT \left(\ln(x_{[i]} \psi_{[i]}) + 1 - \sum_{j=1}^k x_{[j]} \psi_{[j]} \beta_{[ji]} \right)$ | (1.26) |
| Коефіцієнт активності | $\gamma_{[i]}$ | $\psi_{[i]} \exp \left(1 - \sum_{j=1}^k x_{[j]} \psi_{[j]} \beta_{[ji]} \right)$ | (1.27) |
| Ентальпія | H_m^M | $\sum_{i=1}^k x_{[i]} \Psi_{[i]}, \text{ где } \Psi_{[i]} = \psi_{[i]} \sum_{j=1}^k x_{[j]} \varepsilon_{[ij]} \beta_{[ij]}$ | (1.28) |
| | $h_{[i]}^M$ | $\Psi_{[i]} + \sum_{j=1}^k x_{[j]} \psi_{[j]} \beta_{[ji]} (\varepsilon_{[ji]} - \Psi_{[j]})$ | (1.29) |

Оцінка модельних параметрів $\varepsilon_{[ij]}$, що містяться в наведених формулах, проводиться відповідно до методик, викладених в роботі [4].

Таблиця 1.2. –Інтегральні і парціальні молярні функції змішування в багатокомпонентній конденсованій фазі «шлак» при єдиному стандартному стані «рідкий метал»

| Функція | Символ | Формула | № |
|-----------------------|----------------|--|--------|
| Енергія Гіббса | G_s^M | $RT \sum_{i=1}^k x_{(i)} \ln \frac{x_{(i)} \Psi_{(i)}}{K_{[i]}}$, де $\Psi_{(i)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k x_{(j)} \beta_{(ij)}}$; $\beta_{(ij)} = e^{-\frac{\varepsilon_{(ij)}}{RT}}$ | (1.30) |
| | $\mu_{(i)}^M$ | $RT \left(\ln \frac{x_{(i)} \Psi_{(i)}}{K_{[i]}} + 1 - \sum_{j=1}^k x_{(j)} \Psi_{(j)} \beta_{(ji)} \right) + \mu_e \nu_i$ | (1.31) |
| Коефіцієнт активності | $\gamma_{(i)}$ | $\frac{\Psi_{(i)}}{K_{[i]}} \exp \left(1 - \sum_{j=1}^k x_{(j)} \Psi_{(j)} \beta_{(ji)} + \frac{\mu_e \nu_i}{RT} \right)$ | (1.32) |
| Ентальпія | H_s^M | $\sum_{i=1}^k x_{(i)} (\Psi_{(i)} + \Delta h_{[i]}^\circ)$, где $\Psi_{(i)} = \Psi_{(i)} \sum_{j=1}^k x_{(j)} \varepsilon_{(ij)} \beta_{(ij)}$; $\Delta h_{[i]}^\circ = -R \frac{\partial \ln K_{[i]}}{\partial (1/T)}$ | (1.33) |
| | $h_{(i)}^M$ | $\Psi_{(i)} + \sum_{j=1}^k x_{(j)} \Psi_{(j)} \beta_{(ji)} (\varepsilon_{(ji)} - \Psi_{(j)}) + \mu_e \nu_i + \Delta h_{[i]}^\circ$ | (1.34) |

Стосовно шлакової фази використовується параметризація у вигляді [5]

:

$$\varepsilon_{(ij)} = \left(\sqrt{\kappa_i} - \sqrt{\kappa_j} \right)^2, \quad (1.35)$$

де κ_i – атомні енергетичні параметри, що мають розмірність кДж / моль.

Уточнені атомні параметри і величини $K_{[i]}$ для ряду елементів наведені в роботі [6].

В принципі можна використовувати будь-яку іншу термодинамічну модель фази, що забезпечує виконання граничного закону Рауля, рівнянь Гіббса-Дюгема і Гіббса-Гельмгольца.

Тепловий ефект хімічних реакцій, узгоджений з термодинамічної моделлю, був розрахований в роботі [1]. Цей ефект дорівнює зміні ентальпії змішування системи зі зворотним знаком :

$$Q_r = -\Delta H^M = H_0^M - H^M(T). \quad (1.36)$$

Скориставшись формулами (1.18), (1.21) і (1.23), можна отримати тепловий ефект хімічних реакцій в явному вигляді. Однак слід мати на увазі, що отриманий вираз можна обчислити тільки при відомому кінцевому складі і температурі системи T , тобто не до, а після рішення прямого рівноважного завдання.

У багатьох теплових моделях, наприклад в роботі [7], парниковий ефект хімічних реакцій обчислювався за сумою реакцій окиснення як окрема стаття теплового балансу. В рамках розглядаємого підходу відсутня необхідність не тільки записувати окремі хімічні реакції, а й особливо виділяти величину Q_r , що неявно входить в рівняння теплового балансу (1.5).

Кінцевою температурою системи є температура T , при якій виконується рівняння теплового балансу (1.5). Нехай система знаходиться поблизу кінцевої температури при температурі \tilde{T} , але рівняння теплового балансу не виконано : $F(\tilde{T}) \neq 0$. Завдання полягає в знаходженні кінцевого збільшення ΔT , такого, щоб $T = \tilde{T} + \Delta T$. Розкладемо рівняння теплового балансу (1.5) в лінійний ряд Тейлора за температурами близько точки \tilde{T} :

$$F(T) = F(\tilde{T}) + (\partial F / \partial T)(T - \tilde{T}) = 0, \quad (1.37)$$

з якого отримаємо, що кінцева температура системи визначається формулою :

$$T = \tilde{T} - \frac{F(\tilde{T})}{C_p(\tilde{T})}, \quad (1.38)$$

де $C_p(\tilde{T})$ – повна теплоємність системи.

Ряд послідовних наближень дозволяє знайти кінцеву температуру з необхідною точністю, але в припущенні, що зміна температури не позначається на перерозподілі елементів між фазами. В якості першого наближення доцільно взяти температуру вихідних металу і шлаку.

У загальному випадку рівняння теплового балансу слід вирішувати спільно з рівняннями матеріального балансу прямої задачі. Однак, якщо із рівноваги вплив завантажених матеріалів, електроенергії та теплових втрат відносно невелике і відповідно величина ΔT мала, то для обчислення кінцевої температури можна скористатися наведеною вище формулою.

В роботі [8] сформульована система рівнянь рівноважної прямої задачі для системи «метал-шлак-газ» в ізотермічних умовах :

$$\begin{cases} F_1 = -\sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_2 = \frac{N}{1 + \exp(Y)[1 + \exp(-Z)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_3 = \frac{N}{1 + \exp(Z)[1 + \exp(-Y)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i B_i}{1 + A_i + B_i} = 0. \end{cases} \quad (1.39)$$

Тут використовуються наступні позначення :

$$Y = \ln(N_m / N_s); \quad (1.40)$$

$$Z = \ln(N_m / N_g); \quad (1.41)$$

$$A_i = \frac{K_{[i]}\gamma_{[i]}}{\gamma_{(i)}} \exp\left(-Y - \frac{\mu_e \nu_i}{RT}\right); \quad (1.42)$$

$$B_i = \frac{K_{[i]}\gamma_{[i]}}{\gamma_{\{i\}}} \exp(-Z), \quad (1.43)$$

де N_m , N_s , N_g – числа молей в металі, шлаку і газі; μ_e – хімічний потенціал електронів (окислювально-відновний потенціал системи); ν_i – валентності елементів в шлаку.

Ця система вирішується щодо невідомих величин μ_e , Y , Z , за якими, з урахуванням (1.42) і (1.43), знаходяться числа молей елементів в металі, шлаку і газі :

$$n_{[i]} = \frac{n_i}{1 + A_i + B_i}; \quad (1.44)$$

$$n_{(i)} = n_{[i]} A_i = \frac{n_i A_i}{1 + A_i + B_i}; \quad (1.45)$$

$$n_{\{i\}} = n_{[i]} B_i = \frac{n_i B_i}{1 + A_i + B_i}. \quad (1.46)$$

Додамо до системи рівнянь (1.39) рівняння теплового балансу (1.5). Тоді система чотирьох рівнянь, що виражають рівновагу в системі «метал-шлак-газ», запишеться наступним чином :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = -\sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_2 = \frac{N}{1 + \exp(Y)[1 + \exp(-Z)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i A_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_3 = \frac{N}{1 + \exp(Z)[1 + \exp(-Y)]} - \sum_{i=1}^k \frac{n_i B_i}{1 + A_i + B_i} = 0; \\ F_4 = H(T) - H_0 + Q_L = 0. \end{array} \right. \quad (1.47)$$

Рішенням системи нелінійних рівнянь (1.47) є набір величин μ_e , Y , Z , T , за допомогою яких визначаються A_i і B_i відповідно до (1.42, 1.43), а потім числа молей елементів у фазах за формулами (1.44, 1.45, 1.46).

Системі рівнянь (1.47) відповідає функціональна матриця Якобі \mathbf{J} , яка використовується при вирішенні цієї системи методом Ньютона і в зворотній задачі оптимізації кількості матеріалів, енергоносіїв і температури :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \mu} & \frac{\partial F_1}{\partial Y} & \frac{\partial F_1}{\partial Z} & \frac{\partial F_1}{\partial T} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \mu} & \frac{\partial F_2}{\partial Y} & \frac{\partial F_2}{\partial Z} & \frac{\partial F_2}{\partial T} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \mu} & \frac{\partial F_3}{\partial Y} & \frac{\partial F_3}{\partial Z} & \frac{\partial F_3}{\partial T} \\ \frac{\partial F_4}{\partial \mu} & \frac{\partial F_4}{\partial Y} & \frac{\partial F_4}{\partial Z} & \frac{\partial F_4}{\partial T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i^2 \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & -\sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{(i)} v_i}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i \left(1 - \frac{n_{(i)}}{n_i}\right) & \frac{N_s^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{(i)}}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ -\sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{(i)} v_i}{n_i} & \frac{N_s N_g}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)} n_{(i)}}{n_i} & \frac{N_g^2}{N} - \sum_{i=1}^k \frac{n_{(i)}^2}{n_i} & \frac{1}{RT^2} \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) \\ \sum_{i=1}^k n_{(i)} v_i (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) & \sum_{i=1}^k n_{(i)} (h_i^M - h_{(i)}^M) & C_P \end{bmatrix}, \quad (1.48)$$

де h_i^M – парціальна мольна ентальпія змішування системи, яка визначається рівністю :

$$h_i^M = \frac{\partial H^M}{\partial n_i} = \frac{n_{[i]} h_{[i]}^M + n_{(i)} h_{(i)}^M + n_{\{i\}} h_{\{i\}}^M}{n_i}; \quad (1.48)$$

C_p повна теплоємність системи «метал-шлак-газ».

Серед чисельних методів розв'язання системи нелінійних рівнянь (1.47) безперечною перевагою володіє метод Ньютона як найбільш швидкий і надійний. Відповідно до цього методу поточний приріст вектора шуканих змінних μ_e, Y, Z, T обчислюється за формулою :

$$\begin{bmatrix} \Delta\mu_e \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta T \end{bmatrix} = -\mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix}, \quad (1.49)$$

де \mathbf{J} - функціональна матриця Якобі (1.48).

1.2 Легування

Легуванням називають процес присадки в сталь легуючих елементів, щоб отримати так звану леговану сталь, тобто таку сталь, в складі якої знаходяться спеціальні (легуючі) домішки, введені в неї в певних кількостях для того, щоб повідомити стали 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 всякій 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 стали легуючі елементи ділять на дві великі групи:

1-а — легуючі елементи, що розширюють γ -область твердих розчинів. У цю групу входять як елементи, що володіють необмеженою розчинністю в залозі (нікель, марганець, кобальт), так і елементи, що утворюють сплави, в яких гомогенна область безперервного ряду твердих розчинів обмежується гетерогенної внаслідок появи нових фаз (вуглецю, азоту, міді).

2-а — легуючі елементи, що звужують γ -область. Сюди входять як елементи, що утворюють з залізом сплави з повністю замкнутою γ -областю (берилій, алюміній, кремній, фосфор, титан, ванадій, хром, молібден, вольфрам), так і елементи, що утворюють сплави з звуженої γ -області (ніобій, тантал, цирконій, церій). Настільки різний вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза пояснюється головним чином будовою їх власної кристалічної решітки.

У 1-у групу входять в основному елементи, схожі за формою (ізоморфні) будовою γ -заліза.

У 2-у групу - елементи, ізоморфні α -залізу.

Для сталеплавильників також важливо знати поведінку легуючої домішки при плавці сталі для того, щоб виплавити метал потрібного складу (потрапити в аналіз) з мінімальними втратами легуючих матеріалів. Головне при цьому - уникнути непотрібного взаємодії легуючих домішок з киснем, щоб зменшити втрати ("угар") легуючих і забезпечити отримання в сталі мінімуму продуктів окислення легуючих - неметалевих включень, що забруднюють сталі і знижують їх якість. Залежно від ступеня спорідненості до кисню легуючі елементи також ділять на дві великі групи:

1-а— легуючі елементи, спорідненість до кисню у ко-торих менше, ніж у заліза (нікель, кобальт, молібден, мідь). Вони в умовах плавки і розливання практично не окислюються і тому можуть бути введені в метал в будь-який момент плавки. Зазвичай ці елементи вводять в метал на початку плавки разом з шихтою. Відходи, які утворюються при виплавці та прокатки (кування, штампування) сталей, що містять ці елементи, а також відходи виробів, виготовлених з цих сталей, слід зберігати і використовувати окремо, так як, по-перше, економічно вигідно завантажувати в піч не чисті нікель, мідь і т.п. (Або їх сплави), а відходи шихти, що містять ці домішки; по-друге, якщо такі відходи завантажувати в піч при виплавці сталі будь-якої марки, то ця сталь при випуску буде містити нікель, мідь і т.д., а це не завжди корисно (іноді шкідливо).

2-а — легуючі елементи, спорідненість до кисню у яких більше, ніж у заліза (наприклад, кремній, марганець, алюміній, хром, ванадій, титан). Щоб уникнути великого чаду цих елементів при легуванні, їх вводять в метал після розкислення або одночасно з розкисленням в самому кінці плавки (часто навіть в ківш, а іноді і безпосередньо в зливницю або кристалізатор).

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, ферроалюміній і ін.), або у вигляді сполук (оксиди ванадію, марганцева руда, молибдат кальцію і 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 містять легуючий елемент оксиди (наприклад, оксиди хрому, марганцева руда), порошкоподібні раскислители і відновники (наприклад, алюміній, магній) і окислювачі (наприклад, селітра). При випуску металу в ківш, в який завантажені подібні брикети, вони "запалюються", при реакції між восстановителями і окислювачами виділяється необхідна кількість тепла, легуючі домішки, що входять до складу оксидів, відновлюються.

Метал при такому методі роботи не охолоджується.[9]

1.3 Установа «Піч-ківш»

Типова конструкція установки показана на малюнку 1.3.1. У ковші наводиться рафінувальні шлак, і в нього зверху опускають електроди системи електродугового нагрівання таким чином, щоб забезпечити достатню ефективну теплопередачу і одночасно захистити вогнетриву ковша від дуги. При цьому залишкові оксиди заліза в шлаку відновлюються графітовими електродами. В результаті отримують "ультрачистому" сталь з низьким вмістом сірки.

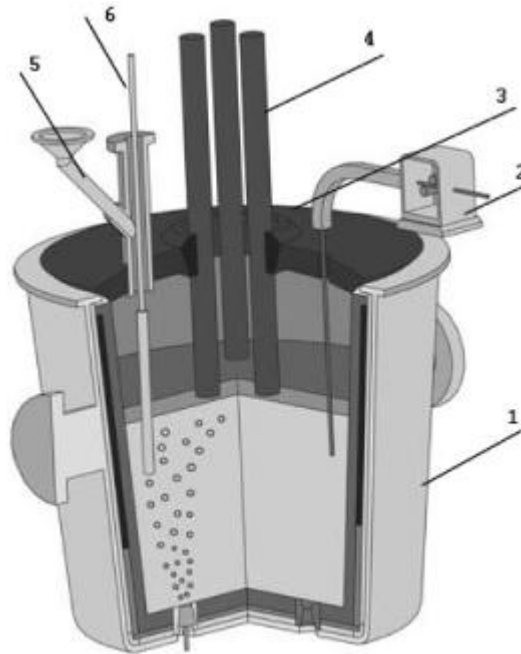


Рисунок 1.3.1 Загальна схема установка ківш-піч: 1 - Сталеразливний ківш; 2 - Трайб-апарат; 3 - Свод агрегату ківш-піч; 4 - Графітовані електроди; 5 - Воронка подачі сипучі, 6 - Аварійна фурма.

Розроблена і освоєна технологія позапічної обробки в агрегатах типу ківш - піч дозволяє виробляти весь спектр металургійних операцій в ковшах різної місткості: скачування шлаку за допомогою спеціальної машини електродугової підігрів металу трифазним змінним струмом зі швидкістю нагріву до 5 град / хв, вакуумирование металу при залишковому тиску до 0,5 ГПа і продування киснем в вакуумі, перемішування металу в ковші за

допомогою електромагнітного індуктора і продування аргоном через дно ковша, введення добавок за допомогою спеціальної системи.

Можливість нагріву металу в ковші дозволяє: знизити перегрів металу в сталеплавильному агрегаті; провести розкислення - легування з підвищеною витратою матеріалів; забезпечити глибоку десульфуріацію металу шляхом наведення високоосновного відновного шлаку. Крім цього, на такій установці високоефективно використовується продування металу аргоном. Ця продування забезпечує не тільки дегазацію металу, але і перемішування його, завдяки чому прискорюється розплавлення сідає в ківш феросплавів і гомогенізація розплаву за хімічним складом і температурі, істотно поліпшується взаємодія металу і шлаку, тобто десульфуріація металу.

Розроблено метод і пристрій контролю окислення шлаку, що дозволяють експресно визначати і регулювати зміст оксидів заліза безпосередньо в шлакової ванні, визначати кількість вводяться в шлак раскислителей з урахуванням особливостей кожної плавки. Розроблена технологія забезпечує можливість отримання високоякісного металу, і в т. Ч. Надчистої хромової сталі для сучасних роторів газових турбін, які повинні надійно працювати при температурах від -40°C при пуску до 500°C в робочому режимі і володіти високою стійкістю проти термічного старіння.

Підвищенню ефективності використання установки сприяють багато удосконалення конструкції, особливо в частині електронагріву, в тому числі обслуговування двох стендів одним трансформатором і одним комплектом електродів з поворотними електродотримачами (двохпозиційна установка). В частині регулювання хімічного складу металу передбачені: продування металу аргоном через два пористих блоку в дні ковша і через занурювальну фурму; подача в ківш всіх матеріалів, необхідних для наведення шлаку, розкислення - легування і науглероживання металу.

Найбільш важливі положення технології доведення сталі на установці ківш-піч зводяться до наступного. Доведення металу на установці починається з продувки його протягом 1-2 хвилини, після чого проводиться вимірювання температури і окислення металу. З урахуванням вмісту кисню в металі вводять в нього за допомогою трайб-апарату розрахункова кількість алюмінієвої катанки (дроту), щоб здійснити попереднє розкислення металу. Після цього приступають до наводкою відновного шлаку, присаживая вапно і плавиковий шпат порціями не більше 150 кг (загальна витрата до 10 кг / т). Після отримання рідкого шлаку його раскисляют алюмінієм, витрачаючи 0,2-0,3 кг на тонну металу. Наведення шлаку триває приблизно 5 хвилин.

Після закінчення наведення шлаку через 3 хвилини продувки відбирають проби металу і шлаку, вимірюють температуру. Після отримання результатів хімічного аналізу металу виробляють основну коригування його хімічного складу присадкою необхідної кількості розкислюючих і легуючих присадок з розрахунку отримання середнього вмісту елементів. Потім метал перемішують не менше 5 хвилин. Після цього знову відбирають пробу металу, по результату її аналізу, якщо треба, здійснюють додаткову коригування хімічного складу і температури сталі. Високоактивні елементи у вигляді порошкового дроту вводять тільки після закінчення останнього циклу нагріву металу.[10]

1.4 ВЕЛР

Питання про можливість використання агрегатів піч-ківш для вторинного легування та рафінування сталі неодноразово поставало при аналізі розподілу сірки між металом та шлаком у процесі електрошлакового переплаву постійним струмом. Так у роботі [11] було показано, що коефіцієнт розподілу сірки $(S)/[S]$ змінювався більш ніж в два рази при змінненні полярності прикладеної до електродів напруги. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей багатоконпонентних систем «метал-шлак-газ» не дозволяла ефективно керувати даним процесом та залишало лише емпіричні можливості для розробки окремих технологічних прийомів, що не виходять за рамки даного металургійного агрегату, даної технології виплавки, заданої марки сталі та заданого складу шлаку.

У роботі А.Г. Пономаренко [12] вперше була введена «електрохімічна» поправка, або «електронний вклад» у логарифм активності шлаку у вигляді доданку $\mu\nu_i$ (ν_i – валентність елемента i у шлаку). У цій та ряді наступних робіт обговорювався фізичний сенс величини μ . Пропонувалось, наприклад, назвати її «рівнем Фермі електронів у шлаку» та «окислювально-відновним потенціалом системи «метал-шлак»[13]. У роботі [14] стверджувалось, що μ є нічим іншим, як невизначиним множником Лагранжа при вирішенні задачі мінімізації енергії Гібса системи «метал-шлак» при додатковій умові електронейтральності шлакової фази. У роботі було показано, що електронейтральність є необхідною умовою дотримання рівняння Гібса-Дюгема при додаванні «електронного вкладу» у вираз для активності будь-якої фази. Так чи інакше, «електрохімічна» поправка $\mu\nu_i$ дозволила істотно покращити передбачувальні можливості фізико-хімічних моделей системи «метал-шлак» та наблизити їх до рівня потреб, що пред`являються до інтелектуального ядра АСУТП промислових металургійних агрегатів.

Системи управління, побудовані на викладених принципах, впроваджувались на ряді металургійних підприємств : Молдавському

металургійному заводі, Білоруському металургійному заводі [15], «Запоріжсталі» [16] та інших. Разом с тим, відсутність теплоенергетичної складової у використовуваних фізико-хімічних моделях не дозволяло з достатньою точністю моделювати та прогнозувати сталеплавильні процеси. Впровадження у модель системи «метал-шлак-газ» ентальпійного теплового балансу з невідомим розрахунком кінчної температури [17] та нової термодинамічної моделі конденсованих розчинів практично завершило теоретичну розробку «каркасу» фізико-хімічної моделі, придатної не тільки для побудови повністю автоматизованих систем управління існуючими металургійними процесами, але й відкрило практичні можливості для розробки теоретичних основ та технології принципово нових процесів, таких як вторинне електротермічне легування та рафінування (ВЕЛР) у процесі обробки металу у печі-ковші .

Ключовим елементом теорії ВЕЛР є поняття о кривій електронейтральності (КЕ), типовий вигляд якої приведений на рис. 1.

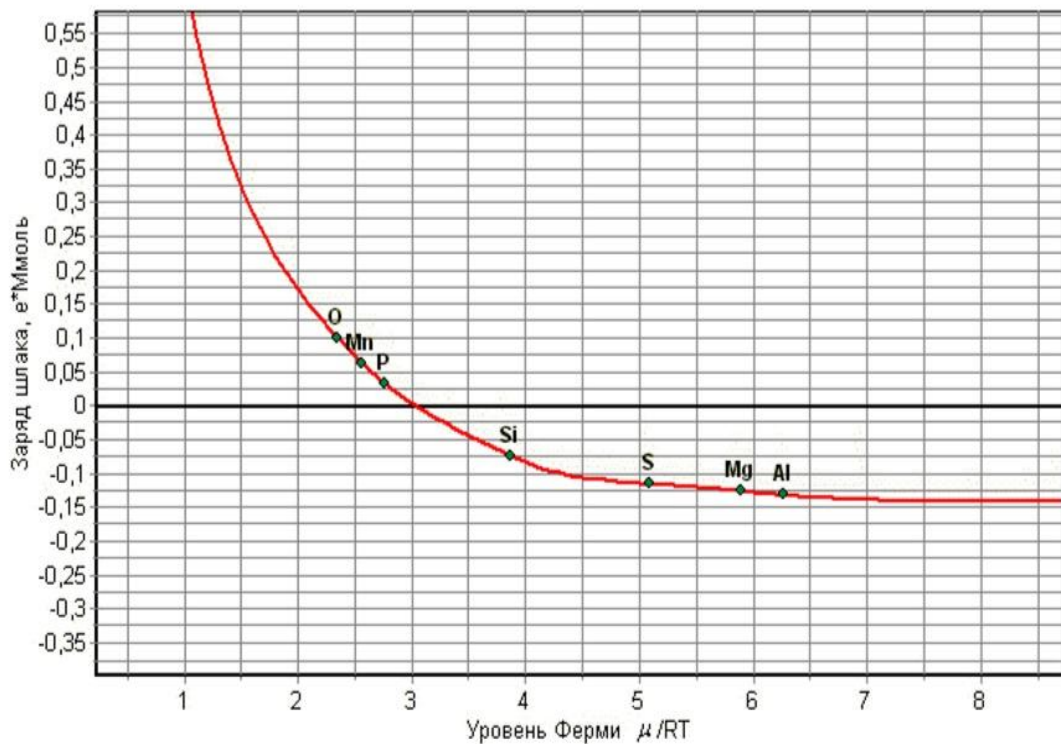


Рис.1.4.1 – Фрагмент кривої електронейтральності

У координатах «Заряд шлаку, е*Ммоль» - «Рівень Фермі електронів у шлаку, ед. RT» КЕ будується як функція $F_1(\mu)$ з рівнянь, описуючій стан системи «метал-шлак-газ» :

$$\begin{cases} F_1 = -\sum_{i=1}^k \frac{n_i V_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} = 0; \\ F_2 = \frac{N}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu v_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} - \frac{N}{1 + \exp(Y)[1 + \exp(-Z)]} = 0; \\ F_3 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + [1 + \exp(A_i - Y - \mu v_i)] \exp(Z - B_i)} - \frac{N}{1 + \exp(Z)[1 + \exp(-Y)]} = 0; \end{cases} \quad (4.1)$$

Де $A_i = \ln(K_{[i]}\gamma_i/\psi_i)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак»;

$B_i = \ln(K_{[i]}\gamma_i/\lambda_i)$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-газ»;

n_i – числа молей і-го елементу у системі;

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

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

Результатом розв'язання нелінійної системи (4.1) є набір величин μ, Y, Z , по яким визначаються рівноважні вміщення (числа молей) елементів у шлаку, газі та металі[18].

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

У точках перегину кривої нанесені точки, відповідаючі окремим елементам. У позначеннях системи рівнянь (4.1) координати цих точок обчислюються наступним чином.

$$\text{Координата X : } X_E = \frac{A_i - Y - \ln[1 + \exp(B_i - Z)]}{v_i} \quad (4.2)$$

$$\text{Координата Y : } Y_E = \sum_{i=1}^k \frac{n_i V_i}{1 + \exp(-A_i + Y + X_E v_i)[1 + \exp(B_i - Z)]} \quad (4.3)$$

Положення точок окремих елементів відносно вісі абсцисс відображає здатність шлаку у даних умовах поглинати або віддавати елемент. Якщо точка елемента з позитивною валентністю знаходиться нижче цієї вісі, тоді елемент прагне перейти у шлак. У іншому випадку цей елемент прагне перейти у метал або газ. Елементи з негативною валентністю переходять у шлак у випадку, якщо відповідна точка знаходиться вище вісі абсцисс.

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

Графік на рис. свідотствує про те що фосфор, марганець та сірка прагнуть до металу, тоді як кремній, магній та алюміній повинні залишатись у шлаку. При збільшенні ступіню розкислення спочатку відновиться кремній, потім сірка починає поглинатись шлаком, та, нарешті, відновляться магній та алюміній. При підвищенні ступіню окислення спочатку окислиться фосфор, а потім марганець.

Таким чином, КЕ дозволяє оцінювати здатність елементів до окислення та відновлення у даних умовах рівноваги. Знання якісних та кількісних характеристик КЕ, а також вміння керувати їми з допомогою зовнішнього електричного поля дозволяє організувати принципіально новий процес ВЕЛР на практиці.

Схема найпростішого агрегату ВЕЛР наведена на рис. .На графітовані електроди спеціальної форми 5 подається постійна напруга від джерела 6. Елементи на КЕ зміщуються вгору та вниз у залежності від полярності прикладеної до електродів 5 напруги. Передбачається, що метал в печі-ковші постійно перемішується шляхом продувки інертним газом.

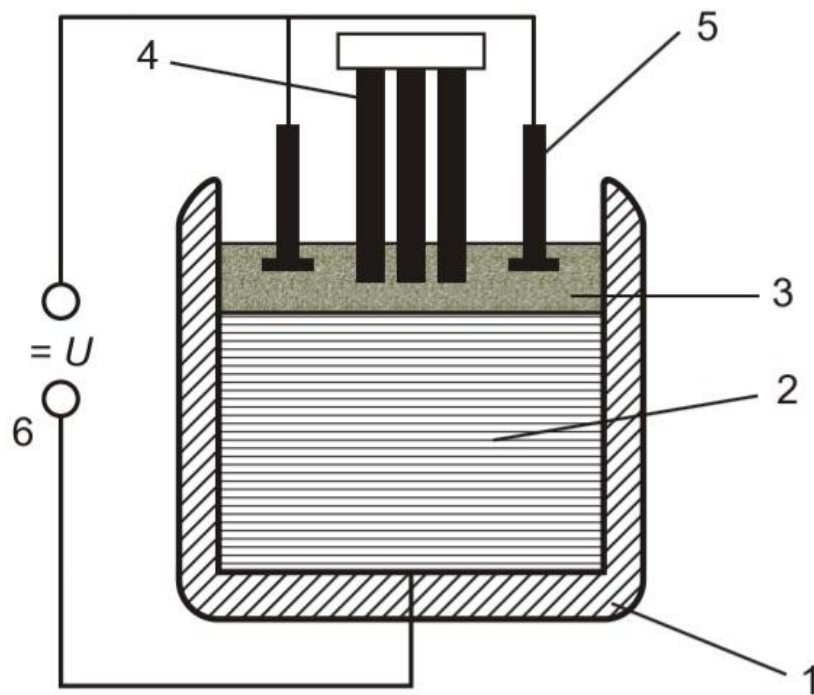


Рис.1.2.2 – Принципіальна схема ВЕЛР

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

Якщо надати шлаку позитивний заряд (електрод 5 – анод), тоді рівновага у системі зміщується у бік збільшення величини μ , як якби нульова вісь абсцис на рис. 1 змістилась вниз. Практично це було еквівалентно збільшенню ступені розкислення системи, що призведе до відновлення елементів з позитивною валентністю зі шлаку. Водночас буде відбуватися десульфуріяція, тобто віддалення сірки з металу та поглинення її шлаком, оскільки сірка має негативну валентність. Якщо ж електрод 5 є катодом, складаються умови для дефосфорації металевого розплаву.

Ординати елементів на КЕ дозволяють оцінити величину напруги, необхідної для створення відновних або окислювальних умов по відомій геометричній конфігурації шлакового шару та електропровідності шлаку. Оскільки електричний супротив шлаку має кінечну величину, для проведення процесу ВЕЛР необхідні певні енергетичні витрати, які у результаті теплового ефекту частково компенсують затрати електроенергії, подаваної на електроди підігріву 4.

Попередні розрахунки показують, що для відновлення одного молю кремнію зі шлаку методом ВЕЛР потребується на порядок менша кількість електроенергії, ніж її потребувалось би для виробництва такої ж кількості кремнію у вигляді феросиліцію, доставки феросплаву на завод, введення його у розплав, розплавлення та підігріву до температури розплаву, навіть з урахуванням супроводжуючої процес екзотермічної реакції. Подібний ефект досягається також при відновленні марганцю та алюмінію.[19]

Використання методу ВЕЛР для обробки сталі у модернізованих агрегатах ківш-піч дозволяє отримати наступні основні переваги :

1. Економія дорогих феросплавів, синтетичних шлаків та порошкоподібних модифікаторів;
2. Можливість утилізації рядових конверторних, мартенівських та доменних шлаків.
3. Можливість проведення десульфурації та дефосфорації без введення реагентів, підвищуючи вміст неметалевих включень.
4. Можливість введення у розплав високоактивних легуючих добавок з максимальною ступінню засвоєння.
5. Зменшене газовиділення та пилоутворення у порівнянні з існуючими методами легування та розкислення сталі.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР

2.1 Програма «Excalibur» в дослідженні електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР

Є багато способів ведення плавки, легування, позапічної обробки та рафінування сталі. Кожен з цих способів має забезпечувати заданий склад металу, температурний та шлаковий режим, а також враховувати припустимі параметри металургійного агрегату, дозаторів, фурм і т.п.

З всього різноманіття можливих способів досягнення поставленої мети, що відрізняються як кількістними, так і якісними характеристиками, бажано обрати єдиний оптимальний спосіб, котрий був би найменш дорогим або найбільш продуктивним. Враховуючи складність фізико-хімічних моделей, більшу кількість хімічних елементів та шихтових матеріалів, що беруть участь у розрахунках, єдиним засобом отримання оптимального рішення представляється використання спеціалізованих комп'ютерних програм.

Одною з перших комп'ютерних програм, розроблених для оптимізації легування сталі, була програма «Форвард» [20]. Наступний крок у розробці програмних середовищ для металургійних розрахунків був реалізований у системі «Оракул» [21], котра була здатна враховувати неметалеву частину шихти у розрахунках рівноваги. Істотним недоліком обох програм була їх нездатність враховувати вплив теплових ефектів та диференціальних коефіцієнтів засвоєння. У програмі «Excalibur» вперше у повному об'ємі реалізовані пряма та зворотня задачі, працюючи у тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [22] та її наступних модифікаціях [23,24], ентальпійному тепловому балансі [25] та обліку кінетичного запізнювання [26]. У алгоритмі зворотної задачі реалізований універсальний метод фазових операторів [27], частним випадком котрих є диференційне коефіцієнти засвоєння (ДКУ) у металі [28].

Промислова реалізація одного з варіантів програми – системи управління плавкою та позапічною обробкою «Гіббс»® [29] – впроваджена у 2004 р. на Білоруському металургійному заводі. По своїм можливостям програма «Excalibur» значно перевершує раніш створені програми термодинамічного моделювання системи «метал-шлак-газ».

Її основні переваги :

- виконання термодинамічного розрахунку рівноваги у багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» з урахуванням теплоти хімічних реакцій;
- проведення інтегрованого термодинамічного розрахунку кінчної температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;
- можливість розрахунку парціального тиску всіх атомарних та молекулярних складових газової фази;
- розрахунок та відображення всіх інтегральних та парціальних термодинамічних функцій складових системи, включно всі фази та окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;
- точний облік теплоти енергоносіїв та теплових втрат, температури та агрегатного стану матеріалів;
- розрахунок та наочне відображення кінетики взаємодії фаз у сталеплавильному агрегаті на основі принципів нерівноважної термодинаміки та рішення динамічної системи диференціальних рівнянь;
- повний розрахунок плавки у дуговій сталеплавильній печі (ДСП), у том числі : динаміки плавлення брухту, мас та хімічного складу металу, шлаку та газу, температури по ходу плавки з урахуванням кінетичного запізнення, скачування шлаку, теплових втрат та геометричних параметрів печі;

У рамках повного та точного вирішення зворотної задачі термодинамічного моделювання програма «Excalibur» забезпечує :

- оптимізацію мас всіляких легуючих та шихтових матеріалів (у будь-якому агрегатному стані) та витрат енергоносіїв за критеріями їх сумарної мінімальної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату;
- завдання та гарантоване виконання комплексу односторонніх та двосторонніх оптимізаційних обмежень за хімічним складом та масам кінечних металу, шлаку та газу, масі початкових матеріалів, витрат енергоносіїв, кінечної температури системи;
- застосування матричної алгебри фазових операторів та швидкодіючого алгоритму двоїстого симплекс-методу;
- розрахунок та облік перекрестного впливу вмісту одних елементів на засвоєння інших у кожній з фаз;
- розрахунок консолідованої матриці впливу добавок матеріалів та енергоносіїв на масу та склад фаз, а також температури системи;
- облік невизначенності вихідних та розрахункових даних шляхом задання відповідних довірчих інтервалів «нижня межа – верхня межа»;
- практична реалізація принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативної виробки альтернативних варіантів легування, розкислення та позапічної обробки сталі при відсутності рішення зворотної задачі у первісному вигляді.

Результатом розрахунків прямої задачі є маси та складу металу, шлаку та газу, парціальний тиск усіх складових газової фази та кінечна температура системи. Склад фаз може відобразитись у вигляді масових процентів, мольних процентів, кілограмів та кіломолей. Крім того, розраховуються об'єм виділившогося газу, основність шлаку, окислювально-

відновлювальний потенціал системи (рівень Фермі електронів у шлаку), хімічні потенціали та парціальні ентальпії змішування всіх елементів у всіх фазах, тепловий ефект хімічних реакцій. Усі розрахункові величини мають довірчий інтервал «нижня межа» – «верхня межа». У зворотньому завданні додатково розраховуються та відображаються оптимальні маси матеріалів, що забезпечують гарантоване виконання усіх оптимізаційних обмежень, вказаних у завданні на плавку. Розрахунки прямої та зворотньої задач виконуються, як правило, протягом 0,01...1,0 с. Задачі кінетики, моделювання плавки у ДСП та пошуку альтернативних рішень у зворотній задачі розраховуються протягом 0,01...2 хв. Кінцевий підсумок більшості розрахунків відображається на головній формі (рис.2.1.1).

| № | Материал | Т | № | Эл | Мет | масс% | Шлак | масс% | Газ | масс% | НВ | масс% | Всего | масс% | ln[K] | ln[A] | lnJ | № | Газ | P >= | P <= |
|----|-----------|-----|---|----|--------|--------|-------|-------|--------|--------|----|-------|--------|--------|--------|--------|-----|----|---------|---------|---------|
| 1 | FeMn | 1 | 0 | Fe | 97,91 | 97,88 | 0,864 | 0,858 | 0,022 | 0,021 | | | 96,71 | 96,67 | 8,3 | 7,45 | | 1 | CO | 0,437 | 0,459 |
| 2 | SiMn | 2,2 | 1 | C | 0,103 | 0,109 | 0 | 0 | 42,49 | 42,5 | | | 0,101 | 0,107 | -14,91 | -16,66 | -2 | 2 | CO2 | 3,1e-3 | 3,3e-3 |
| 3 | FeSi65 | 1 | 2 | Si | 0,537 | 0,641 | 18,03 | 18,01 | 0 | 0 | | | 0,753 | 0,757 | 32,6 | 27,31 | -1 | 3 | Mn | 8,2e-4 | 8,4e-4 |
| 4 | AB-87 | | 3 | Mn | 1,369 | 1,393 | 6,086 | 6,142 | 0,241 | 0,239 | | | 1,427 | 1,451 | 13,14 | 12,98 | | 4 | Mg | 4,1e-4 | 4,2e-4 |
| 5 | Коксик | | 4 | Al | 0,004 | 0,004 | 0,676 | 0,674 | 0 | 0 | | | 0,012 | 0,012 | 26,87 | 22,84 | | 5 | Fe | 7,2e-5 | 7,2e-5 |
| 6 | Карбид Si | | 5 | S | 0,036 | 0,036 | 0,181 | 0,183 | 0 | 0 | | | 0,038 | 0,038 | -6,46 | -11,53 | | 6 | Ca | 1,5e-6 | 1,6e-6 |
| 7 | Синшлак | | 6 | P | 0,029 | 0,029 | 0,004 | 0,004 | 0,0001 | 0,0001 | | | 0,028 | 0,028 | 33,22 | 27,91 | | 7 | PO | 4,7e-7 | 4,7e-7 |
| 8 | Футеровка | 0,1 | 7 | Mg | 0,0001 | 0,0001 | 2,185 | 2,184 | 0,054 | 0,053 | | | 0,027 | 0,027 | 18,98 | 22,14 | | 8 | S | 1,6e-7 | 1,6e-7 |
| 9 | Известь | | 8 | Ca | 0 | 0 | 33,91 | 33,9 | 0,0003 | 0,0003 | | | 0,42 | 0,42 | 24,16 | 31,79 | | 9 | MnO | 3,9e-8 | 4,0e-8 |
| 10 | Э/з МВТч | 1 | 9 | O | 0,012 | 0,012 | 38,06 | 38,06 | 57,2 | 57,19 | | | 0,484 | 0,484 | 0 | -5,11 | | 10 | SO | 3,2e-8 | 3,1e-8 |
| | | | Σ | кг | 153999 | 153998 | 1931 | 1932 | 0,02 | 0,02 | | | 155930 | 155930 | | | | 11 | MgO | 2,2e-8 | 2,2e-8 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 | S2 | 1,6e-8 | 1,6e-8 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 13 | P | 9,8e-9 | 9,8e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 14 | PS | 7,6e-9 | 7,7e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 15 | Al | 7,2e-9 | 7,3e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 16 | FeO | 5,9e-9 | 5,9e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | P2 | 4,3e-9 | 4,3e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | PO2 | 2,3e-9 | 2,3e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 19 | SO2 | 2,1e-9 | 2,1e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20 | Al2O | 1,2e-9 | 1,2e-9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21 | O | 7,1e-10 | 7,0e-10 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 22 | AlO | 5,6e-10 | 5,6e-10 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23 | Si | 1,6e-10 | 1,7e-10 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24 | CaO | 1,3e-10 | 1,3e-10 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Всего | 0,442 | 0,464 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Куб.м 0 | 0 | |

Рис. 2.1.1 Загальний вигляд головної форми «Excalibur»

Програма має інтуїтивно дружній інтерфейс, що дозволяє користувачам ефективно працювати з нею, спираючись на мінімальну теоретичну підготовку у області металургії чорних металів та інформатики. Таблиці матеріалів, елементів та газів мають контексні меню, що робить роботу з програмою ще зручнішою. Якщо у результаті розрахунку прямої або

зворотньої задачі вміст будь-якого елемента у металі або шлаку виходить за межі, визначені у завданні на плавку, то відповідна величина у таблиці елементів маркується червоним кольором.

Користувач за допомоги редагуємих таблиць та полей може задати будь-які вихідні дані та оптимізаційні обмеження (односторонні та двохсторонні) застосовуємо до металу, шлаку та газу, а також до всіх доступних та недоступних матеріалів та енергоносіїв. Зокрема, тут можна задати хімічний склад та інтервал мас вихідних металу та шлаку, початкову температуру, температуру навколишнього середовища, потребуємих склад металу та шлаку, потрібні маси металу, шлаку та газу, обмеження за кінцевою температурою металу, а також вказати величину теплових втрат у МДж. Крім того, по кожному матеріалу можна вказати рекомендуємі маси, фіксовані (обов'язкові) маси та задати верхній та/або нижня межа використання даного матеріалу у тонах та/або процентах від загальної маси усіх матеріалів. Редактор завдань допускає введення до 100 різноманітних завдань на плавку, що можуть бути збережені у файлі. У межах форми редактору робота з файлами завдань та окремими завданнями виконується з допомогою контекстного меню. На головній формі швидке перемикання між файлами завдань та окремими завданнями виконується з допомогою двох випадючих списків у верхній частині форми. Для моделювання плавки металу у ДСП розроблена спеціальна форма, на якій у реальному масштабі часу візображаються усі ключові характеристики даного процесу. Типовий вигляд форми приведений на рис. 2.

Файл заданий - ВЭЛР-09Г2С.tsk

09Г2С-1т 09Г2С-2т 09Г2С-3т

| N | Материал | Реком | Фикс | Мин т | Макс т | Мин % | Макс% |
|---|-----------|-------|------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | FeMn | 1 | | | | | |
| 2 | SiMn | 2,2 | | | | | |
| 3 | AB-87 | | | | 0,5 | | |
| 4 | Футеровка | | 0,1 | | | | |
| 5 | Карбид Si | | | | | | |
| 6 | Коксик | | | | | | |
| 7 | FeSi65 | 1 | | | | | |

| N | Эл | Мет>= | Мет<= | Проба | Шлк>= | Шлк<= | Проба |
|----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Fe | | | | | | 20 |
| 2 | C | | 0,12 | 0,05 | | | |
| 3 | Si | 0,5 | 0,8 | | | | 20 |
| 4 | Mn | 1,3 | 1,7 | 0,12 | | | 10 |
| 5 | S | | | 0,035 | | | 0,3 |
| 6 | P | | | 0,015 | | | 0,2 |
| 7 | Ca | | | | | | 45 |
| 8 | Mg | | | | | | 3 |
| 9 | Al | | | | | | 1,5 |
| 10 | O | | | | | | |
| 11 | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | |

Мин / макс М мет. Изв. нач. М мет.
 150 - 150

Мин / макс М шл. Изв. нач. М шл.
 2 - 2

Мин / макс осн-ть Т-ра о.среды Заряд
 20

Мин / макс М газа Нач. т-ра, °С Р, атм
 1600 1

Мин / макс т-ра, °С Qз, МДж Qп, МДж

Отменить Справка Принять

Рис. 2.1.2 Форма редактору завдання на плавку

Моделювання процесів у ДСП на основі розроблених алгоритмів прямого та зворотнього завдання з урахуванням теплоти хімічних реакцій та ентальпійного теплового балансу дозволяє виконати проектування технологій електросталеплавильного виробництва на якісно новому рівні, так як алгоритми, по суті, є інтелектуальним ядром верхнього рівня систем управління технологічними процесами ДСП. У табл. 1 та 2 приведені вихідні дані та результати примінення зворотньої задачі для оптимізації легування сталі 12ГС при випуску металу у ковш.

Висновки. Програма «Excalibur» дозволяє виконувати термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу та може бути використана у якості навчальної програми для студентів металургійних спеціальностей. Вона також може служити інструментом дослідження при розробці нових технологій, так як дозволяє

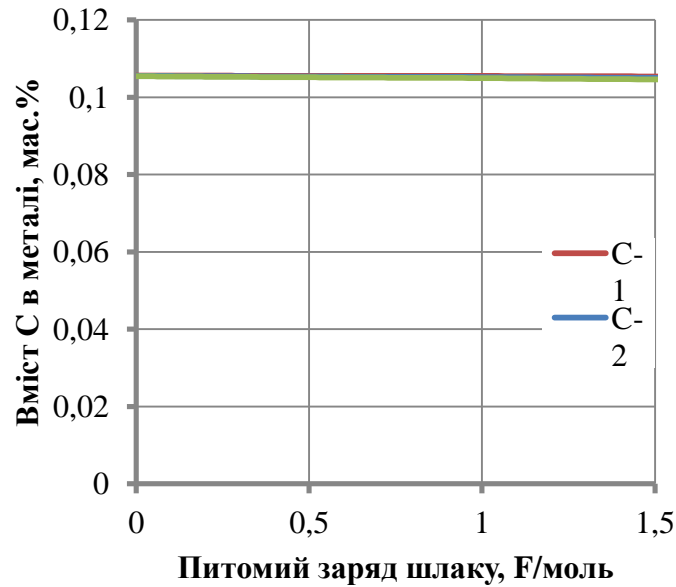
модельовати різноманітні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурації та дефосфорації сталі.[30]

2.2 Обчислювальний експеримент

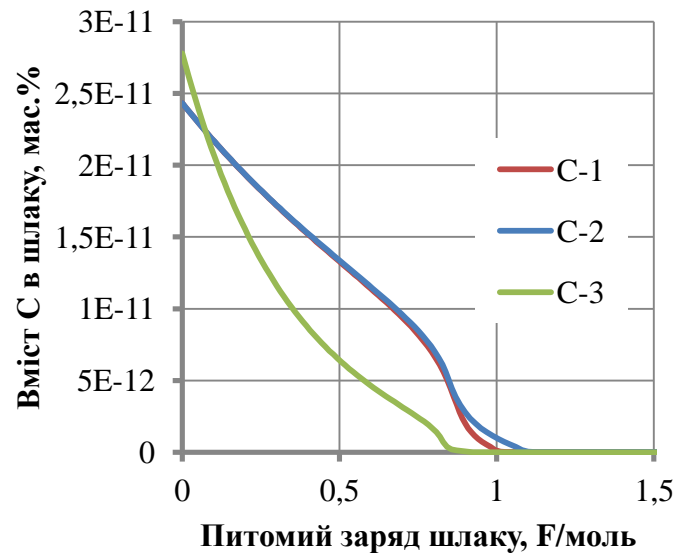
2.2.1 Вміст елементів у металі та шлаку

У експерименті було використано сталі марок 09Г2С, 12ГС, 30ГС, 35ХГСА.

Наведені графіки залежності вмісту елементів у сталі та шлаку сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку за наступних умов: 1,2 та 3 тони шлаку.



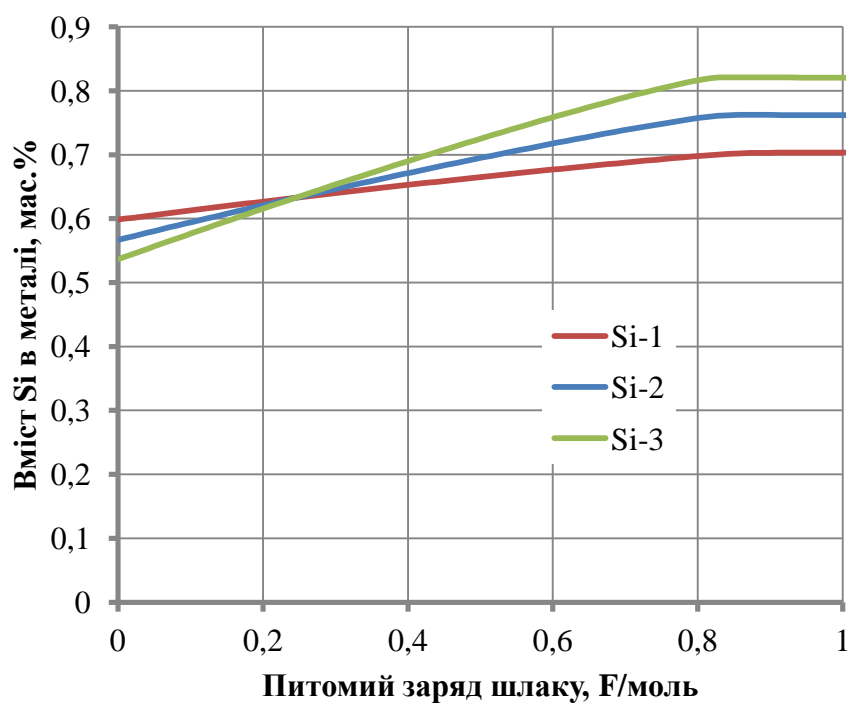
а)



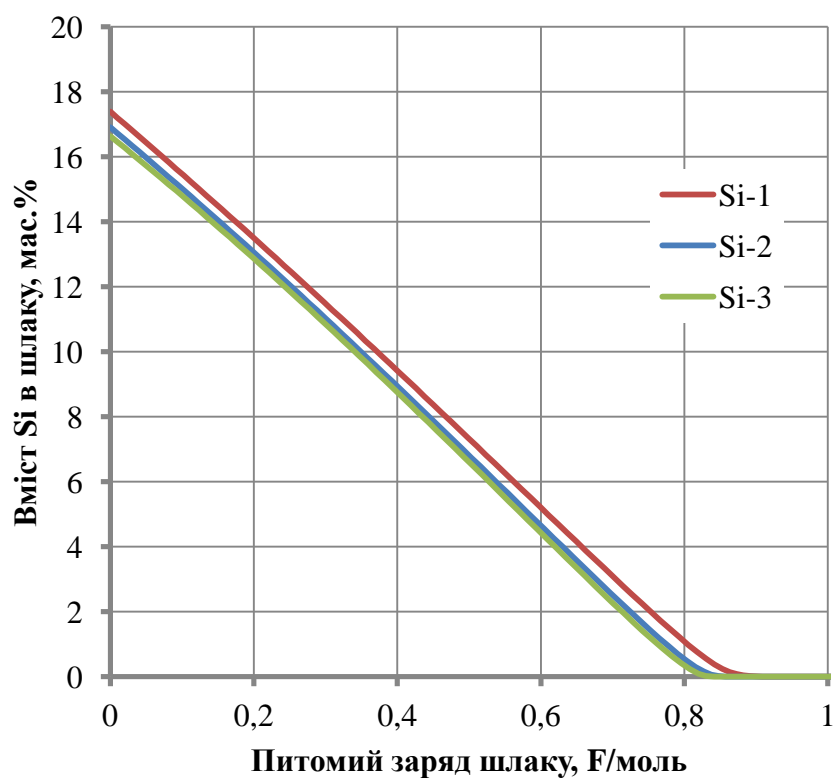
б)

Рис.2.2.1 Залежність вмісту С у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



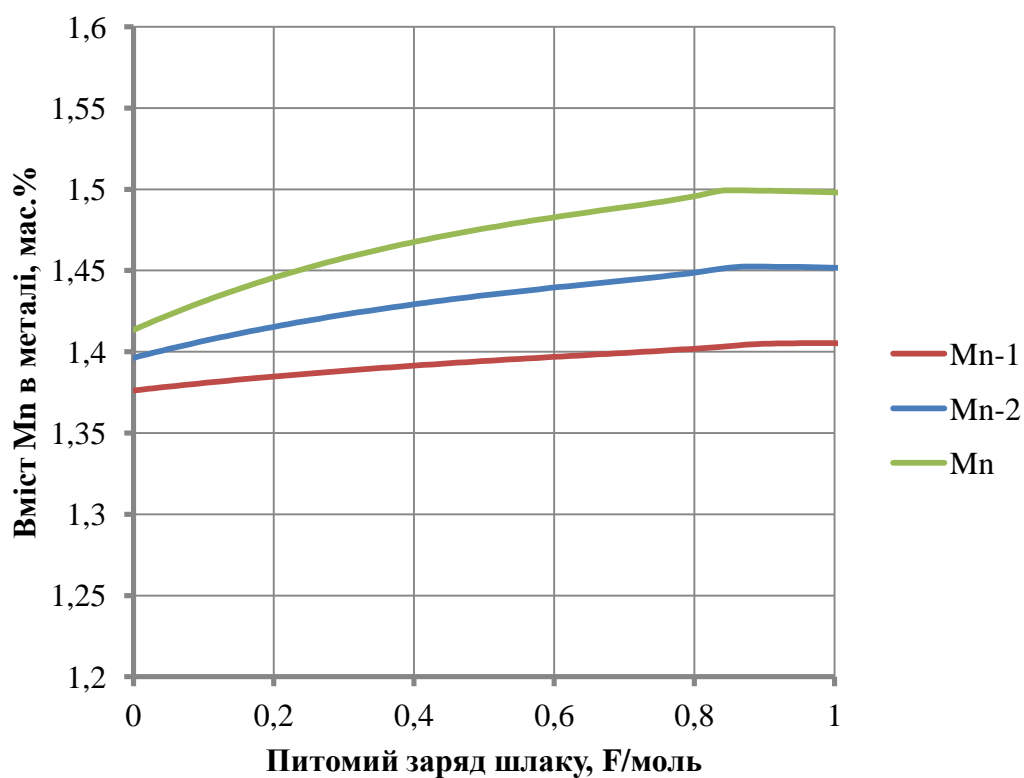
а)



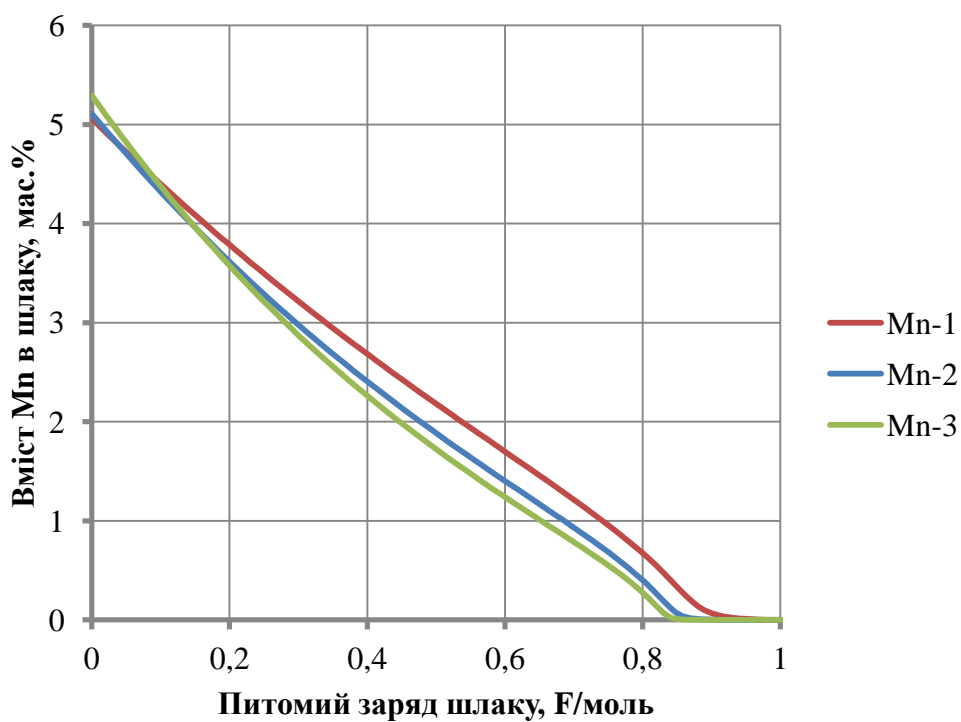
б)

Рис.2.2.2 Залежність вмісту Si у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



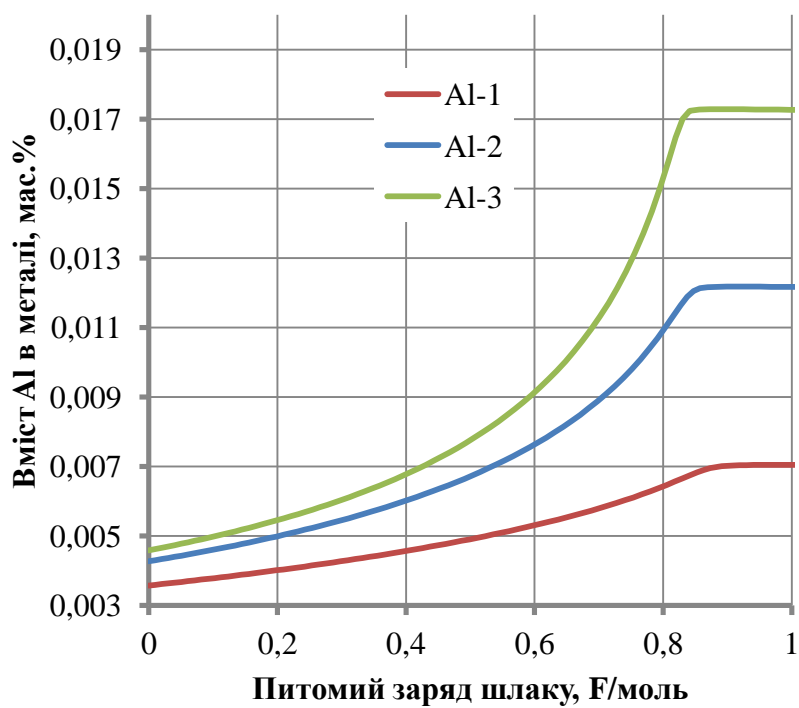
а)



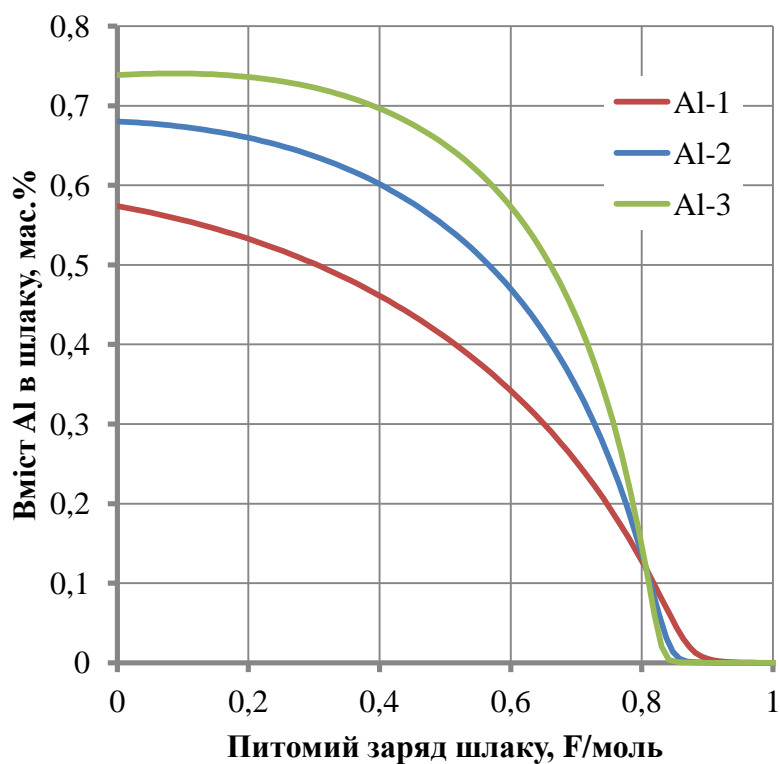
б)

Рис.2.2.3 Залежність вмісту Mn у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



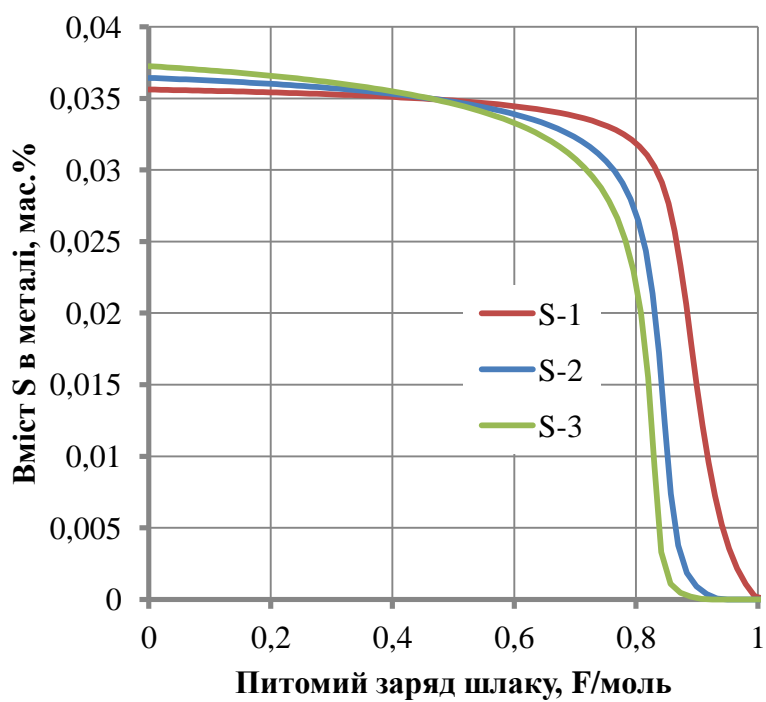
а)



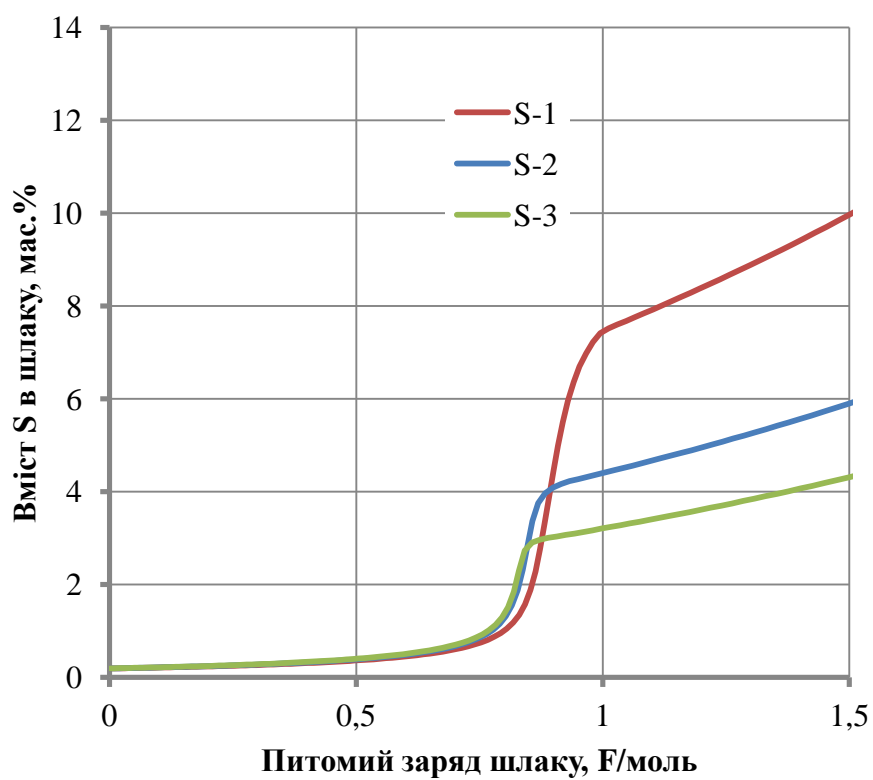
б)

Рис.2.2.4 Залежність вмісту Al у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



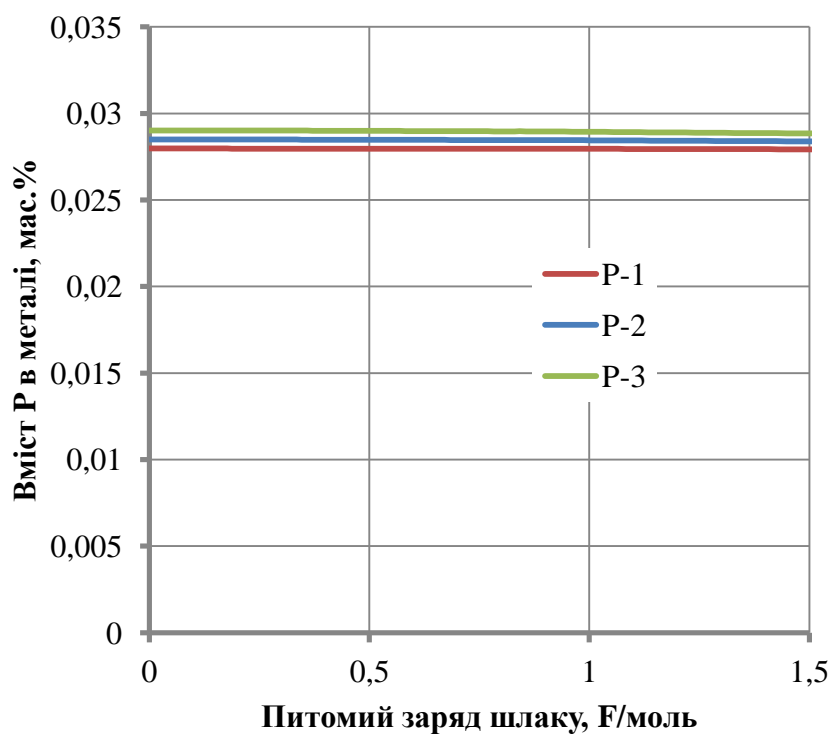
а)



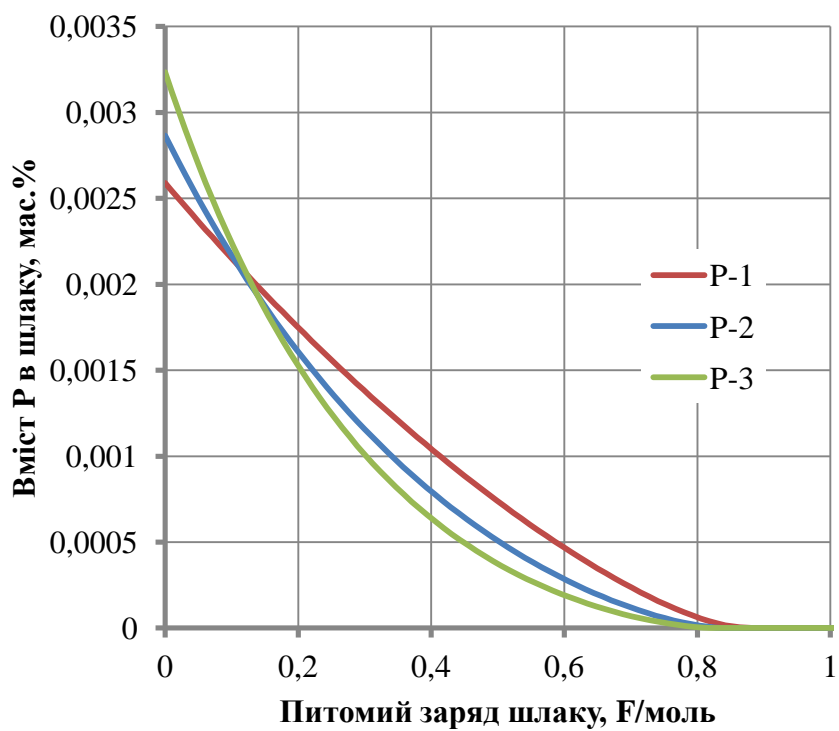
б)

Рис.2.2.5 Залежність вмісту S у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



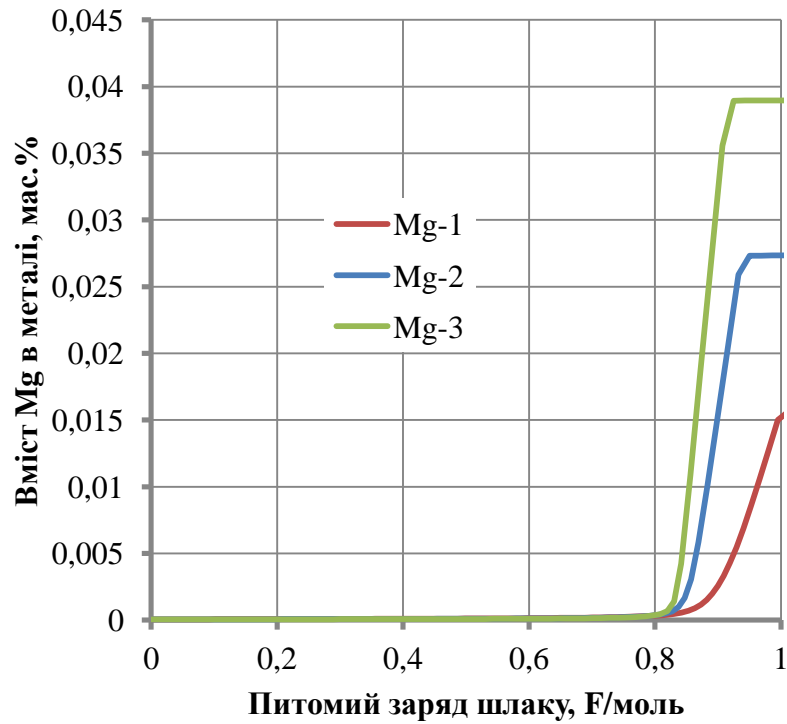
а)



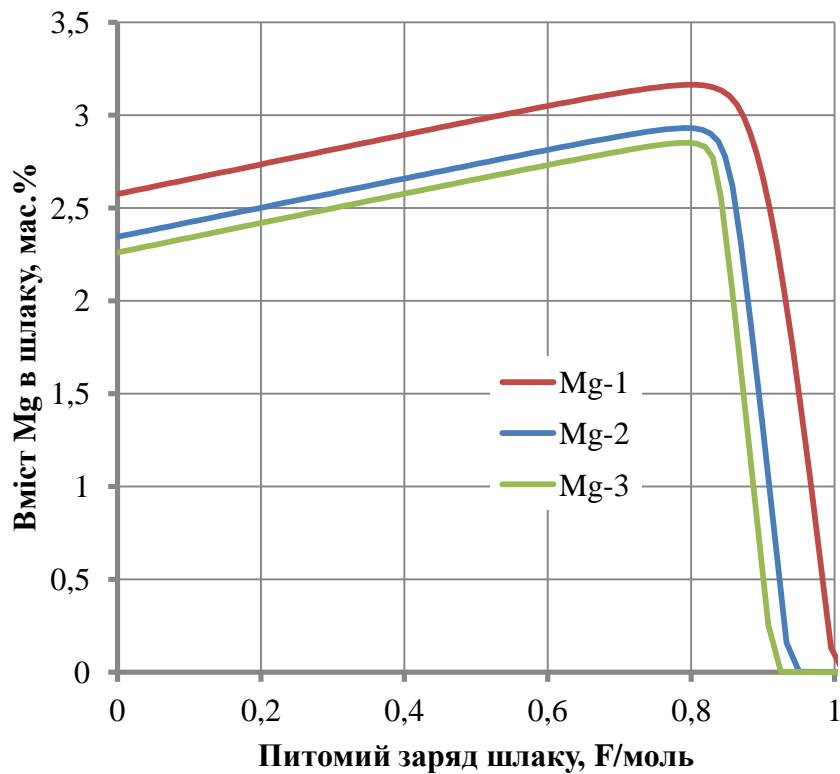
б)

Рис.2.2.6. Залежність вмісту Р у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



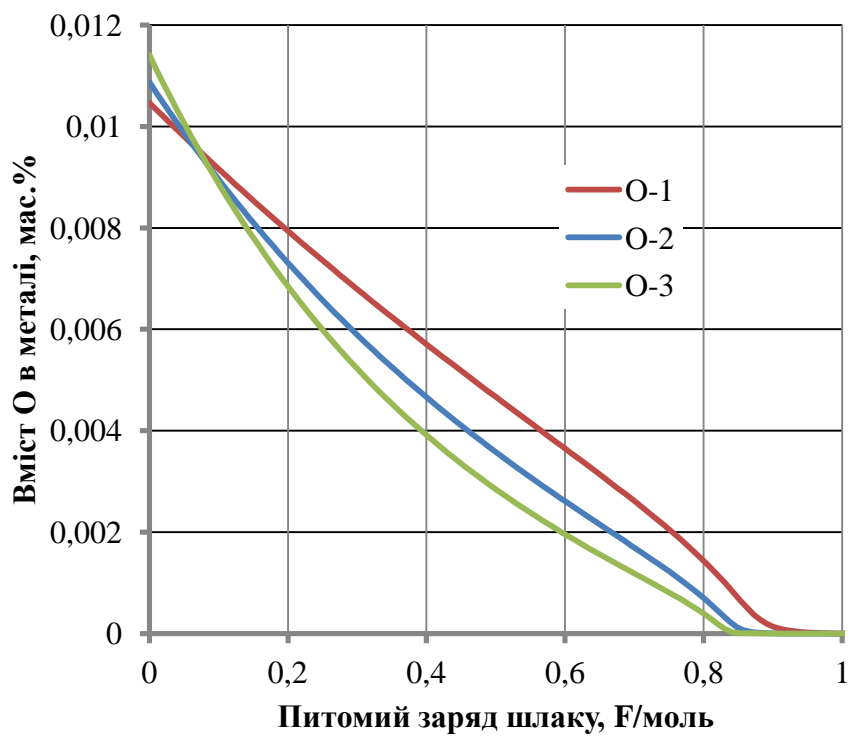
а)



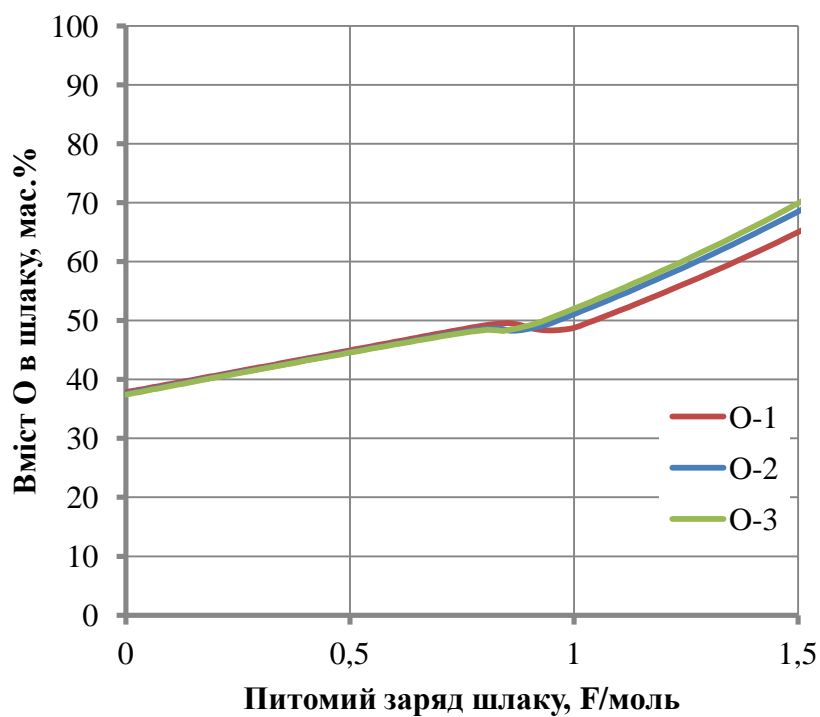
б)

Рис.2.2.7 Залежність вмісту Mg у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



а)

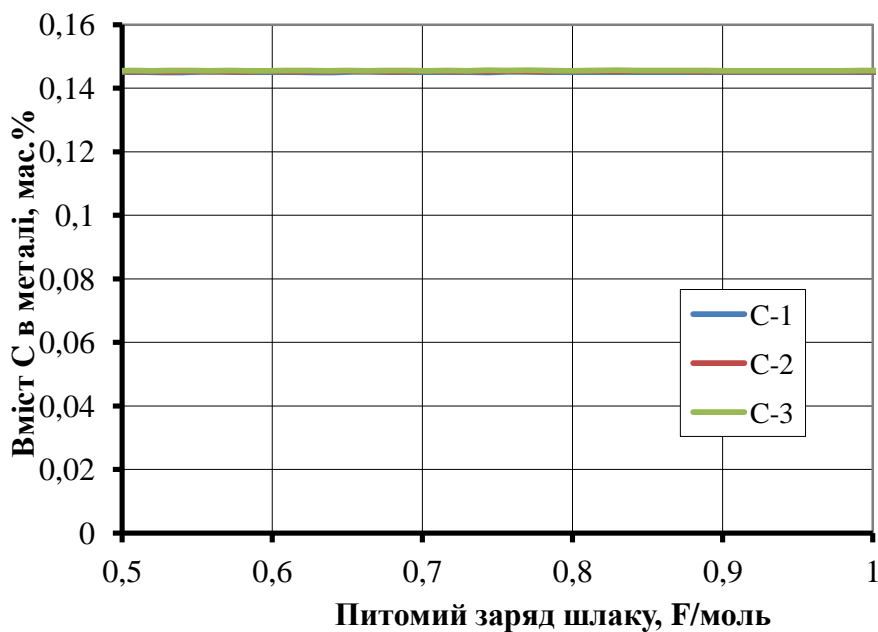


б)

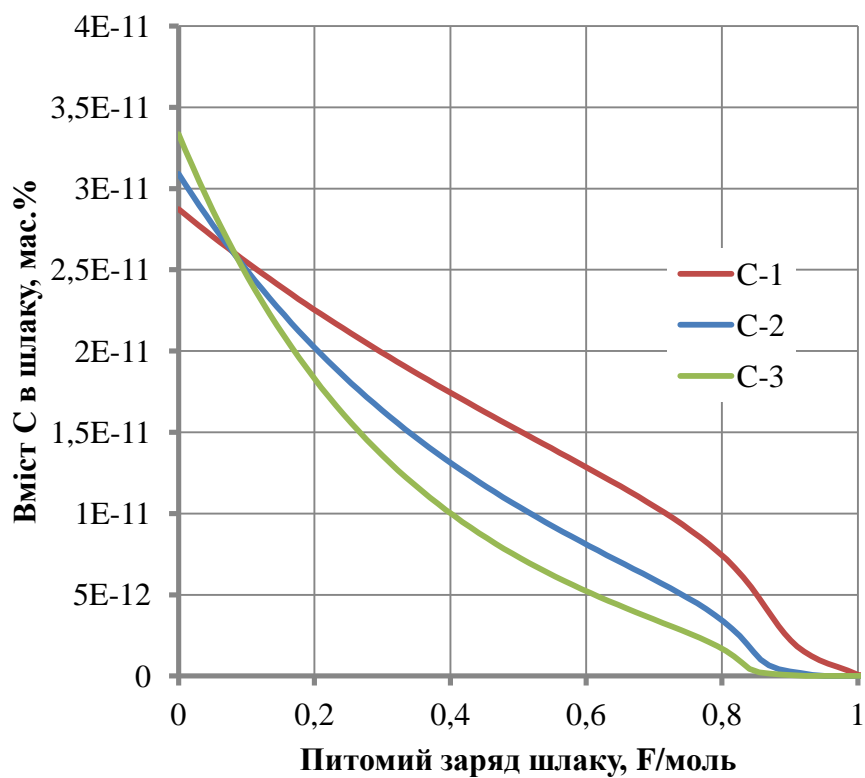
Рис.2.2.9 Залежність вмісту О у сталі 09Г2С від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку

Наведені графіки залежності вмісту елементів у сталі та шлаку сталі 12ГС від питомого заряду шлаку за наступних умов: 1,2 та 3 тони шлаку.



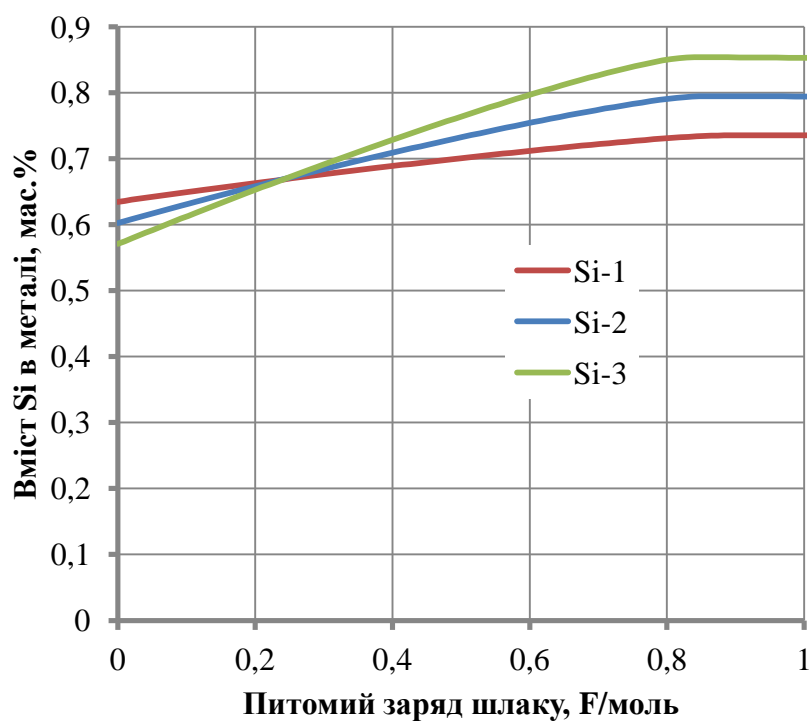
а)



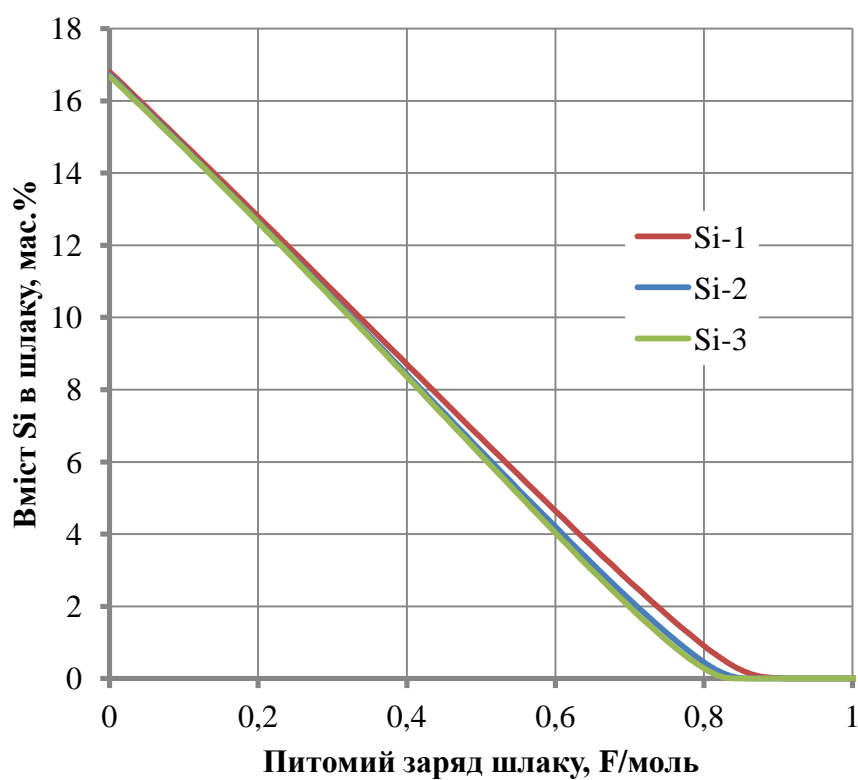
б)

Рис.2.2.11 Залежність вмісту С у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



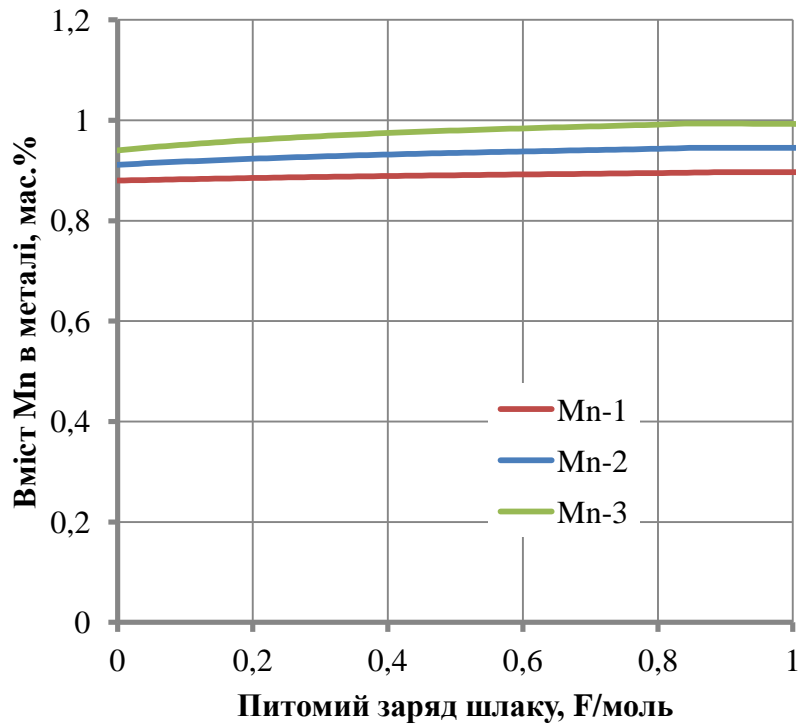
а)



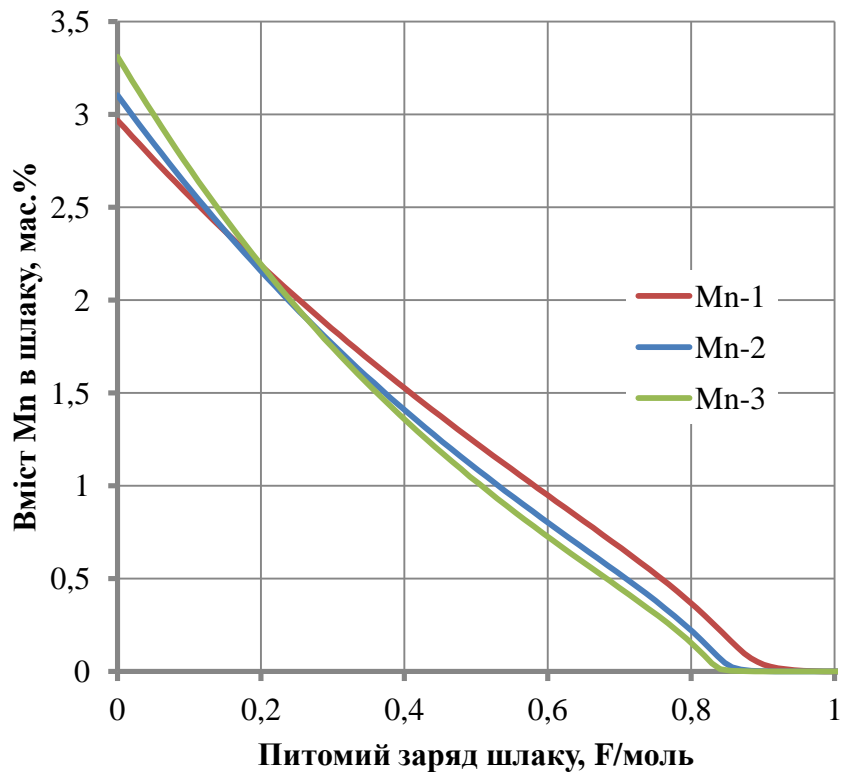
б)

Рис.2.2.12 Залежність вмісту Si у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



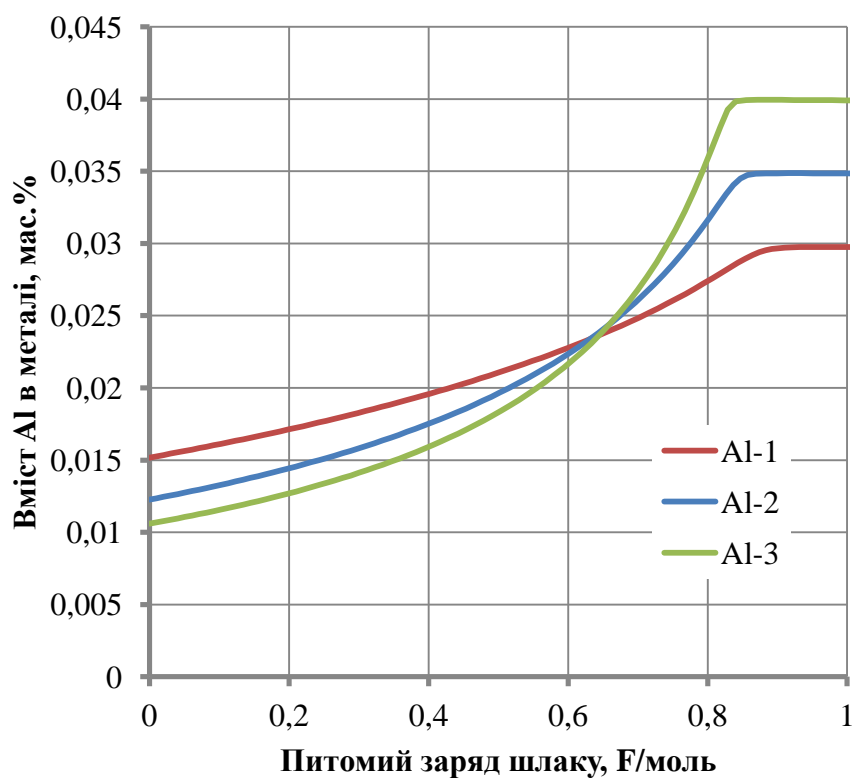
а)



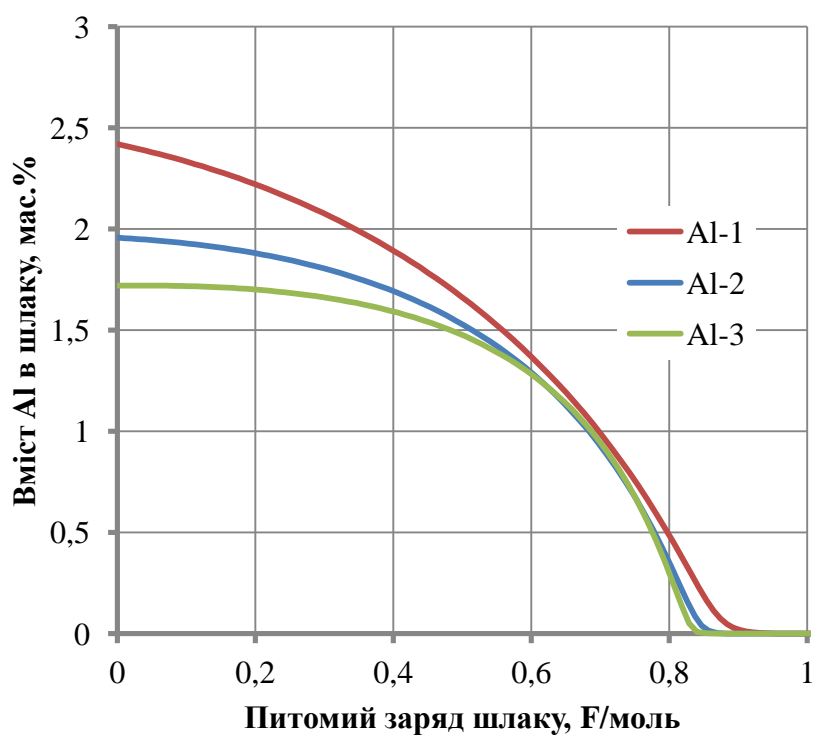
б)

Рис.2.2.13 Залежність вмісту Mn у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



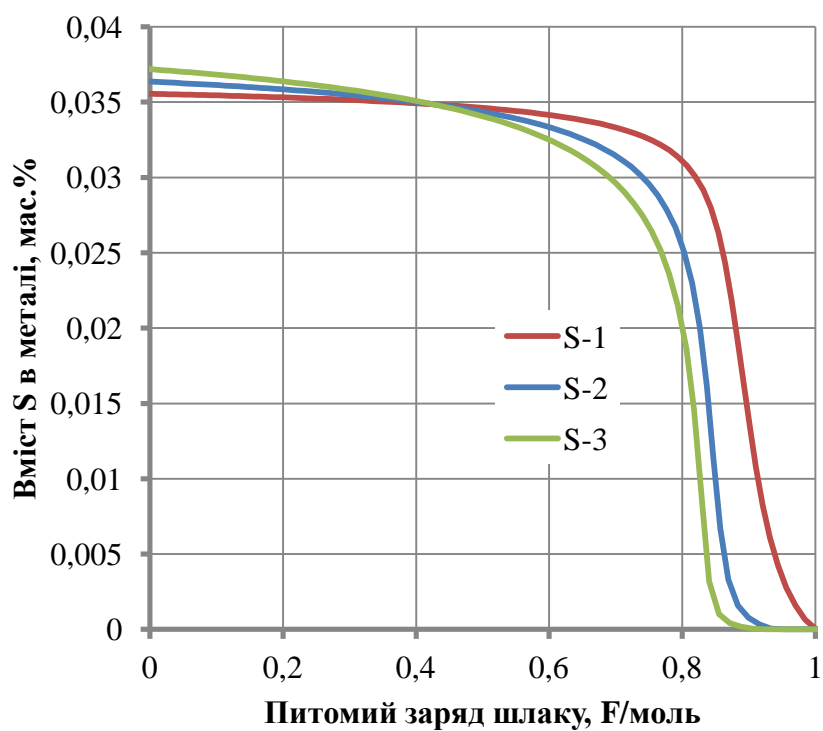
а)



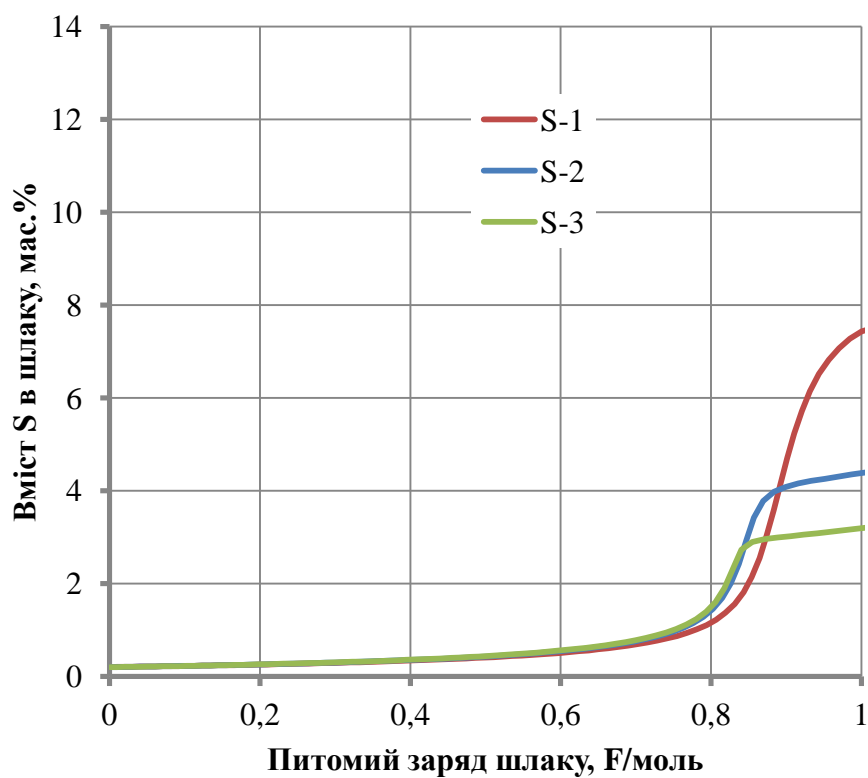
б)

Рис.2.2.14 Залежність вмісту Al у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



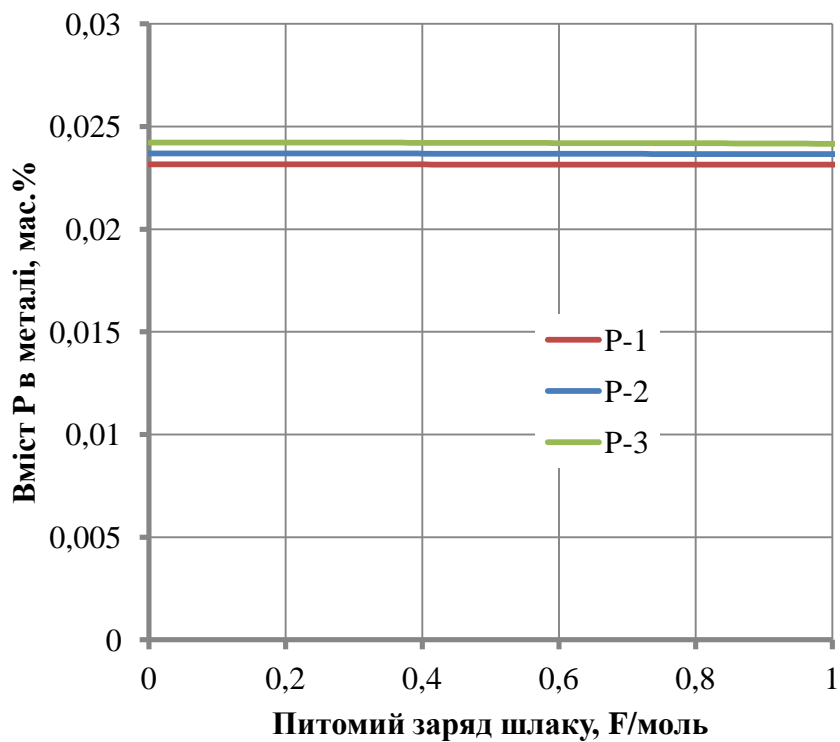
а)



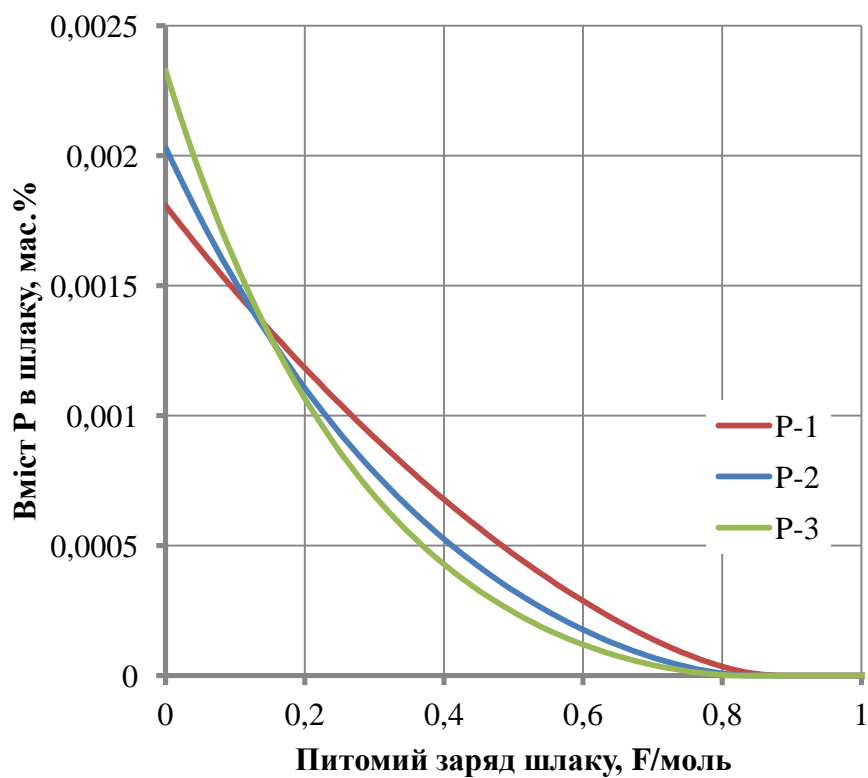
б)

Рис.2.2.15 Залежність вмісту S у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



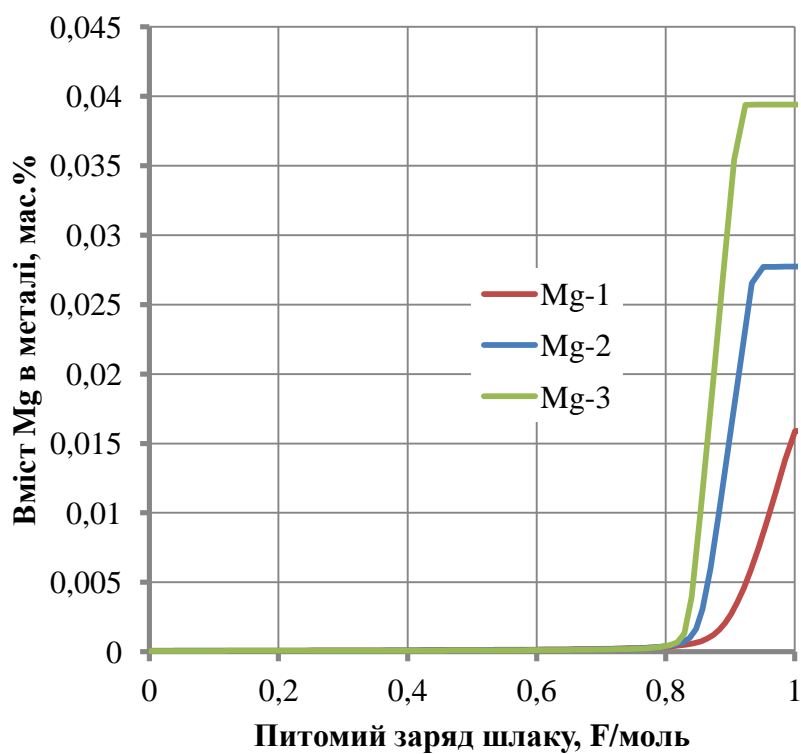
а)



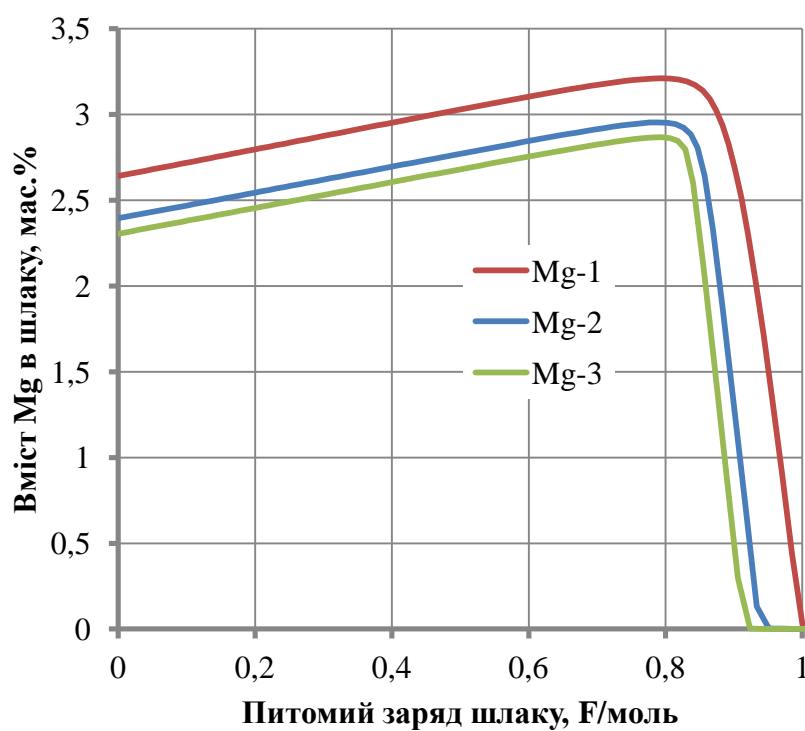
б)

Рис.2.2.16 Залежність вмісту Р у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



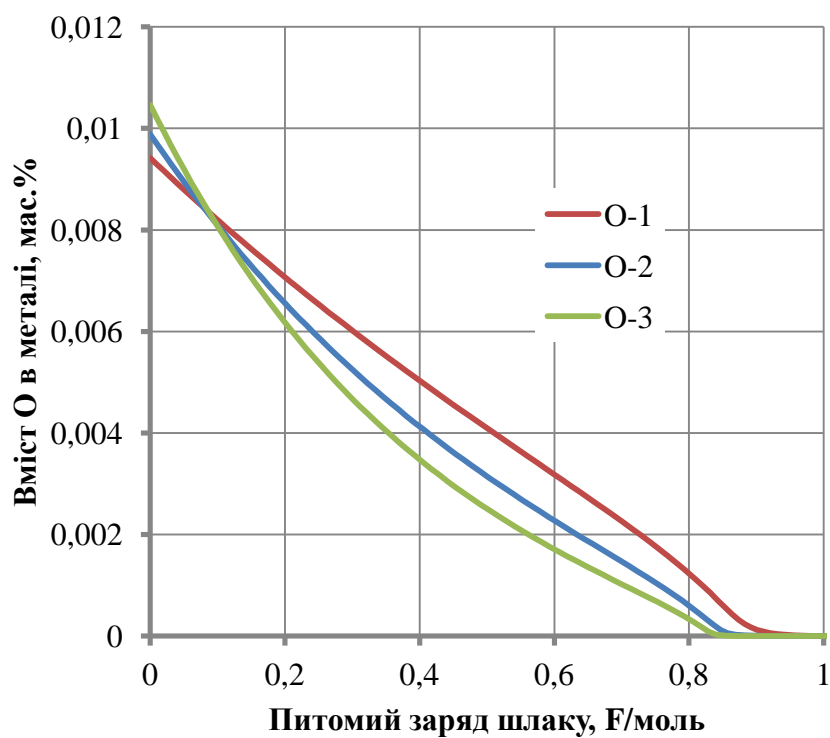
а)



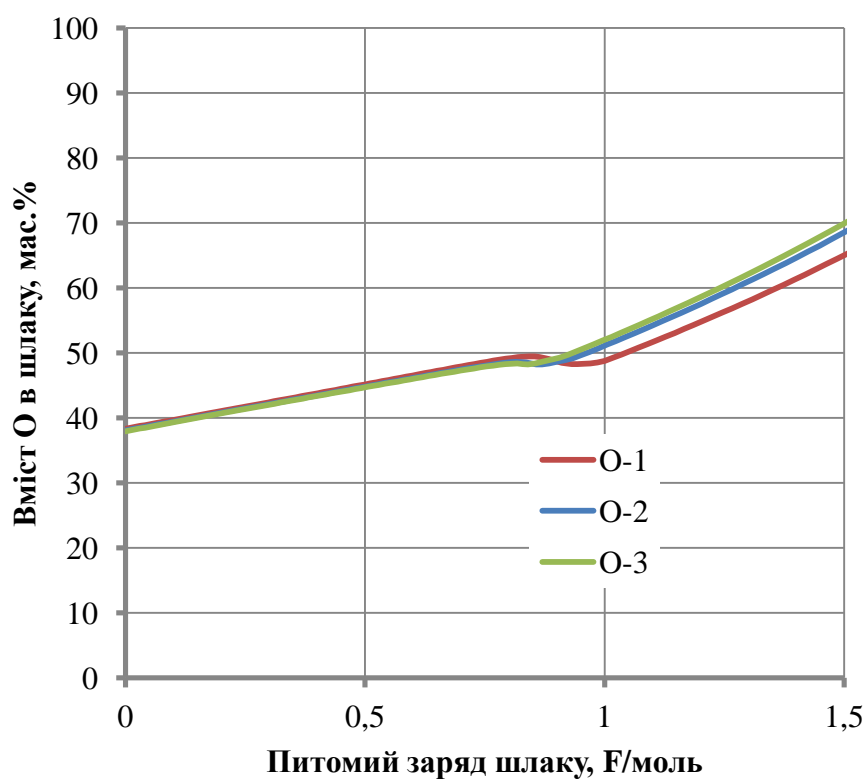
б)

Рис.2.2.17 Залежність вмісту Mg у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



а)

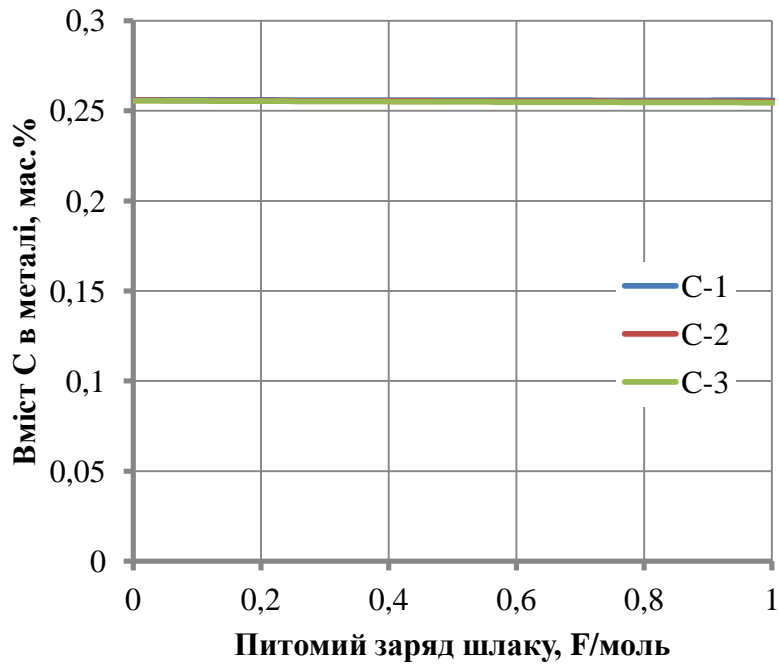


б)

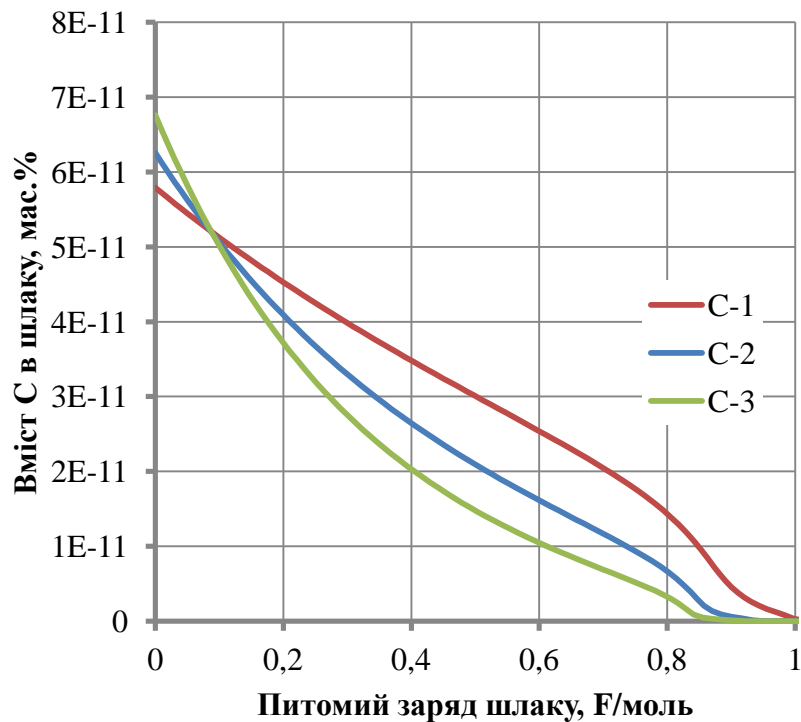
Рис.2.2.20 Залежність вмісту О у сталі 12ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку

Наведені графіки залежності вмісту елементів у шлаку та металі сталі 30ГС від питомого заряду шлаку при наступному параметрі: 1,2 та 3 тони шлаку



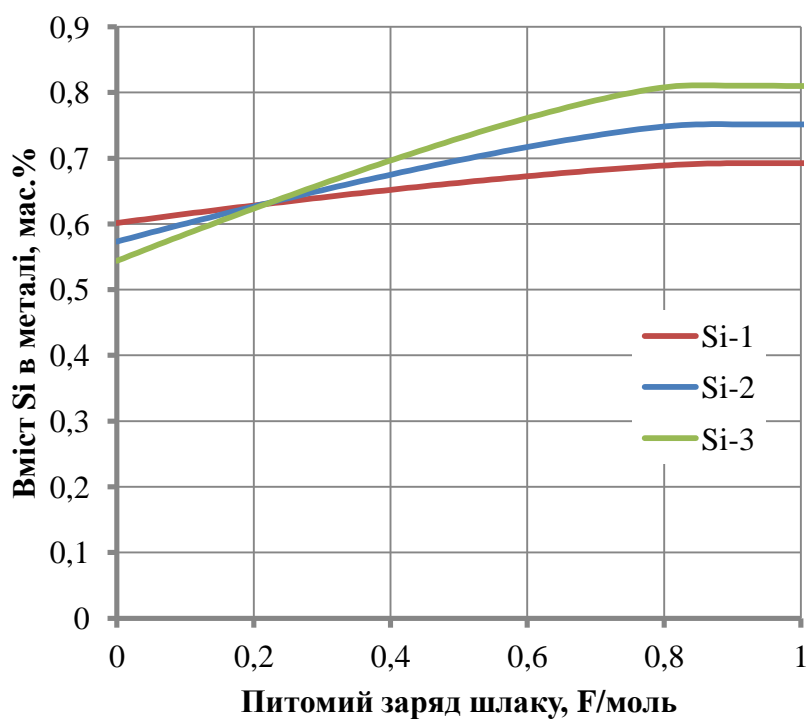
а)



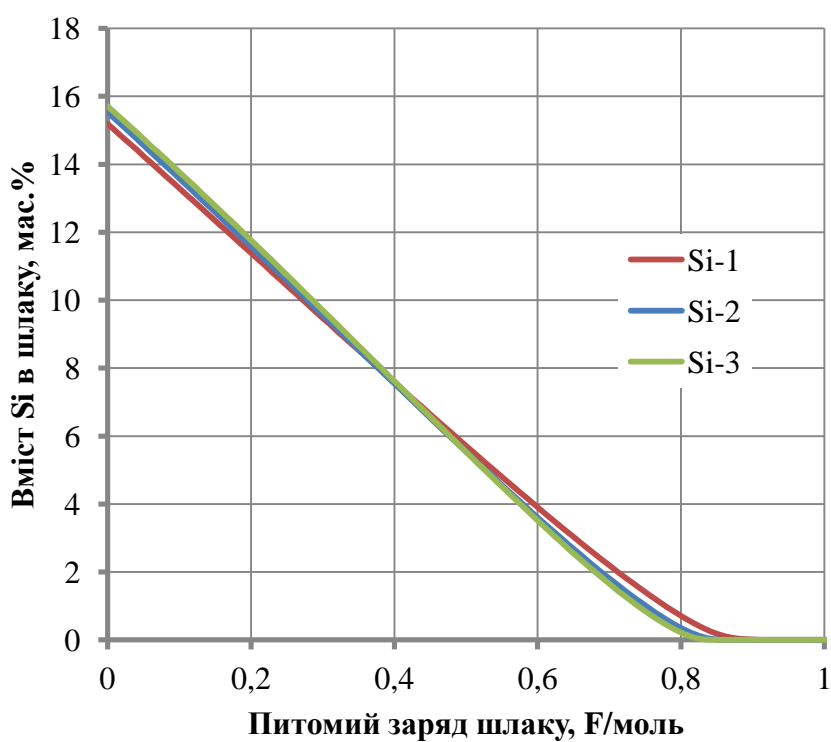
б)

Рис.2.2.21 Залежність вмісту С у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



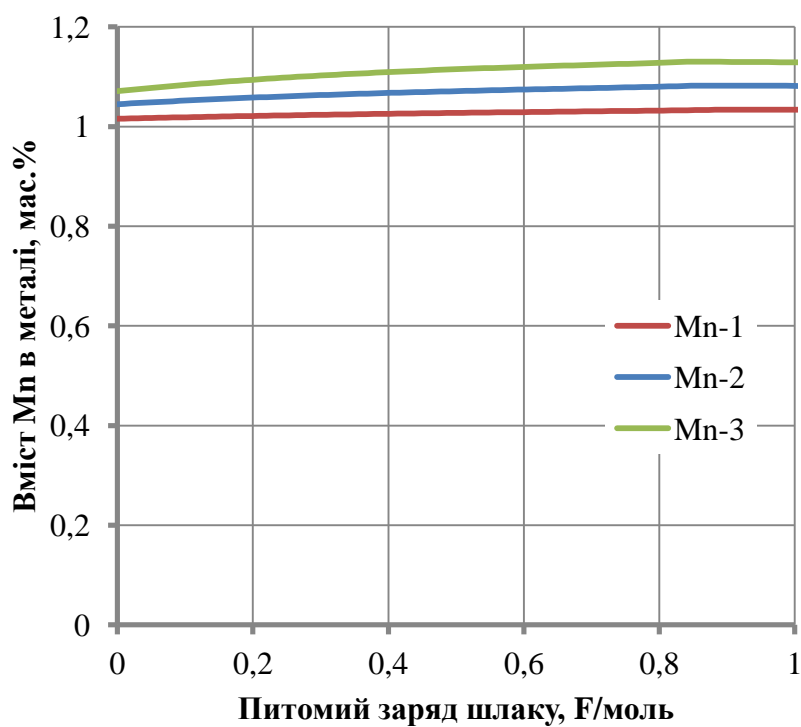
а)



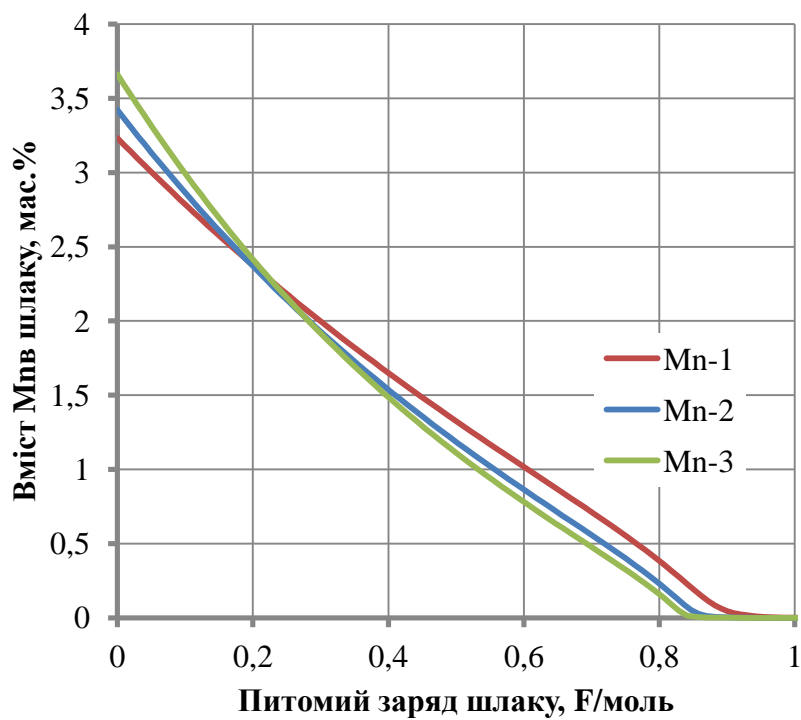
б)

Рис.2.2.22 Залежність вмісту Si у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



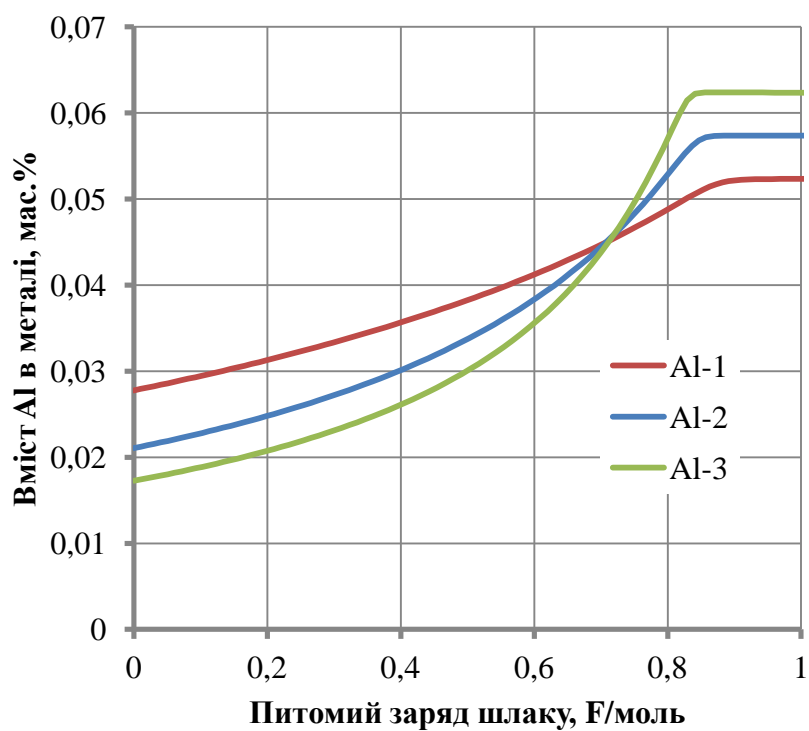
а)



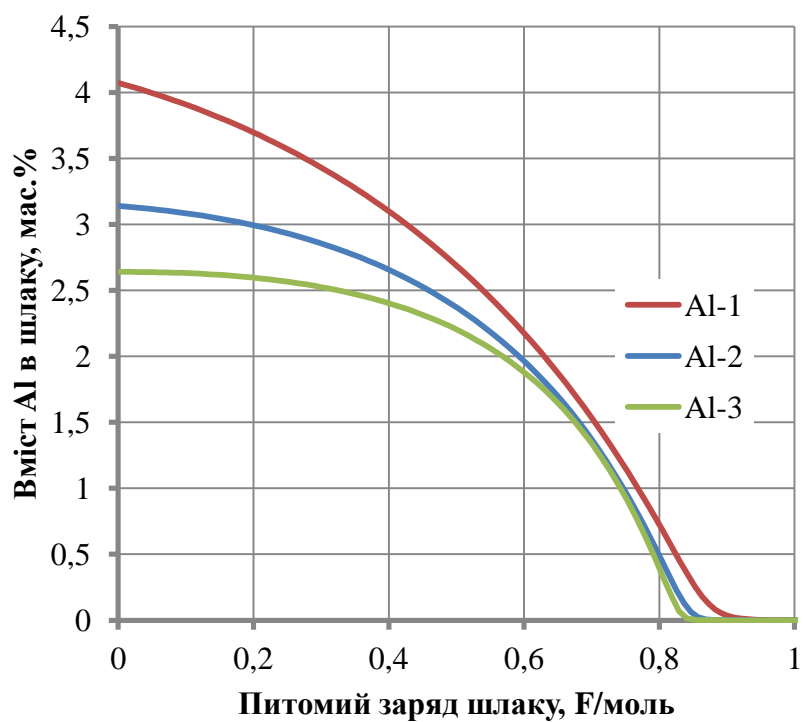
б)

Рис.2.2.23 Залежність вмісту Mn у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



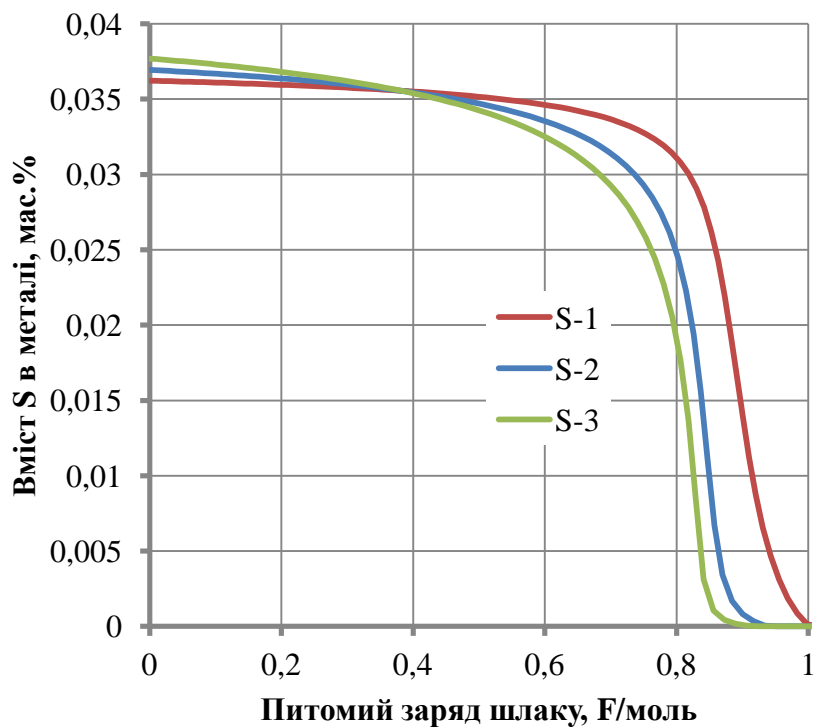
а)



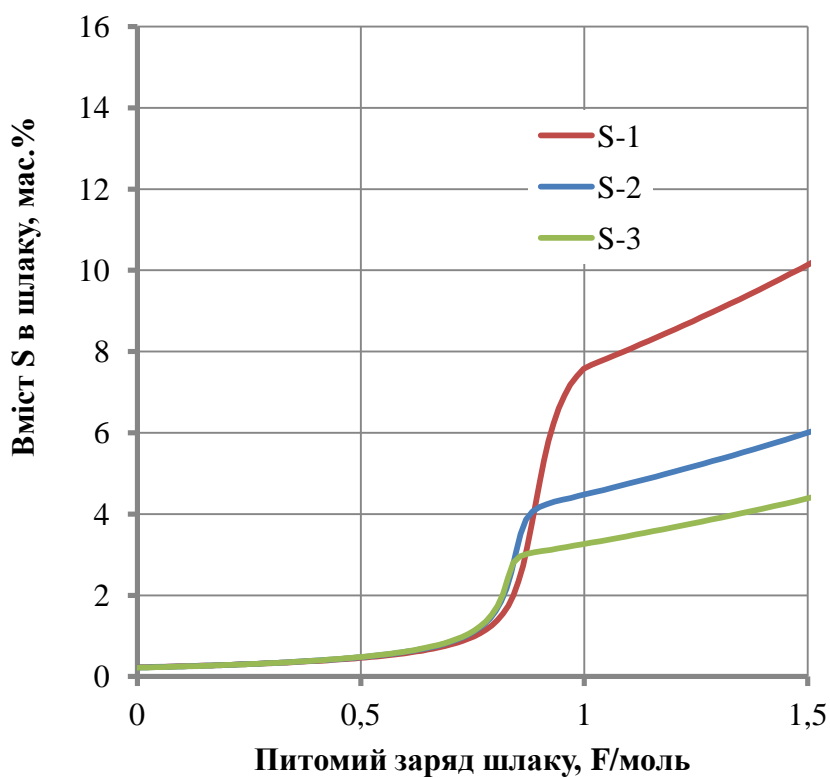
б)

Рис.2.2.24 Залежність вмісту Al у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



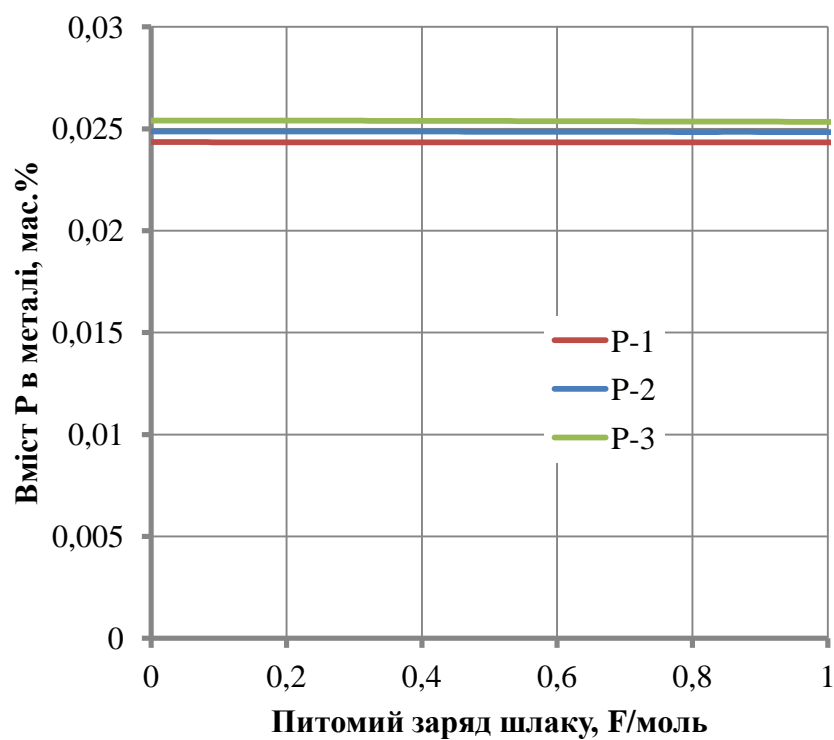
а)



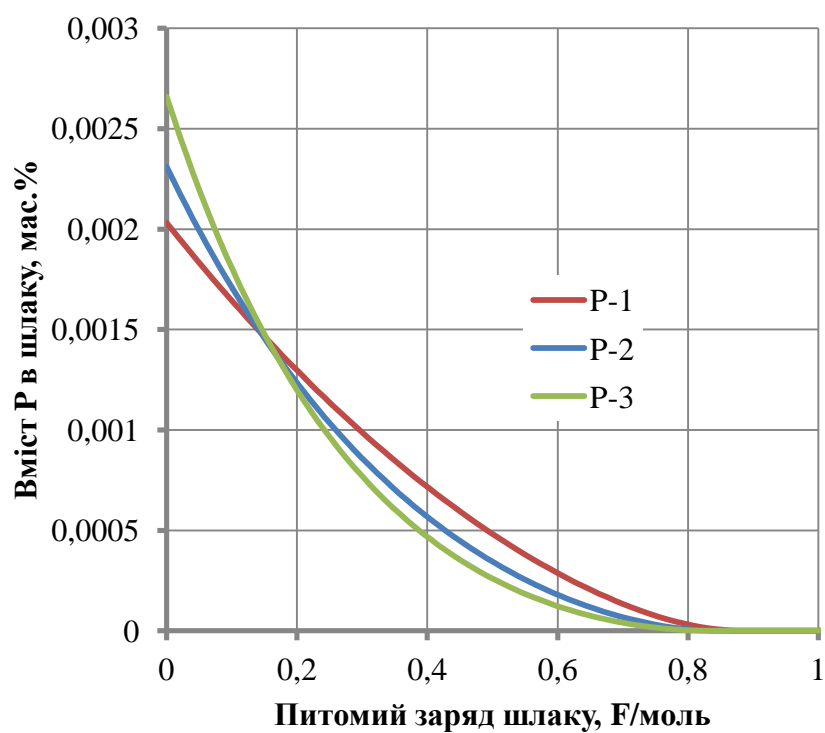
б)

Рис.2.2.25 Залежність вмісту S у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



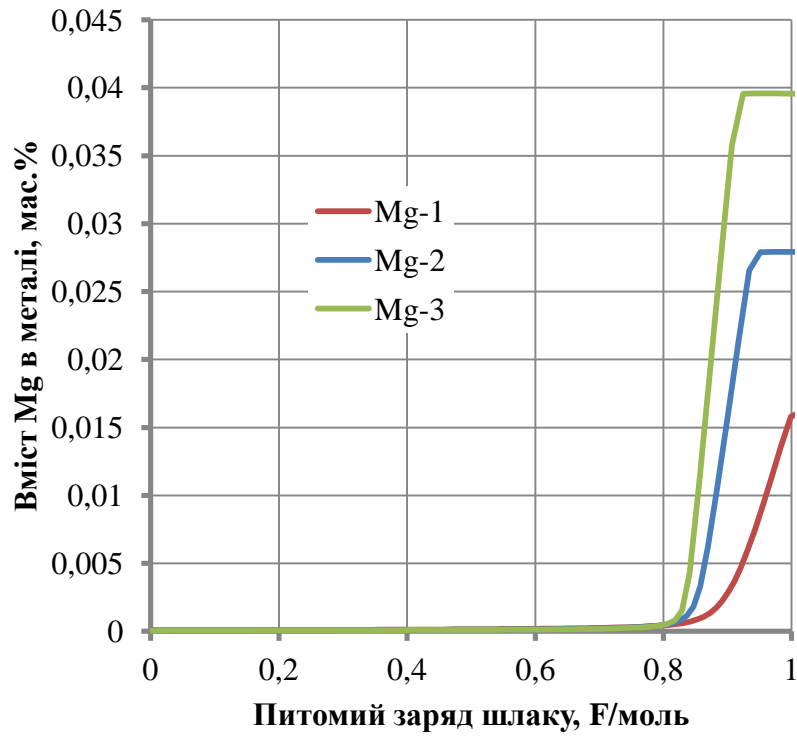
а)



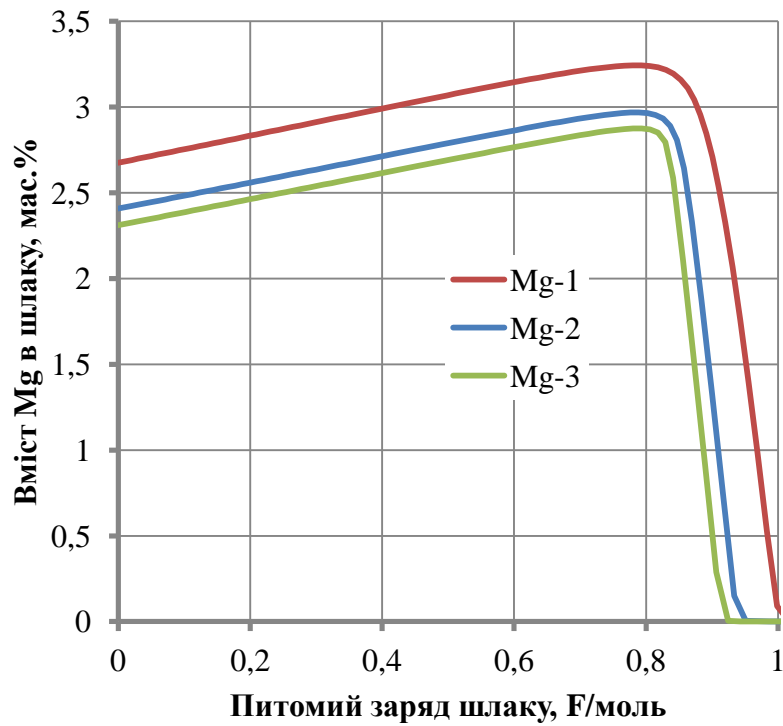
б)

Рис.2.2.26 Залежність вмісту P у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



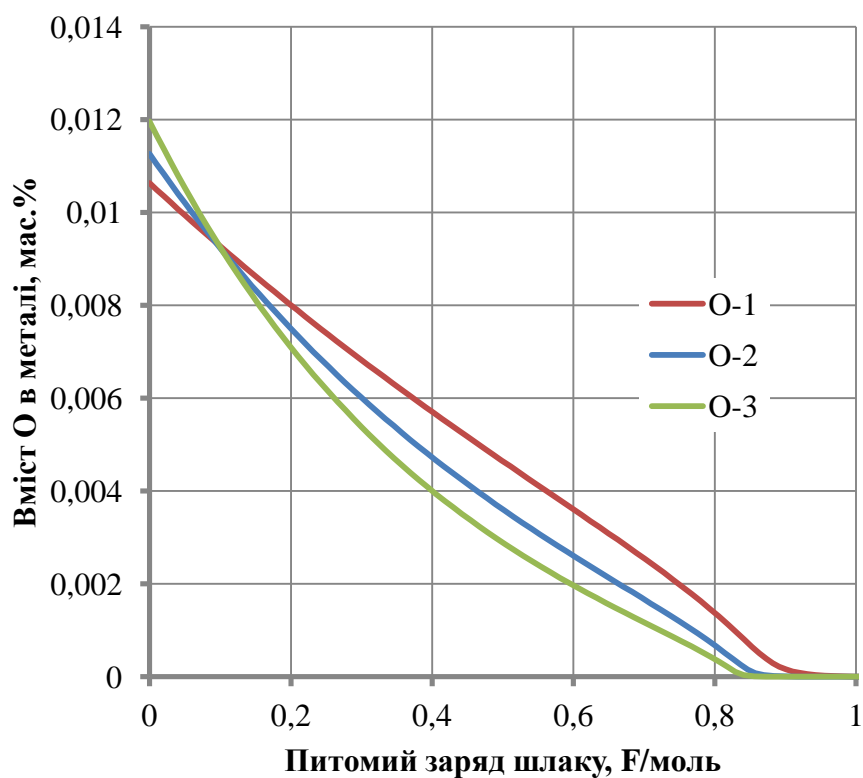
а)



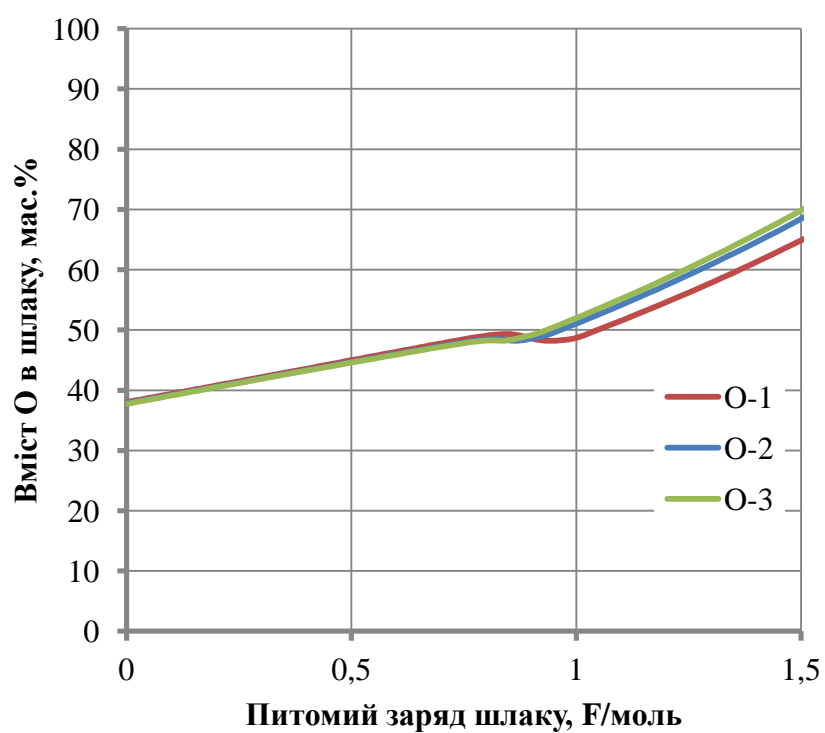
б)

Рис.2.2.27 Залежність вмісту Mg у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



а)

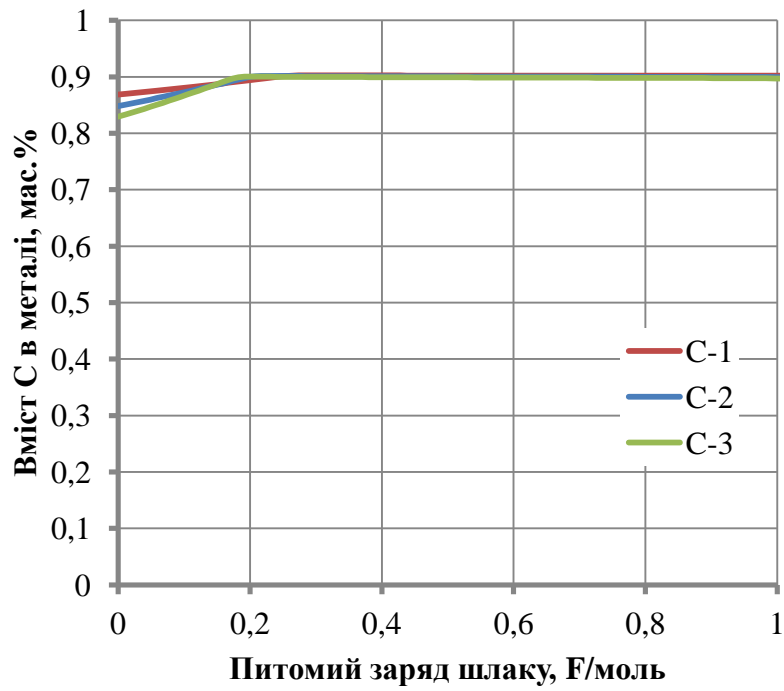


б)

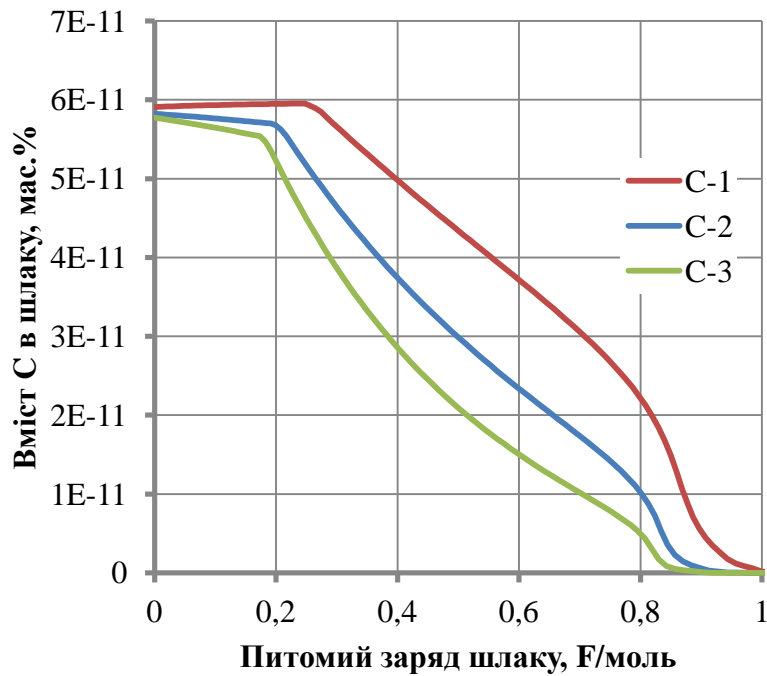
Рис.2.2.29 Залежність вмісту О у сталі 30ГС від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку

Наведені графіки залежності вмісту елементів у сталі та шлаку сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку за наступних умов: 1,2 та 3 тони шлаку.



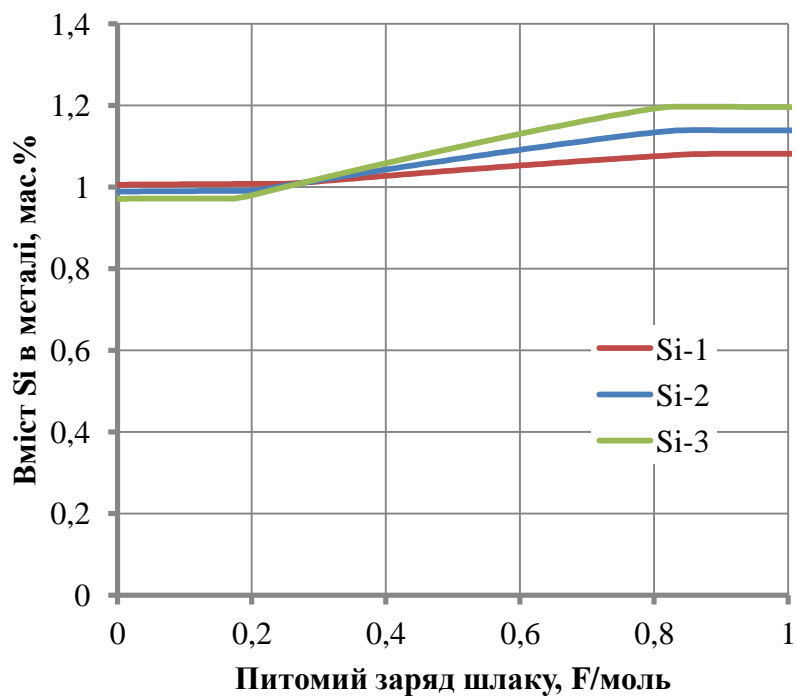
а)



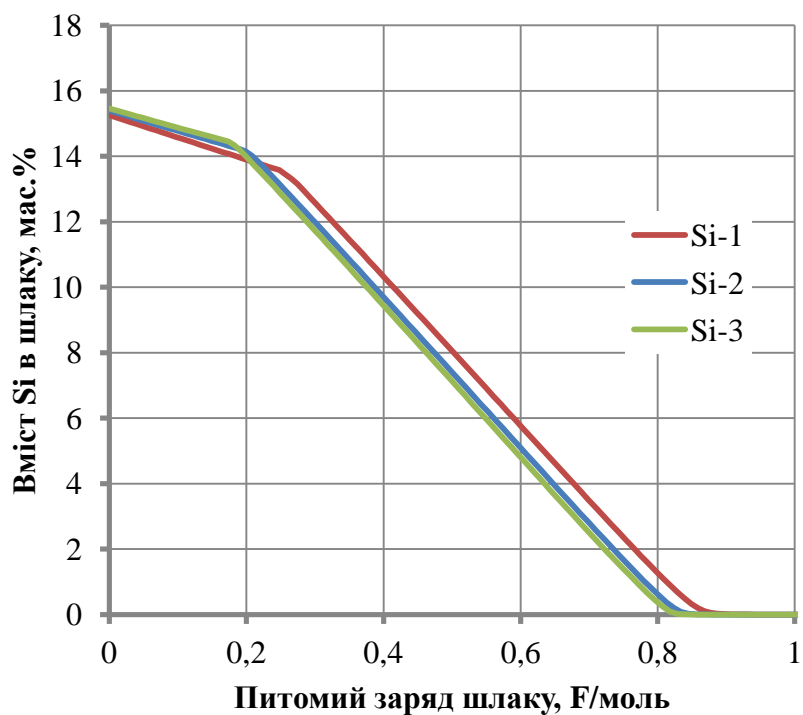
б)

Рис.2.2.30 Залежність вмісту С у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



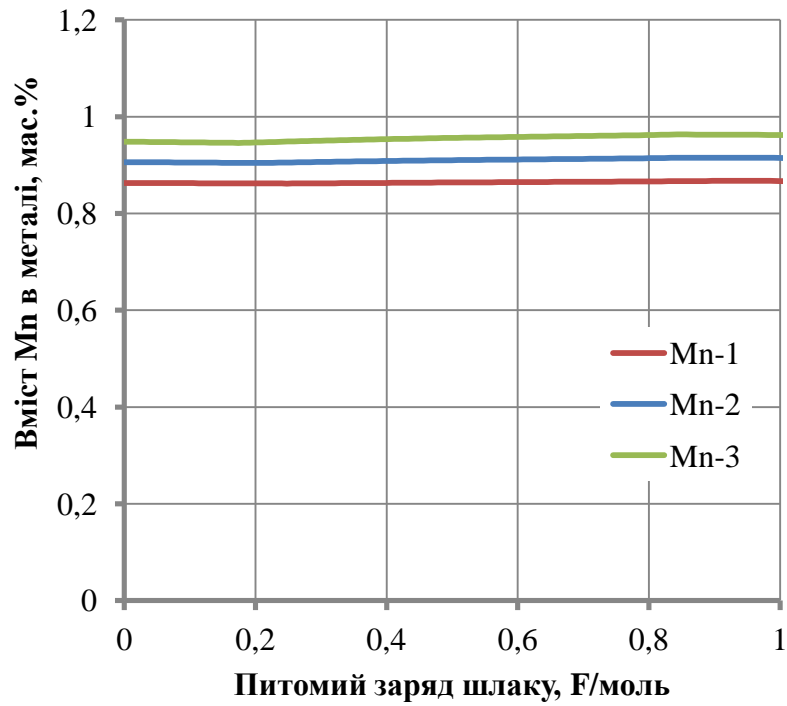
а)



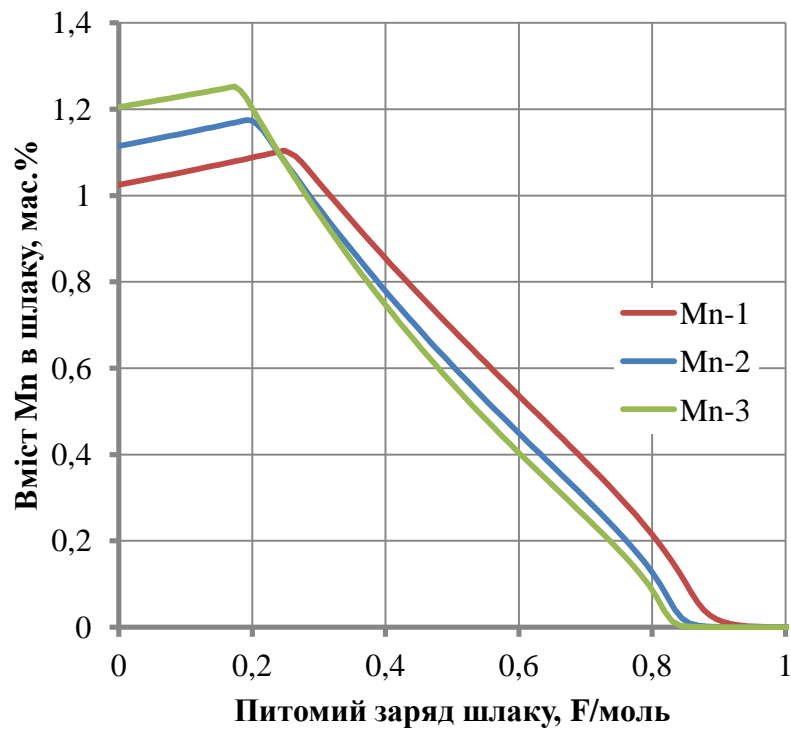
б)

Рис.2.2.31 Залежність вмісту Si у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



а)

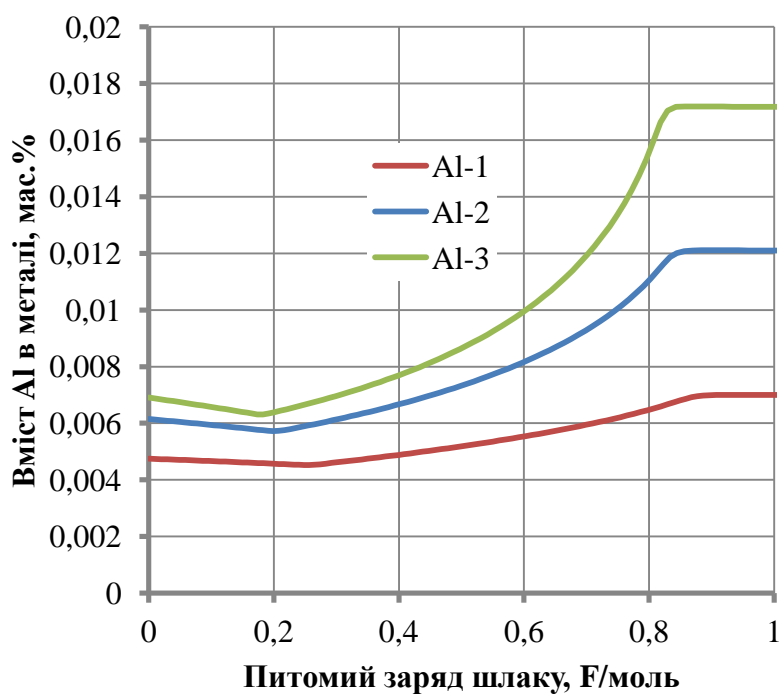


б)

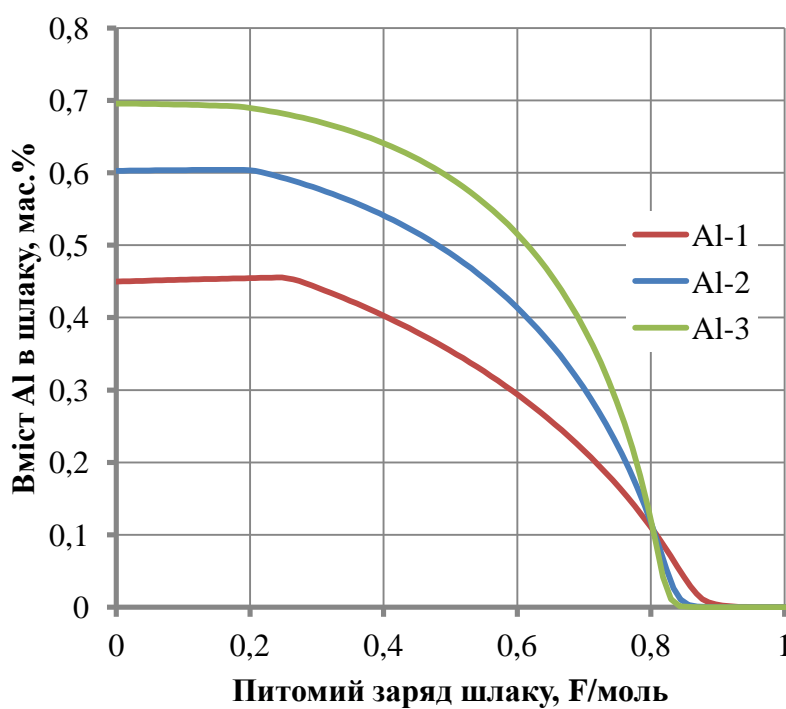
Рис.2.2.32 Залежність вмісту Mn у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку

в:

а) металі; б) шлаку



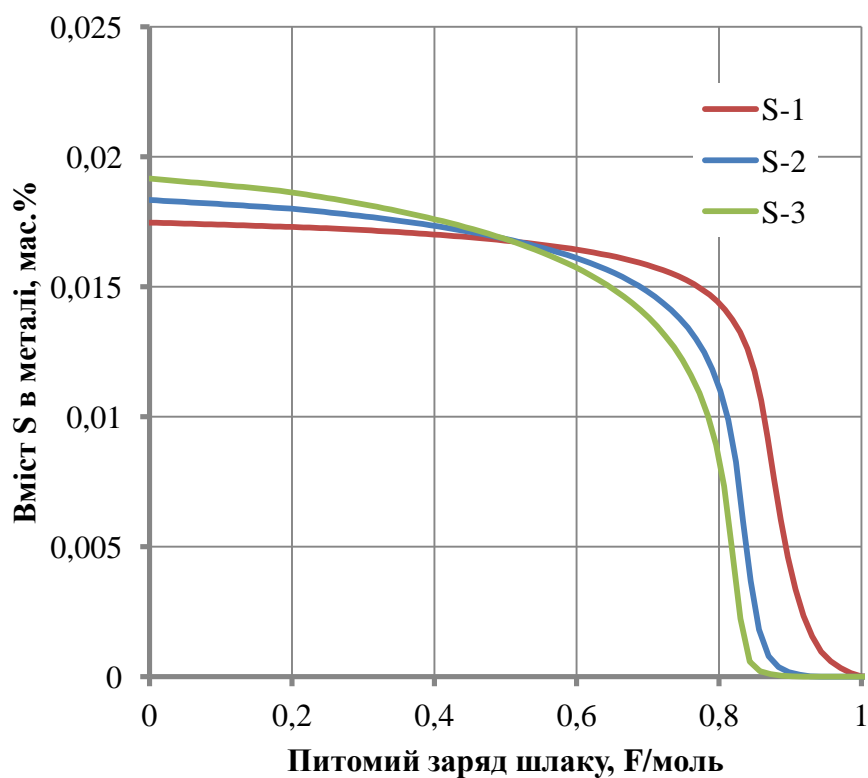
а)



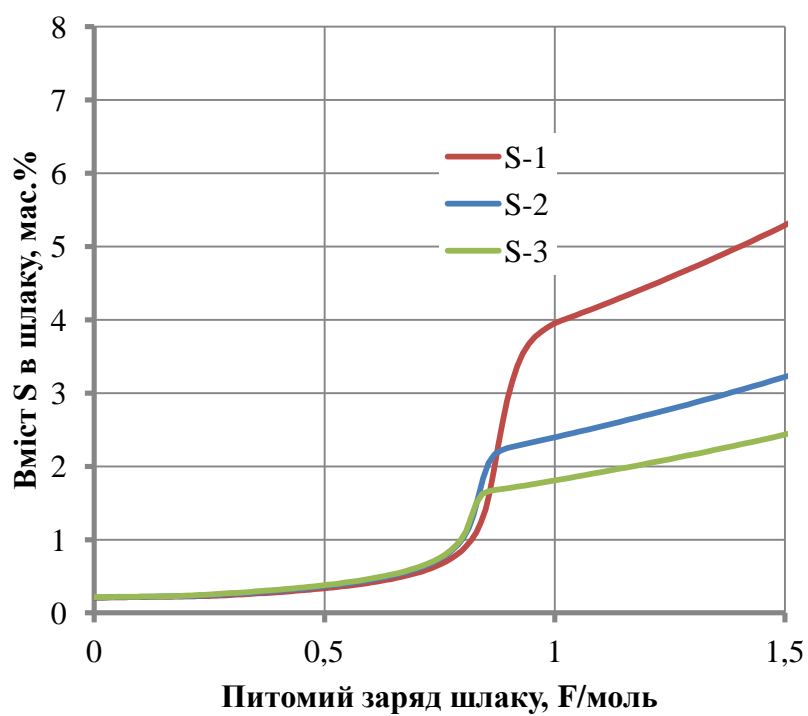
б)

Рис.2.2.33 Залежність вмісту Al у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



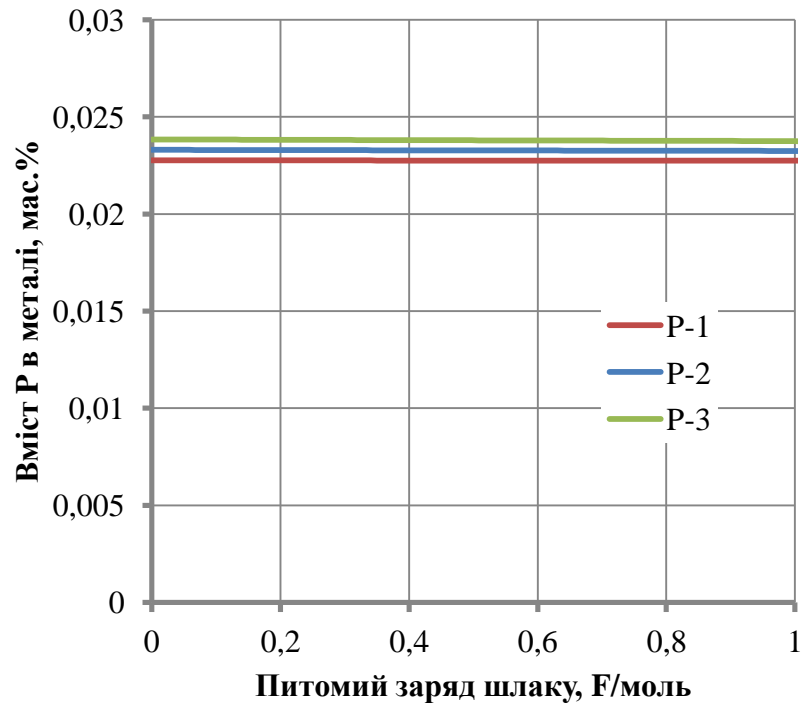
а)



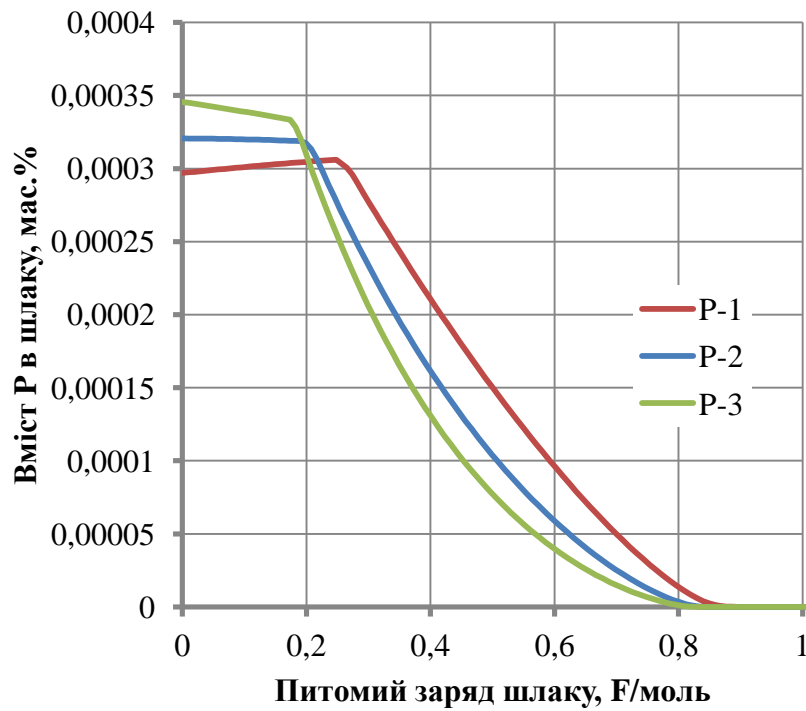
б)

Рис.2.2.34 Залежність вмісту S у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



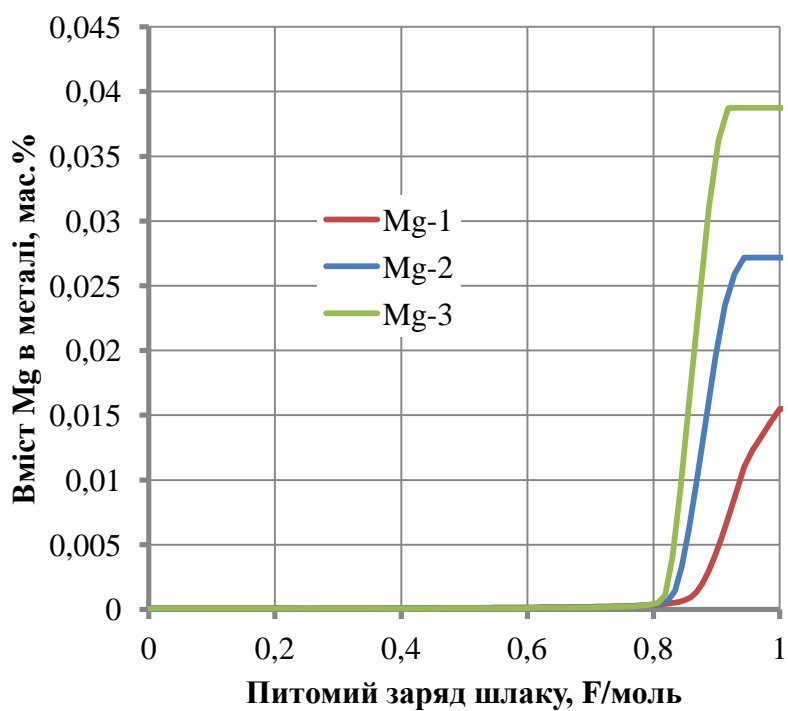
а)



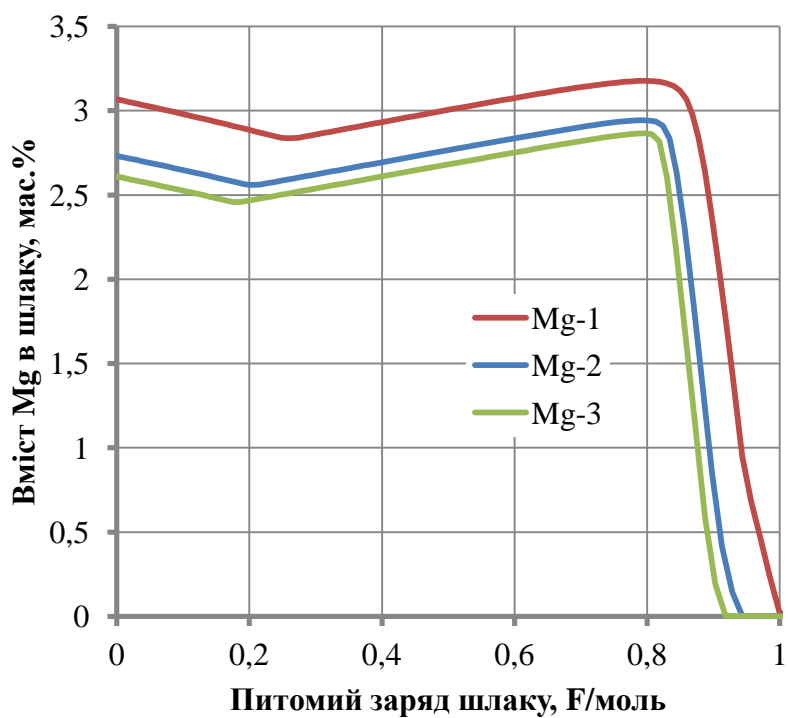
б)

Рис.2.2.35 Залежність вмісту Р у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку



а)

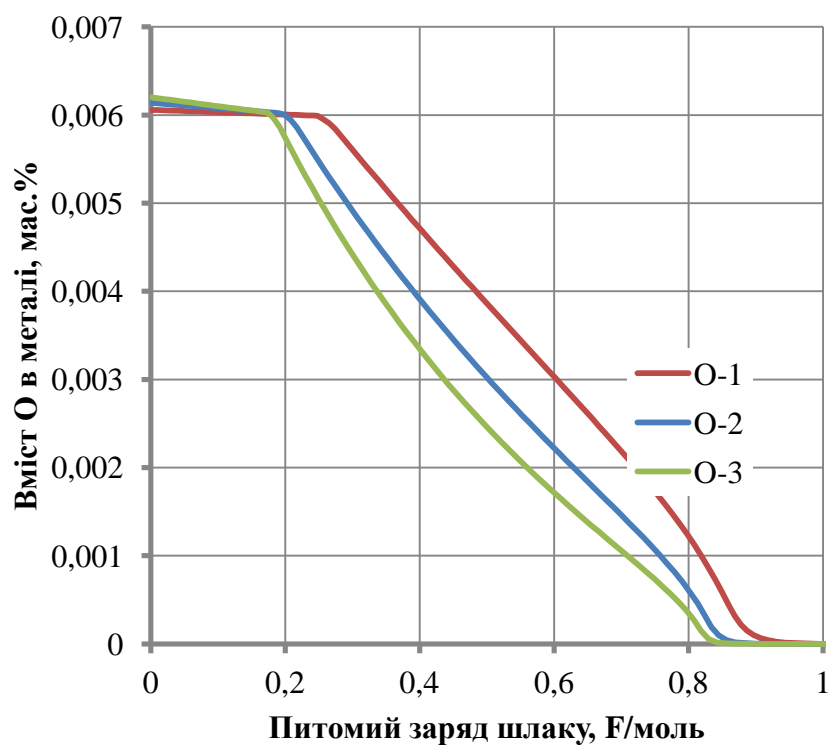


б)

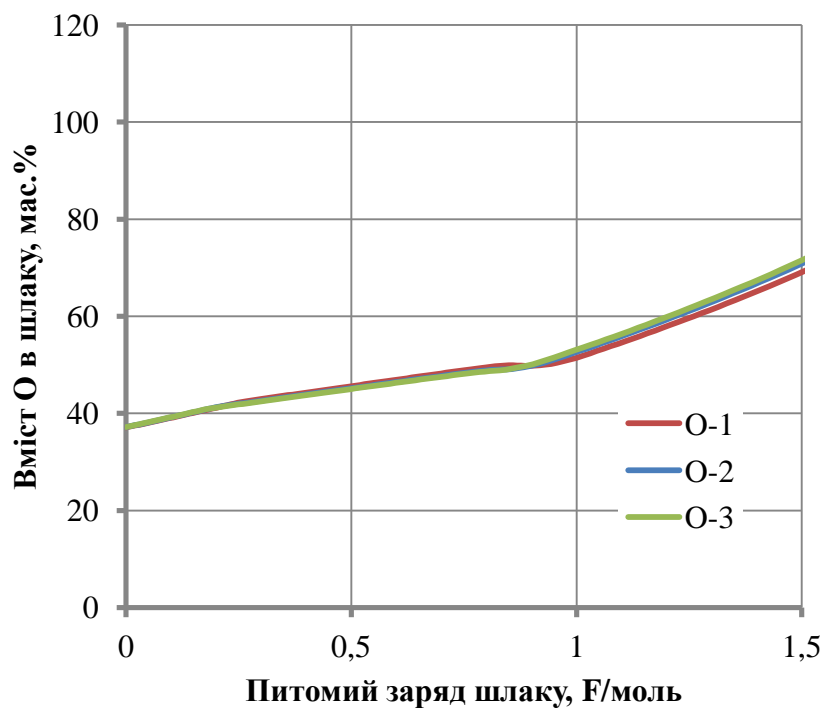
Рис.2.2.36 Залежність вмісту Mg у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку

в:

а) металі; б) шлаку



а)

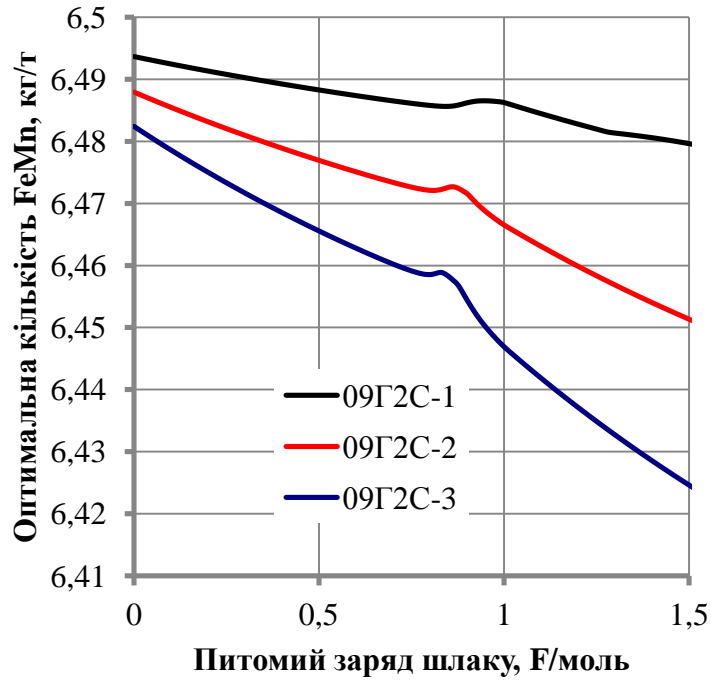


б)

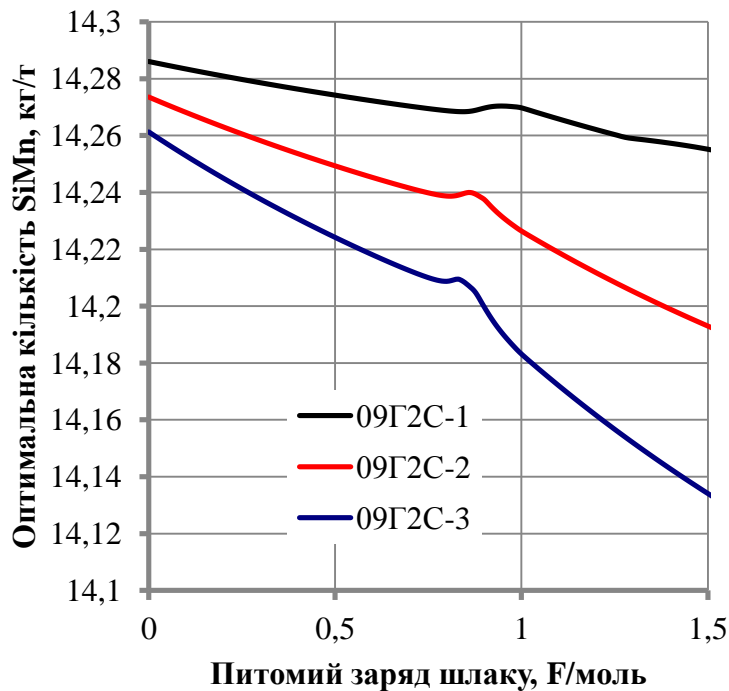
Рис.2.2.37 Залежність вмісту O у сталі 35ХГСА від питомого заряду шлаку в:

а) металі; б) шлаку

2.2.2 Вміст феросплавів



а)



б)

Рис.2.2.10 Залежність оптимальної кількості матеріалів від питомого заряду шлаку сталі 09Г2С: феромарганцю ФМн78 (а); силікомарганцю МнС17 (б)

2.2.3.Хімічний склад сталей

Таблиця 2.3.1 – Хімічний склад металу, шлаку та газу сталі 09Г2С

Метал

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 97,9 | 97,9 | 97,9 | 150728 | 150782 | 150755 |
| C | 0,05 | | 0,12 | | 0,103 | 0,109 | 0,106 | 158,1 | 167,1 | 162,6 |
| Si | | 0,5 | 0,8 | 0,65 | 0,537 | 0,541 | 0,539 | 826,3 | 832,8 | 829,6 |
| Mn | 0,12 | 1,3 | 1,7 | 1,5 | 1,37 | 1,39 | 1,38 | 2107,5 | 2144,5 | 2126 |
| Al | | | | | 0,0037 | 0,0038 | 0,0038 | 5,76 | 5,8 | 5,78 |
| S | 0,035 | | | | 0,0364 | 0,0365 | 0,0365 | 56,1 | 56,2 | 56,1 |
| P | 0,015 | | | | 0,0285 | 0,0285 | 0,0285 | 43,9 | 43,9 | 43,9 |
| Mg | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0794 | 0,08 | 0,0797 |
| Ca | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| O | | | | | 0,0125 | 0,0125 | 0,0125 | 19,2 | 19,2 | 19,2 |

Шлак

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий (елем.), % | | | Кінцевий (елем.), кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | 20 | | | | 0,858 | 0,864 | 0,861 | 16,6 | 16,7 | 16,6 |
| C | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Si | 20 | | | | 18 | 18 | 18 | 347,9 | 348,1 | 348 |
| Mn | 10 | | | | 6,09 | 6,14 | 6,11 | 117,5 | 118,7 | 118,1 |
| Al | 1,5 | | | | 0,674 | 0,676 | 0,675 | 13 | 13,1 | 13 |
| S | 0,3 | | | | 0,181 | 0,183 | 0,182 | 3,49 | 3,53 | 3,51 |
| P | 0,2 | | | | 0,0037 | 0,0037 | 0,0037 | 0,0707 | 0,0717 | 0,0712 |
| Mg | 3 | | | | 2,18 | 2,18 | 2,18 | 42,2 | 42,2 | 42,2 |
| Ca | 45 | | | | 33,9 | 33,9 | 33,9 | 654,9 | 654,9 | 654,9 |
| O | | | | | 38 | 38,1 | 38,1 | 735,1 | 735,1 | 735,1 |

Газ

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 0,021 | 0,0215 | 0,0213 | 0 | 0 | 0 |
| C | | | | | 42,5 | 42,5 | 42,5 | 0,0083 | 0,0085 | 0,0084 |
| Si | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | | | | | 0,239 | 0,241 | 0,24 | 0 | 0 | 0 |
| Al | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | | | | | 0,0527 | 0,0537 | 0,0532 | 0 | 0 | 0 |
| Ca | | | | | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0 | 0 | 0 |
| O | | | | | 57,2 | 57,2 | 57,2 | 0,0112 | 0,0115 | 0,0113 |

Таблиця 2.3.2 – Хімічний склад металу, шлаку та газу сталі 12ГС

Метал

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|-------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 98,3 | 98,3 | 98,3 | 150641 | 150730 | 150685 |
| C | 0,06 | 0,09 | 0,15 | 0,12 | 0,138 | 0,149 | 0,144 | 212,1 | 228,3 | 220,2 |
| Si | | 0,5 | 0,8 | 0,65 | 0,574 | 0,584 | 0,579 | 880,5 | 895,1 | 887,8 |
| Mn | 0,05 | 0,8 | 1,2 | 1 | 0,883 | 0,923 | 0,903 | 1353 | 1414,6 | 1383,8 |
| Al | | | | | 0,0112 | 0,0115 | 0,0114 | 17,2 | 17,7 | 17,4 |
| S | 0,035 | | 0,04 | | 0,0364 | 0,0364 | 0,0364 | 55,8 | 55,8 | 55,8 |
| P | 0,015 | | 0,035 | | 0,0237 | 0,0237 | 0,0237 | 36,3 | 36,3 | 36,3 |
| Mg | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0871 | 0,0884 | 0,0878 |
| Ca | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| O | | | | | 0,0122 | 0,0122 | 0,0122 | 18,7 | 18,7 | 18,7 |

Шлак

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий (елем.), % | | | Кінцевий (елем.), кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | 20 | | | | 0,798 | 0,809 | 0,803 | 15 | 15,2 | 15,1 |
| C | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Si | 20 | | | | 17,7 | 17,8 | 17,8 | 334 | 334,6 | 334,3 |
| Mn | 10 | | | | 3,65 | 3,75 | 3,7 | 68,7 | 70,6 | 69,7 |
| Al | 1,5 | | | | 1,91 | 1,93 | 1,92 | 36 | 36,3 | 36,2 |
| S | 0,3 | | | | 0,189 | 0,193 | 0,191 | 3,56 | 3,63 | 3,6 |
| P | 0,2 | | | | 0,0027 | 0,0028 | 0,0028 | 0,0512 | 0,0528 | 0,052 |
| Mg | 3 | | | | 2,26 | 2,26 | 2,26 | 42,6 | 42,6 | 42,6 |
| Ca | 45 | | | | 34,8 | 34,8 | 34,8 | 654,9 | 654,9 | 654,9 |
| O | | | | | 38,5 | 38,6 | 38,6 | 725,7 | 725,7 | 725,7 |

Газ

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 0,0184 | 0,019 | 0,0187 | 0 | 0 | 0 |
| C | | | | | 42,6 | 42,6 | 42,6 | 0,0094 | 0,0097 | 0,0096 |
| Si | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | | | | | 0,137 | 0,138 | 0,137 | 0 | 0 | 0 |
| Al | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | | | | | 0,0513 | 0,052 | 0,0517 | 0 | 0 | 0 |
| Ca | | | | | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0 | 0 | 0 |
| O | | | | | 57,2 | 57,2 | 57,2 | 0,0127 | 0,0131 | 0,0129 |

Таблиця 2.3.3 – Хімічний склад металу, шлаку та газу сталі 30ГС

Метал

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|-------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 98,3 | 98,3 | 98,3 | 150641 | 150730 | 150685 |
| C | 0,06 | 0,09 | 0,15 | 0,12 | 0,138 | 0,149 | 0,144 | 212,1 | 228,3 | 220,2 |
| Si | | 0,5 | 0,8 | 0,65 | 0,574 | 0,584 | 0,579 | 880,5 | 895,1 | 887,8 |
| Mn | 0,05 | 0,8 | 1,2 | 1 | 0,883 | 0,923 | 0,903 | 1353 | 1414,6 | 1383,8 |
| Al | | | | | 0,0112 | 0,0115 | 0,0114 | 17,2 | 17,7 | 17,4 |
| S | 0,035 | | 0,04 | | 0,0364 | 0,0364 | 0,0364 | 55,8 | 55,8 | 55,8 |
| P | 0,015 | | 0,035 | | 0,0237 | 0,0237 | 0,0237 | 36,3 | 36,3 | 36,3 |
| Mg | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0871 | 0,0884 | 0,0878 |
| Ca | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| O | | | | | 0,0122 | 0,0122 | 0,0122 | 18,7 | 18,7 | 18,7 |

Шлак

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий (елем.), % | | | Кінцевий (елем.), кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | 20 | | | | 0,798 | 0,809 | 0,803 | 15 | 15,2 | 15,1 |
| C | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Si | 20 | | | | 17,7 | 17,8 | 17,8 | 334 | 334,6 | 334,3 |
| Mn | 10 | | | | 3,65 | 3,75 | 3,7 | 68,7 | 70,6 | 69,7 |
| Al | 1,5 | | | | 1,91 | 1,93 | 1,92 | 36 | 36,3 | 36,2 |
| S | 0,3 | | | | 0,189 | 0,193 | 0,191 | 3,56 | 3,63 | 3,6 |
| P | 0,2 | | | | 0,0027 | 0,0028 | 0,0028 | 0,0512 | 0,0528 | 0,052 |
| Mg | 3 | | | | 2,26 | 2,26 | 2,26 | 42,6 | 42,6 | 42,6 |
| Ca | 45 | | | | 34,8 | 34,8 | 34,8 | 654,9 | 654,9 | 654,9 |
| O | | | | | 38,5 | 38,6 | 38,6 | 725,7 | 725,7 | 725,7 |

Газ

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 0,018 | 0,019 | 0,0187 | 0 | 0 | 0 |
| C | | | | | 42,6 | 42,6 | 42,6 | 0,0094 | 0,0097 | 0,0096 |
| Si | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | | | | | 0,137 | 0,138 | 0,137 | 0 | 0 | 0 |
| Al | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | | | | | 0,051 | 0,052 | 0,0517 | 0 | 0 | 0 |
| Ca | | | | | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0 | 0 | 0 |
| O | | | | | 57,2 | 57,2 | 57,2 | 0,0127 | 0,0131 | 0,0129 |

Таблиця 2.3.4 – Хімічний склад металу, шлаку та газу сталі 35ХГСА

Метал

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|-------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 97,1 | 97,3 | 97,2 | 150791 | 150877 | 150834 |
| C | 0,25 | 0,32 | 0,39 | 0,355 | 0,761 | 0,885 | 0,823 | 1180,2 | 1374,5 | 1277,3 |
| Si | | 1,1 | 1,4 | 1,25 | 0,97 | 0,971 | 0,971 | 1504,8 | 1507,3 | 1506 |
| Mn | 0,12 | 0,8 | 1,1 | 0,95 | 0,928 | 0,968 | 0,948 | 1439,3 | 1503,4 | 1471,4 |
| Al | | | | | 0,0067 | 0,007 | 0,0069 | 10,4 | 11 | 10,7 |
| S | 0,01 | | 0,025 | | 0,014 | 0,024 | 0,0192 | 21,6 | 37,9 | 29,8 |
| P | 0,015 | | 0,025 | | 0,0238 | 0,024 | 0,0238 | 36,9 | 37,1 | 37 |
| Mg | | | | | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,119 | 0,133 | 0,126 |
| Ca | | | | | 0 | 0 | 0 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| O | | | | | 0,006 | 0,0064 | 0,0062 | 9,38 | 9,92 | 9,65 |

Шлак

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий (елем.), % | | | Кінцевий (елем.), кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | 20 | | | | 0,222 | 0,255 | 0,238 | 5,15 | 5,86 | 5,5 |
| C | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Si | 20 | | | | 15,4 | 15,6 | 15,5 | 354,3 | 361,2 | 357,7 |
| Mn | 10 | | | | 1,21 | 1,22 | 1,21 | 28 | 28,1 | 28 |
| Al | 1,5 | | | | 0,687 | 0,705 | 0,696 | 15,8 | 16,3 | 16,1 |
| S | 0,3 | | | | 0,152 | 0,275 | 0,214 | 3,5 | 6,38 | 4,94 |
| P | 0,2 | | | | 0,0003 | 0,0004 | 0,0003 | 0,0074 | 0,0087 | 0,0081 |
| Mg | 3 | | | | 2,6 | 2,61 | 2,61 | 60,1 | 60,2 | 60,1 |
| Ca | 45 | | | | 42,2 | 42,5 | 42,3 | 977 | 977 | 977 |
| O | | | | | 37,2 | 37,2 | 37,2 | 855,5 | 862,2 | 858,9 |

Газ

| Ел-ти | Поч., % | Заданий, % | | | Кінцевий, % | | | Кінцевий, кг | | |
|-------|---------|------------|------|--------|-------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. | Мін | Макс | Серед. |
| Fe | | | | | 0,0048 | 0,006 | 0,0054 | 0,0134 | 0,0173 | 0,0154 |
| C | | | | | 42,8 | 42,8 | 42,8 | 118,6 | 123,1 | 120,8 |
| Si | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | | | | | 0,0546 | 0,0606 | 0,0576 | 0,151 | 0,174 | 0,163 |
| Al | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | | | | | 0,0408 | 0,0484 | 0,0446 | 0,113 | 0,139 | 0,126 |
| Ca | | | | | 0,0001 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0003 | 0,0004 | 0,0004 |
| O | | | | | 57,1 | 57,1 | 57,1 | 158,3 | 164,4 | 161,4 |

ВИСНОВКИ

1. При підвищенні питомого заряду шлаку вміст алюмінію в металі зростає залежно від маси шлаку до 0,007-0,017% для сталі 09Г2С і 35ХГСА, до 0,03-0,04% для сталі 12ГС і до 0,052-0,062% для сталі 30ГС. При збільшенні маси шлаку вміст алюмінію зростає. Такий рівень алюмінію в сталі достатній для її мікролегування. При подальшому підвищенні питомого заряду шлаку понад 0,8 F/моль вміст алюмінію не змінюється.

2. При підвищеному питомому заряді та масі шлаку рівноважний вміст сірки і кисню асимптотично наближається до нуля. Але фактичний їх вміст залежить від кінетичних та технологічних особливостей процесу. В експериментальних дослідженнях процесу ВЕЛР найнижчий рівень сірки складав 0,003-0,005%, а кисню 0,001-0,002%.

3. Фосфор відновлюється у межах, допустимих для якісних конструкційних сталей.

4. При підвищеному питомому заряді і масі шлаку вміст кремнію у сталях значно підвищується: до 0,68-0,82% у сталях 09Г2С, 12ГС і 30ГС та до 1,1-1,2% у 35ХГСА.

5. При підвищеному питомому заряді і масі шлаку вміст марганцю у сталях теж зростає, але менш активно: до 1,4-1,5% у сталі 09Г2С, до 0,9-1,0% у ст. 12ГС, до 1,05-1,15% у ст. 30ГС та до 0,87-0,95% у ст. 35ХГСА.

6. Для отримання гарантованого вмісту марганцю та кремнію в досліджених сталях завдяки відновленню цих елементів зі шлаку оптимальна кількість використуваних феросплавів зменшується, що дозволяє отримати значний економічний ефект, (2...5 грн на 1 т сталі).

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. *Металлургия*. 1989. 503С.
3. Трусов Б. Астра-4.рс, версия 1.07. М. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1991.
4. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы . *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. №8. С. 135-139.
5. Пономаренко А. Г., Мавренова Э. П. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему. Оценка энергетических параметров. *ЖФХ*, 1974, Т.48, № 7, С. 1672-1674.
6. Харченко А. В., Пономаренко А. Г. Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов. *Сб. трудов ДонНТУ*. 2003. С. 17-24.
7. Скрыбин В. Г., Скрыбин Д. В. Модель расчета средней температуры металла в сверхмощной ДСП и ее применение в АСУТП. *Материалы 2-й междунаучно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии»* М.: МИСиС. С. 466-468.
8. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. №10. С. 131-137.
9. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. Учебник для ВУЗов. 2005.768 с.

10. Егоров А.В. "Электроплавильные печи черной металлургии" Учебник для вузов, М; Металлургия, 1985, 280 с.

11. Ойкс Г.Н. Производство стали. М.: *Металлургия*. 1974. 440 с.

12. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. Учебник для ВУЗов. М.: *Мир. Издательство АСТ*. 2003. 528 с.

13. Воденніков С. А., Галицький Ю. П., Воденнікова О.С. Теорія та технологія електросталеплавильного виробництва. Навчальний посібник. Запоріжжя. Видавництво Запорізької державної інженерної академії. 2010. 246 с.

14. Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Рысс М. А., Строганов А. И., Ярцев М. А.. Электрометаллургия стали и ферросплавов. М.: Металлургия. 1974.185 с.

15 Дакурорт У. Е., Хойл Дж.. Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1973. 192 с.

16. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему. ЖФХ. – 1974. – Т.48. - № 7. – С. 668-674; № 8. – С. 950-958.

17. Харченко А. В., Пономаренко А.Г. Экспериментальные основы термодинамической модели коллективизированных электронов. Сб. научных работ ДонНТУ. Серия: Металлургия Вып. 66. 2003. С. 17-24.

18. Храпко С.А. Термодинамика и кинетика взаимодействия фаз при внепечной обработке . С.А. Храпко. Металлургическая и горнодобывающая промышленность. – 2002. - № 10. – С. 121-123.

19. Харченко А.В. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы . А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун *Металлургическая и горнодобывающая промышленность*. – 2004. - № 8. – С. 135-139.
20. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Храпко С. А., Иноземцева Е. Н. Разработка информационно–технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени // *Известия ВУЗов, Черная металлургия*. - 1991. - № 12. - С. 89-91.
21. Храпко С. А., Иноземцева Е. Н., Харченко А. В. Термодинамическая модель системы металл-шлак-газ и интегрированная система "Оракул": использование для прогнозных расчётов и управления в составе АСУТП и разработки сталеплавильных процессов. // В кн. "Тезисы докладов конф. "Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии". - Новокузнецк. - 1991. - С. 222-223
22. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему // *ЖФХ*, 1974, Т.48, № 7, С. 1668-1674; № 8, С. 1950-1958.
23. Харченко А. В., Пономаренко А. Г. Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов // *Сб. трудов ДонНТУ*. - 2003. - С. 17-24.
24. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2004. - №8. - С. 135-139.
25. Харченко А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса // *Металл и литье Украины*. - 2005. - №6. - С. 13-17. 12

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

27. Харченко А. В. Оптимизация внепечной обработки и легирования стали на основе решения обратной задачи термодинамического анализа // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2004. - №8. - С. 115-120.

28. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2002. - №10. - С. 131-137. 27. Синяков Р. В., Гуляев М. П., Мартынов Р. Н., Харченко А. В. и др. Промышленное освоение системы управления внепечной обработкой стали (печь-ковш – вакууматор) ГИББС® на БМЗ // *Металл и литье Украины*. - 2005. - №3-4. - С. 98-100.

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

30. Харченко, А. В. Программа «EXCALIBUR» – возможности и перспективы использования в металлургическом производстве / А. В. Харченко, Р. В. Синяков // *Сб. научных трудов ДонНТУ*. Серия:Металлургия.Вып 102. – 2005. – С. 82-91.