

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні

(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) рівень _____
(другий (магістерський) рівень)

на тему _____ Дослідження електрохімічного легування та рафінування сталі у процесі ВЕЛР _____

Виконав: студент __ 2 __ курсу, групи 8.1362-мчм

Забалуєв М.Р. _____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

136 Металургія _____
(шифр і назва)

спеціалізація

_____ (шифр і назва)
освітньо-професійна програма
Металургія чорних металів
(шифр і назва)

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

Рецензент Белоконь Ю.О. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2023 року

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

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136 металургія
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма металургія чорних металів
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ
Ю.О. Бєлоконь

“ 01 ” 05 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Забалуєв М.Р.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Дослідження електрохімічного легування та рафінування сталі у процесі ВЕЛР

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “01” 05 2023 року № 632-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) 01.12.2023

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) Визначення закономірностей та оптимальних режимів електрохімічного легування сталей 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2 за технологією ВЕЛР

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Креслення, презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
<i>Літературний огляд</i>	<i>Харченко О.В., доцент</i>	
<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>	<i>Харченко О.В., доцент</i>	
<i>Індивідуальне завдання</i>	<i>Харченко О.В., доцент</i>	
<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>Харченко О.В., доцент</i>	
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Белоконь Ю.О. завідувач кафедри</i>	

7. Дата видачі завдання 07.05.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>30.11.2023</i>	
2	<i>Реферат</i>	<i>30.11.2023</i>	
3	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.06.2023</i>	
4	<i>Розрахунково-дослідницька частина</i>	<i>19.11.2023</i>	
4	<i>Індивідуальне завдання</i>	<i>26.11.2023</i>	
5	<i>Охорона праці та техногенна безпека</i>	<i>30.11.2023</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>30.11.2023</i>	

Студент _____ Забалуєв М.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Забалуєв М.Р. Дослідження електрохімічного легування і 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. О. В. Харченко. Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, кафедра Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, 2023.

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 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3. 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.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра містить 127 сторінок, 7 таблиць, 57 рисунків, 32 джерел.

НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ, РОЗКИСЛЕННЯ, ЛЕГУВАННЯ, ЗАРЯД ШЛАКУ, РАФІНУВАННЯ, ТЕРМОДИНАМІКА.

ABSTRACT

Zabaluyev M.R. Research of electrothermal alloying and refining of steel in the SEAR process.

Diploma work contains research results on the new LF process based on the equilibrium displacement in the 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 results of experimental studies. Influence of the specific charge of the slag on the contents of impurities and alloying elements in SEAR process for low alloyed steel grades 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3, and 9MnSi6-3 have been studied. Main parameters for technical operations of deoxidation, alloying and desulfurization of liquid steel were identified. SEAR technology allows to use metallurgical slags instead of scarce and expensive materials, that contributes to the production of competitive steel. Unlike other out-of-furnace alloying and refining methods, SEAR process makes it possible to recycle converter and blast furnace slags, achieve high economic efficiency, significant decrease of non-metallic inclusions and decrease air pollution with smoke exhaust.

Explanatory note to the master's thesis contains 127 pages, 7 tables, 57 figures, and 32 sources.

LOW ALLOY STEEL, DEOXIDATION, ALLOYING, SLAG CHARGE, REFINING, THERMODYNAMICS.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	10
1.1 Загальна характеристика легування та рафінування сталі в установках піч-ковш	10
1.2 Теоретичні передумови розробки технології ВЕЛР	16
1.3 Крива електричної нейтральності	17
1.4 Теоретичні основи ВЕЛР	19
1.5 Вибір питомої величини заряду шлаку	20
2 АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР.....	20
2.1 Схема промислової установки ВЕЛР.....	20
2.2 Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях ..	21
2.3 Основні закономірності впливу заряду шлаку	23
2.4 Кінетика відновлення елементів в процесі ВЕЛР	28
2.5 Висновки.....	31
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР.....	34
3.1 Програмний комплекс «Excalibur» в дослідженні електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР	34
3.2 Обчислювальний експеримент	40
3.2.1 Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість.....	40
3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі.....	53
3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку.....	77
3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку	97
3.2.5 Вплив питомого заряду шлаку на масу газової фази.....	100
3.2.6 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газовій фазі	102
3.2.7 Хімічний склад сталей	109
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	114

4.1	Забезпечення техногенної безпеки на підприємствах	114
4.2	Мікроклімат	117
4.3	Склад повітря робочої зони	117
4.4	Виробниче освітлення	118
4.5	Виробничий шум	118
4.6	Виробничі вібрації	119
4.7	Виробничі випромінювання	120
4.8	Технічні рішення системи запобігання пожежі	120
4.9	Технічні рішення системи протипожежного захисту.	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		123
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		124

ВСТУП

Мета і задачі роботи. Дослідити особливості електрохімічного легування та рафінування сталі у процесі ВЕЛР 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3.

Об'єкт дослідження: 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 обчислювальний експеримент.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає у дослідженні особливостей легування та рафінування сталей 14MnCrSi4-3-2, 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та розширення результатів цього дослідження.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень особливостей електрохімічного легування та рафінування сталей 14MnCrSi4-3-2, 12MnSi4-3, 30MnSi4-3 та 9MnSi6-3 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 методику 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 (2023 р., м. Запоріжжя).

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 2 розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг роботи становить 127 сторінку, 7 таблиць, 57 рисунків, 32 джерел посилання.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Загальна характеристика легування та рафінування сталі в установках піч-ковш

Нові технології обробки металу як в сталеплавильних печах (конвертерах), так і головним чином поза ними, привели до помітного збільшення масштабів виробництва сталі і сплавів, однорідних по властивостях і вмісних нікчемно мале-кількість газів, неметалічних включень і інших небажаних домішок. Пов'язане з цим ускладнення технології виправдовується результатами, що досягаються відносно якості і надійності металопродукції.

Методи внепічної обробки сталі можуть бути умовно розділені на прості (обробка металу одним способом) і комбіновані (обробка металу декількома способами одночасно). До розглянутих вище простих методів відносяться: 1) обробка металу вакуумом; 2) продування інертним газом; 3) обробка металу синтетичним шлаком, рідкими і твердими шлаковими сумішами; 4) введення реагентів в глибочину металу.

Основними недоліками перерахованих простих способів обробки металу є: а) необхідність перегріву рідкого металу в плавильному агрегаті для компенсації падіння температури металу при обробці в ковші; б) обмеженість впливу на метал (тільки десульфурація, тільки дегазація і т. п.).

Кращі результати впливу на якість металу досягається при використанні комбінованих або комплексних способів, коли в одному або декількох послідовно розташованих агрегатах здійснюється ряд операцій. Для їх проведення часто необхідно змінювати конструкцію ковша і використати більш складне обладнання.

У світовій практиці отримує все велике поширення процес названий процесом ківш-піч.

Агрегат ковш-піч або установка ковш-піч, - це ланка в єдиній технологічній схемі з конвертерами, мартенами та дуговими печами для доведення металу в ківші до заданої температури та хімічного складу після його випуску з плавильного агрегату.

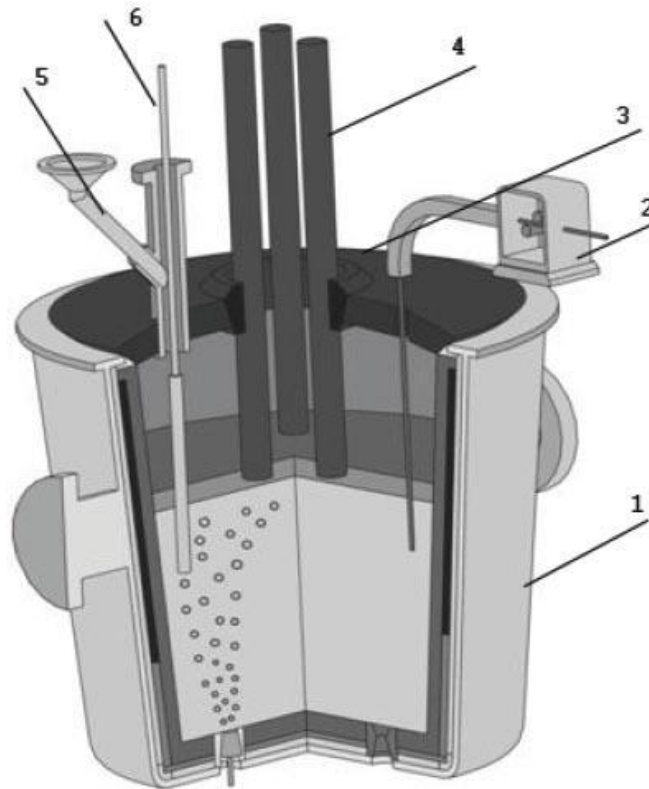
Процес рафінування в сталерозливному ковші з використанням підігріву металу електричною дугою отримало широке поширення при позапічній обробці сталі розроблений у 1971 році фірмою Daido Steel (Японія). Установка, де реалізується цей процес, отримала назву «Агрегат ковш-піч» (АКП).

Агрегат ківш-піч використовується в комплексі з плавильними агрегатами, в яких напівплав виплавляється. Як такі агрегати використовуються мартенівські печі, дугові та кисневі конвертери, в яких проводяться розплавлення феросплавів та металобрухту з малим чадом та проводиться окисний період. По можливості виключаючи попадання в нього пічного шлаку метал зливають у стальків. До та під час випуску металу в ківш віддаються розкислювачі, шлакоутворювальні та легуючі матеріали.

Агрегат ківш-піч забезпечений трайб-апаратами для введення матеріалів у вигляді дроту і пристроями для введення сипких матеріалів (бункерна естакада з пристроями, що весодозують). Нагрів металу на АКП здійснюється також, як і в дугових печах (ДСП), але потужність трансформаторів установок ковш-піч значно менше, ніж використовується на дугових печах і становить 100-160 кВА/т. Це пояснюється відсутністю такої енерговитратної стадії, як розплавлення брухту, тепло витрачається тільки на розплавлення матеріалів і підтримання температури металу. Крім цього, потужність підведення тепла обмежується підвищеним зносом кладки ковша вище за рівень металу через малий (порівняно з дуговою піччю) діаметр ковша. Питома витрата електроенергії на АКП становить приблизно 10% від суми всіх енерговитрат на виплавку сталі.

Під час обробки через днище ковша здійснюється продування металу інертним газом (азот або аргон) для перемішування металу з метою

усереднення його за температурою та хімічним складом, крім цього виведенню неметалевих включень з металу сприяє продування металу сприяє. Вдування газу здійснюється через пористі пробки, від однієї до трьох штук на великотоннажному ковші. Також можливе електромагнітне перемішування металу .



1- сталерозливний ківш; 2-Трайб-апарат; 3-Звід агрегату ківш-піч; 4-графітовані електроди; 5 - Вирва подачі сипучих, 6 - Аварійна фурма.

Рисунок 1.1 – Загальна схема встановлення ківш-піч

Протягом останніх двох десятиліть агрегати ківш-піч безперервно вдосконалювалися як в конструкційному плані, так і в технологічному плані. Це дозволило досягти дуже високих показників, як у якості сталі, так і в частині енерго та ресурсозбереження. Наприклад, середня витрата електродів у процесі обробки на установці ківш-піч складає близько 10 г/кВт годину, а витрати електричної енергії – 0,3-0,6 кВт·год/т град. Більше того, на практиці переконливо доведено високу конкурентоспроможність агрегатів ковш-піч практично для всього діапазону місткості сталерозливних ковшів: від 12-15 т

до 350-360 т. При цьому в нормальному технологічному режимі забезпечується нагрівання сталі в ковші зі швидкістю 4-5°C за хвилину.

Сучасний агрегат ковш-піч має цілком усталену технологічну архітектуру та конструкцію основних функціональних елементів, до складу яких входять: система для нагрівання металу електричними дугами, система подачі феросплавів та матеріалів для рафінування сталі в ковші, засоби для перемішування металу інертним газом, пристрій для подачі порошкової дроту, кришка, що встановлюється на ківш перед обробкою тощо.

Після випуску металу з плавильного агрегату всі подальші кроки доведення сталі за хімічним складом і температурою виконуються виключно в ковші. Така схема, як показує практика, робить процес виплавки та розливання сталі більш економічним, а також забезпечує найбільш повне поєднання процесу виплавки та розливання сталі. Слід зазначити, що завдання глибокого рафінування та прецизійного розкислення є дуже актуальним для виробників великих зливків. В цілому, в ході обробки сталі в ковші можуть виконуватися такі операції: гомогенізація металу за температурою та хімічним складом, коригування хімічного складу сталі шляхом присадки відповідних лігатур, видалення шкідливих домішок (сірка, водень, азот, а іноді вуглець та ін.), доведення температури металу до регламентованого технологією значення, рафінування сталі по неметалевим включенням, одержання сталі з постійними властивостями від плавки до плавки, керування складом шлаку і т.д. [1].

Розглянемо деякі перераховані вище процеси більш детально.

Легування в металургії — введення в металічні сплави легувальних елементів, які сприяють отриманню сплавів заданого хімічного складу та структури з потрібними фізичними, хімічними та механічними властивостями [2]. Фактично легування — це створення сплавів.

Легування дозволяє створювати різноманітні металеві матеріали (сплави), які за своїми властивостями суттєво відрізняються від чистих металів за характеристиками міцності, зносостійкості, жароміцності,

корозійної стійкості тощо. Легуванню піддають звичайно розплавлені сплави, рідше – тверді.

Характер взаємодії атомів легувальних елементів і основного металу, співвідношення їх атомних розмірів і електрохімічних властивостей змінюють умови рівноважності фаз, утворення твердих розчинів і хімічних сполук, температури твердофазових перетворень, зумовлюють формування певного фазово-структурного стану та властивостей сплавів (легованих сталей і чавунів, сплавів кольорових металів).

Розрізняють легування об'ємне та поверхневе. Є також комплексне легування (одночасно кількома легувальними елементами) і легування іонне, що полягає у введенні атомів усередину твердого сплаву під час бомбардування його поверхні іонами (внаслідок цього підвищується електропровідність напівпровідників).

Для легування сталей використовують переважно хром, нікель, манган, кремній, вольфрам, молібден, титан, ванадій, кобальт, ніобій, мідь, бор. Низьколеговані сталі містять у своєму складі до 2,5 % легувальних елементів у сумі, середньолеговані – 2,5...10 %, високолеговані – понад 10 %. У легованих чавунах використовують хром, нікель, алюміній, ванадій, титан; у сплавах міді — олово, цинк, свинець, алюміній, марганець, залізо, берилій; у сплавах алюмінію – кремній, мідь, магній, цинк, марганець, титан, цирконій; у сплавах магнію - алюміній, цинк, цирконій; у сплавах свинцю - олово, цинк. Легувальні елементи вводять у різних кількостях і поєднаннях в основному у вигляді спеціальних сплавів (феросплавів) [3].

Рафінування металів — очищення первинних (чорнових) металів від домішок. Чорнові метали, що отримуються з сировини, містять 96—99% основного металу, решта припадає на домішки. Такі метали не можуть використовуватися промисловістю через низькі фізико-хімічні та механічні властивості. Домішки, що містяться в чорнових металах, можуть мати власну цінність. Так, вартість золота і срібла, що витягують із міді, повністю окупає всі витрати на рафінування. Розрізняють 3 основні методи рафінування:

пірометалургійний, електролітичний та хімічний. В основі всіх методів лежить відмінність властивостей елементів, що розділяються: температур плавлення, щільності, електронегативності тощо. Для отримання чистих металів нерідко використовують кілька способів рафінування.

Рафінування сталі проводять у сталеварних агрегатах або поза ними. Очищення в агрегатах подовжує час плавки, що зменшує їх продуктивність і збільшує собівартість сталі.

Позаагрегатне рафінування потребує додаткового спеціального обладнання (ковші, печі та ін.). Його здійснюють у розплаві у ковшах одразу після випуску з агрегату при виконанні операцій: вакуумування; продування інертними газами; перемішування з синтетичними флюсами або переплавом у печах при виконанні електрошлакового, вакуумно-дугового, вакуумно-індукційного і плазменного способів.

Крім сталі, рафінують сплави кольорових металів поліпшення їх властивостей. При виробництві виливків необхідно очистити метали і сплави від небажаних газів, що містяться в них, шкідливих елементів, неметалічних включень. Очищають розплави матеріалів шлаками, що вдуваються порошками, продуванням аргоном, застосовують електрошлаковий і електроннопроменевий переплав. Найбільше застосування набуло рафінування металу шлаком.

Питання можливості використання установок піч-ківш для вторинного легування і рафінування сталі неодноразово виникало під час аналізу розподілу сірки між металом і шлаком у процесі електрошлакового переплаву постійним струмом. Так, у роботі [4] було показано, що коефіцієнт розподілу сірки $(S)/[S]$ змінювався більш ніж у два рази при зміні полярності прикладеного до електродів напруги. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей багатоконпонентних систем «метал-шлак-газ» не дозволяло ефективно управляти цим процесом і залишало лише емпіричні можливості для розробки окремих технологічних приладів,

що не виходять за рамки даного металургійного агрегату, даної технології виплавки, заданої марки сталі та заданого складу шлаку.

1.2 Теоретичні передумови розробки технології ВЕЛР

У роботі А. Г. Пономаренка [5] вперше було введено електрохімічну поправку, або електронний вклад у логарифм активності шлаку у вигляді доданку μv_i , (v_i - валентність елемента i у шлаку). У цій та низці наступних робіт обговорювався фізичний зміст величини μ . Пропонувалося, наприклад, називати її «рівнем Фермі електронів у шлаку» [5] та «окислювально-відновним потенціалом» системи «метал-шлак» [6]. У роботі [7] стверджувалося, що i є нічим іншим, як невизначеним множником Лагранжа при розв'язанні задачі мінімізації енергії Гіббса системи «метал-шлак» за додаткової умови електронейтральності шлакової фази. У роботі [8] було показано, що електронейтральність є необхідною умовою дотримання рівняння Гіббса-Дюгема при додаванні «електронного внеску» у вираз для активності будь-якої фази. Так чи інакше, електрохімічна поправка μv_i дозволила суттєво покращити передбачувальні можливості фізико-хімічних моделей системи «метал-шлак» та наблизити їх до рівня вимог, що висуваються до інтелектуального ядра АСУТП промислових металургійних агрегатів.

Системи управління, побудовані на викладених засадах, впроваджувалися на ряді металургійних підприємств: Молдавському металургійному заводі [8], «Запоріжсталі» [9] та інших. Разом з тим, відсутність теплоенергетичної складової у використовуваних фізико-хімічних моделях не дозволяло з достатньою точністю моделювати та прогнозувати сталеплавильні процеси. Впровадження в модель системи «метал-шлак-газ» ентальпійного теплового балансу з невід'ємним розрахунком кінцевої температури та новою термодинамічної моделі конденсованих розчинів [8] практично завершило теоретичну розробку «каркасу» фізико-хімічної моделі, придатної не тільки для побудови

повністю автоматизованих систем управління існуючими металургійними процесами, а й відкрило практичні можливості для розробки теоретичних основ та технології принципово нових процесів, таких як вторинне електротермічне легування та рафінування (ВЕЛР) у процесі обробки металу в печі-ковші.

1.3 Крива електричної нейтральності

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

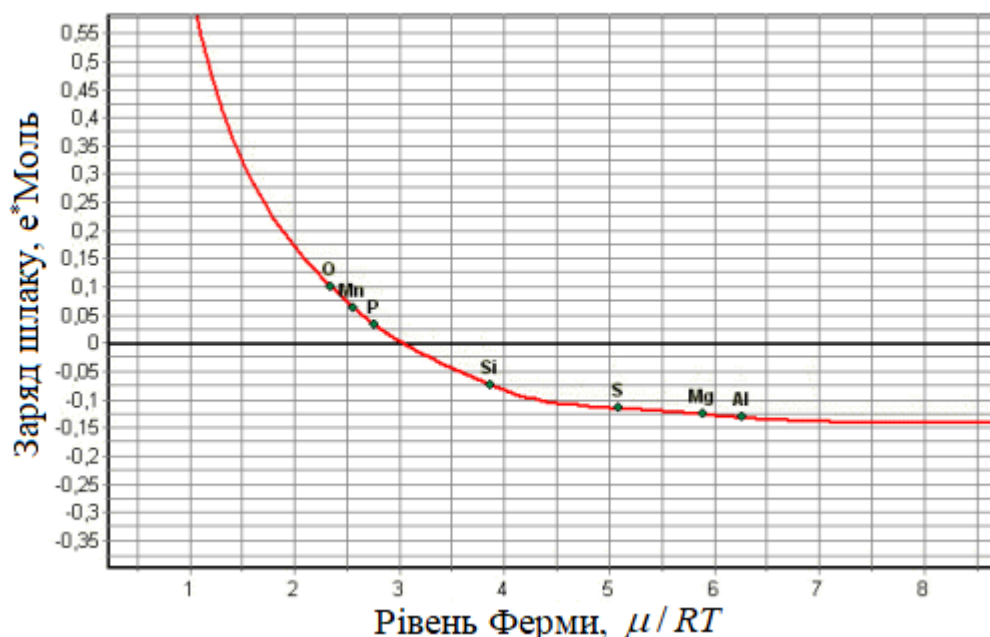


Рисунок 1.2 – Фрагмент кривої електронейтральності

У координатах «Заряд шлаку, $e \cdot \text{Моль}$ – «Рівень Ферми електронів у шлаку, од.» КЕ будується як функція $F_1(\mu)$ з рівнянь, що описує стан системи "метал-шлак-газ"[10].

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

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

Графік на рис. 1.2 свідчить про те, що фосфор, марганець та сірка прагнуть у метал, тоді як кремній, магній та алюміній повинні залишатися у шлаку. При збільшенні ступеня розкислення спочатку відновиться кремній, потім сірка почне поглинатися шлаком, і, нарешті, відновляться магній та алюміній. При збільшенні ступеня окиснення 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 уміння керувати ними за допомогою зовнішнього електричного поля дозволяє організувати принципово новий процес ВЕЛР на практиці.

Ординати елементів на КЕ дозволяють оцінити величину напруги, необхідної для створення відновлювальних або окисних умов за відомою геометричної конфігурації шлакового шару та електропровідності шлаку. Оскільки електричний опір шлаку має кінцеву величину, для проведення процесу ВЕЛР необхідні певні енергетичні витрати, які в результаті теплового ефекту частково компенсують витрати електроенергії, що подається на електроди підігріву.

Попередні розрахунки показують, що для відновлення одного моля кремнію з шлаку методом ВЕЛР потрібно на порядок меншу кількість електроенергії, ніж її знадобилося б для виробництва такої ж кількості кремнію в вигляді феросиліція, доставки феросплаву на завод, введення його в розплав, розплавлення та підігріву до температури розплаву, навіть з урахуванням супроводжуючого процесу екзотермічної реакції. Подібний ефект досягається також при відновленні марганцю та алюмінію.

1.4 Теоретичні основи ВЕЛР

Термодинамічний моделювання системи «метал-шлак-газ» із застосуванням методу хімічних потенціалів Гіббса [12, 13] дозволило розробити теоретичні основи та технологію ВЕЛР. У ряді робіт за результатами теоретичних та експериментальних досліджень було викладено можливості ВЕЛР щодо ефективного легування та рафінування рідкої сталі [14-18]. Було показано, що використання методу ВЕЛР для легування низьколегованої сталі в модернізованих установках піч-ківш дозволяє отримати такі основні переваги:

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

Однією з технологічних особливостей ВЕЛР є суттєве зменшення маси шлаку в процесі позитивного процесу, тобто процесу, в якому електричний заряд шлаку є позитивним. Як свідчать теоретичні розрахунки, цей ефект супроводжується як переходом аніонів в метал, а й утворенням газової фази зі збільшенням заряду шлаку вище деякого порогового рівня. Підвищений заряд шлаку дозволяє не лише знизити вміст сірки, кисню та неметалічних включень у металі до наднизьких величин, але і отримати модифіковану сталь з високим вмістом кальцію та магнію. Як відомо, в абсолютній більшості марок стали зміст цих елементів не регламентується і фактично не перевищує тисячних часток відсотка.

Під час проведення експериментальних досліджень [15] фіксувалося зменшення маси шлаку та інтенсивне газоутворення, проте питання про масу, тиск і склад газової фази залишалося відкритим. Слід зазначити, що газоутворення перешкоджає інтенсифікації позитивного процесу ВЕЛР та сприяє зменшення його ефективності, оскільки з шлаку в газову фазу йдуть і безповоротно губляться цінні легуючі елементи, такі як марганець, кальцій та магній.

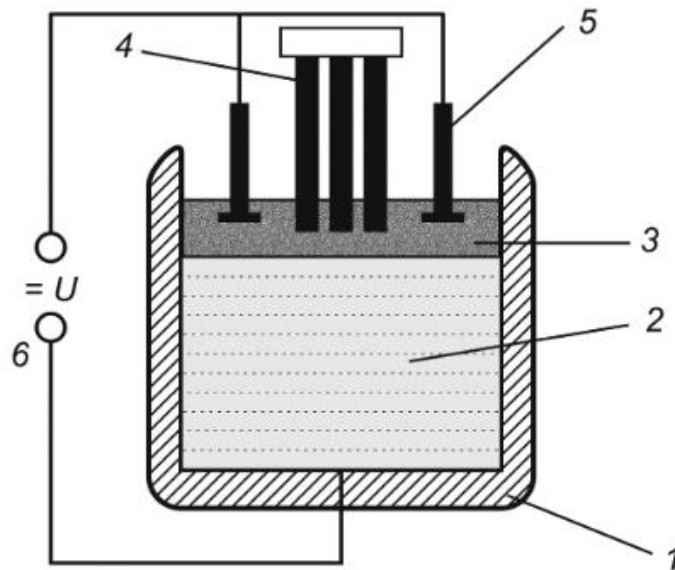
1.5 Вибір питомої величини заряду шлаку

При розгляді впливу заряду шлаку на процес ВЕЛР виникає також питання про вибір відповідної питомої величини універсальної незалежної змінної. Видається доцільним вибрати в як таке відношення заряду шлаку, виражене у Фарадеях, до молей шлаку. Оскільки один Фарадей (F) дорівнює заряду одного моля електронів, то змінна, обрана таким чином, буде показувати кількість елементарних зарядів, що припадають на один атом (іон) шлаку, з відповідним знаком. Така змінна надалі іменуватиметься питомою зарядом шлаку, позначатися як q і мати розмірність F/моль.

2 АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР

2.1 Схема промислової установки ВЕЛР

Схема найпростішої промислової установки ВЕЛР наведена на рис. 2.1 [14, 19]. На рідкий шлак 3 через графітовані електроди спеціальної форми 5 подається постійне напруження від джерела 6. Передбачається, що метал в печі-ковші постійно переміщується шляхом продувки інертним газом.



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

Рисунок 2.1 – Принципова схема промислової установки ВЕЛР

На відміну від традиційного способу введення лужноземельних металів у сталь у вигляді дорогого порошкового дроту за допомогою трайб-апаратів технологія ВЕЛР дозволяє використовувати для цього кальцій та магній, що містяться в металургійних шлаках.

Теоретично за допомогою ВЕЛР можна практично повністю видалити сірку та кисень з металу за рахунок ефективного усунення рівноваги в системі метал-шлак-газ. Однак при насиченні шлаку киснем та сіркою шлакова фаза стає термодинамічно нестабільною, і може початися її випаровування раніше, ніж станеться повне видалення сірки. Питання термодинамічної стійкості неелектронейтральної шлакової фази достатньо складний і вимагає окремого дослідження, в тому числа розгляду функції стабільності ψ , [20].

2.2 Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях

У таблиці 2.1 наведено основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях, у тому числі питомий заряд шлаку, оптимальні параметри шлаку і металу і результат, що досягається.

Таблиця 2.1 – Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях

Технологічна операція	Питомий заряд шлаку, F/моль	Оптимальні параметри шлака та металу	Досягаємий результат
Розкислення	0,4...0,5	$\leq 20\%(FeO)$	$\leq 0,003\%(O)$
Окисне рафінування, обезуглерожування	-4,5 ... -2,0	$\geq 0,1\%(C)$	$\leq 0,03\%(C)$ $\leq 0,005\%(Si)$
Десульфурація	0,6...0,8	$\leq 20\%(FeO)$ $\leq 0,3\%(S)$	$\leq 0,003\%(S)$
Дефосфорація	-2,0...-1,5	$\leq 0,2\%(P_2O_5)$ $\leq 0,1\%(Si)$	$\leq 0,005\%(P)$
Легування Mn, Si, Cr, Al	0,5...0,8	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 10\%(MnO)$ $(SiO_2), (Cr_2O_3)$ $\geq 5\%(Al_2O_3)$	$\Delta[Mn] = 0,15, \dots 0,30\%$ $\Delta[Si] = 0,10, \dots 0,50\%$ $\Delta[Cr] = 0,15, \dots 0,30\%$ $\Delta[Al] = 0,01 \dots 0,10\%$
Легування Ca, Mg	0,8...1,2	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 20\%(CaO)$ $\geq 5\%(MgO)$	$0,035 \dots 0,35\%(Ca)$ $0,020 \dots 0,030\%(Mg)$

Термодинамічний моделювання ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність даного процесу і добре узгоджується з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень. У залежності від полярності електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може застосовуватись як власне для розкислення-легування та десульфурації, так і для окисного рафінування та обезуглерожування рідкої сталі. Встановлено, що у процесі ВЕЛР збільшення як позитивного, і негативного питомого заряду шлаку за абсолютною величиною призводить до утворення газової фази, обсяг виділення якої залежить від зовнішнього тиску. При атмосферному тиску в позитивному процесі значна частина кальцію йде в газову фазу, що не дозволяє отримати його вміст у сталі понад

0,04%. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа при питомому заряді шлаку $q \geq 1$ F/моль збільшує верхній межа вмісту кальцію сталі до 0,35 %. Для легування сталі лужноземельними металами технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дорогої порошкової дроту

2.3 Основні закономірності впливу заряду шлаку

Ставиться завдання визначити основні закономірності впливу заряду шлаку на систему «метал-шлак-газ» у процесі ВЕЛР шляхом термодинамічного моделювання з урахуванням можливого газовиділення; визначити масу, тиск та склад газової фази; розробити технологію зменшення втрат легуючих елементів зі збільшенням позитивного, заряду шлаку; визначити основні параметри ВЕЛР для низьколегованих сталей

Як об'єкт дослідження вибрали розкислену рідку сталь марок 9MnSi6-3, 12MnSi4-3 та 30MnSi4-3 при температурі 1600 °С, покриту шаром рівноважного шлаку. Масу металу приймали рівною 150 т, початкову масу шлаку - 1,5 т. У складі пічного шлаку містилося 20% FeO, 20% SiO₂ 10% MnO, 45% CaO, 3% MgO, 1,5% Al₂O₃, 0,3% S і 0,2% P₂O₅; Такий склад шлаку є типовим для шлаку закінчення конвертерної плавки. Крім того, на додачу до низьколегованих сталей, досліджували вуглецевий напівпродукт складу: 0,05% C, 0,001% Si, 0,12% Mn, 0,035% S, 0,015% P. Такий самий напівпродукт використовували для отримання низьколегованих сталей

Проаналізуємо застосування термодинамічного моделювання системи метал-шлак-газ в процесі ВЕЛР для наступних марок сталі 9MnSi6-3, 12MnSi4-3 та 30MnSi4-3 при температурі 1600 °С.

Як бачимо на рис. 2.2, при зміні величини питомого заряду шлаку 4 для кожної з аналізованих марок сталі існує область спокійного металу з повною відсутністю газовиділення. Ця область розширюється у разі підвищення зовнішнього тиску. Цей факт може розглядатися як очевидний елемент технології зменшення втрат аніонів у газовій фазі за позитивного процесу. При підвищення питомого заряду шлаку понад 1 F/моль криві тиску газової

фази поводяться подібним чином для всіх марок сталі, виходячи на горизонтальну ділянку при 180 кПа. Це означає, що підвищенням зовнішнього тиску до 200 кПа можна досягти повного придушення газовиділення.

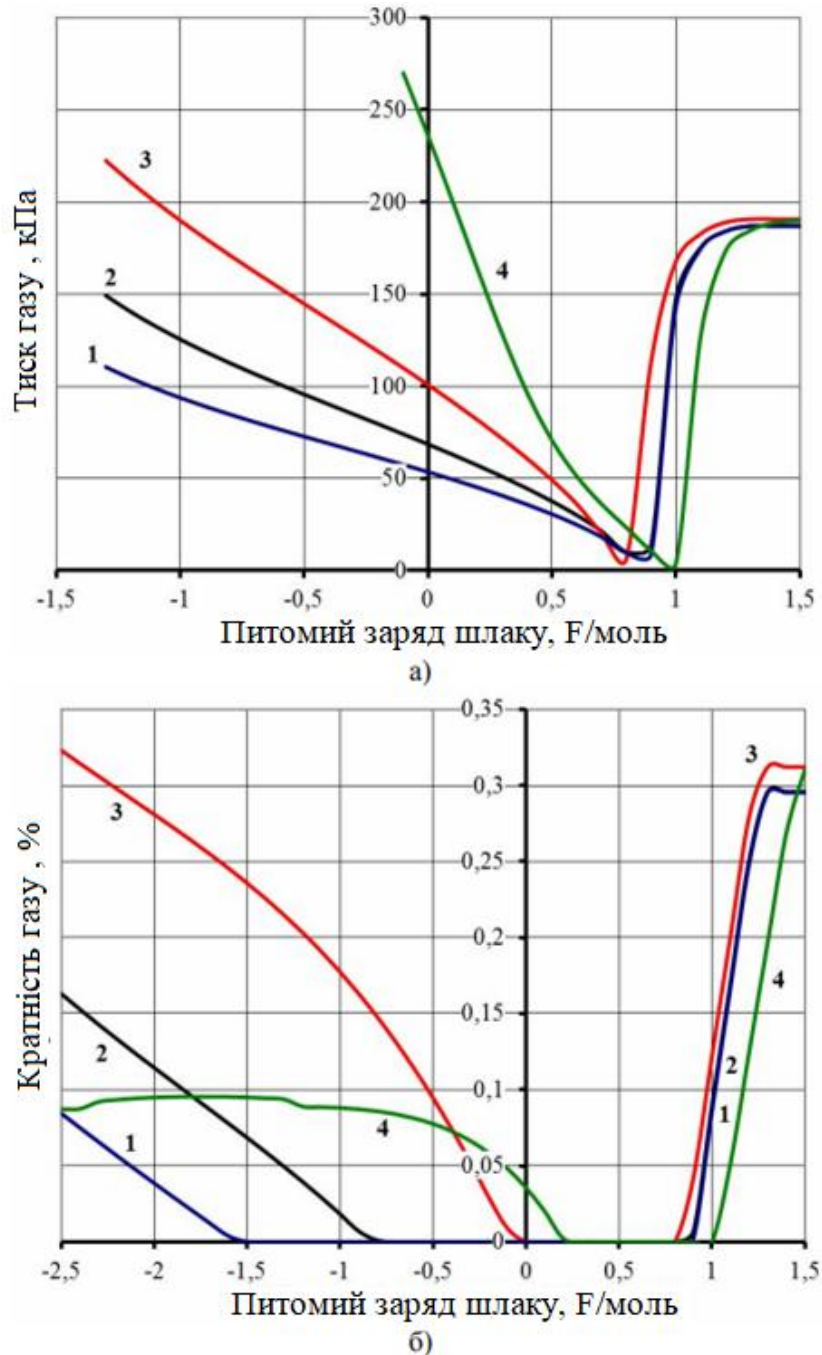


Рисунок 2.2 - Вплив питомого заряду шлаку на тиск (а) та кратність (б) газової фази: 1 - 9MnSi6-3, 2 - 12MnSi4-3, 3 - 30MnSi4-3, 4 - напівпродукт

Усі криві на рис. 2.2 мають характерні мінімуми в інтервалі $q = 0,75$. Е/моль, при яких рідкий метал набуває стійкості до вакуумування, що

важливо враховувати при рафінуючих переплавах у вакуумі із застосуванням постійного струму та наведенням шлаку. При зниженні зовнішнього тиску нижче значень кривих починається виділення газової фази, як видно на рис. 2.2, б. У сумарному тиску газової фази переважає парціальний тиск СО в лівій гілці кожної кривої і парціальний тиск парів Са і Mg в правій частині.

Надання шлаку негативного заряду дозволяє провести окисне рафінування, яке супроводжується переходом катіонів кисню в метал та зустрічним переходом аніонів, зокрема фосфору, в шлак. При такому негативному У процесі спостерігається збільшення маси шлаку за рахунок окислення заліза та інших домішок. Крім того, утворюється газова фаза з переважанням СО в результаті окиснення вуглецю в рідкому металі.

На відміну від традиційного способу введення лужноземельних металів сталь у вигляді дорогого порошкового дроту з допомогою трайб-апаратів технологія ВЕЛР дозволяє використовувати для цього кальцій і магній, що містяться в металургійних шлаках.

Очевидно, що відносно високий парціальний тиск парів кальцію не дозволяє отримати високий його вміст сталі при звичайному атмосферному тиску, так що 0,04% Са є межею для всіх досліджуваних марок сталі. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа виявляється достатнім, щоб довести вміст кальцію сталі до 0,30-0,35%. У цьому випадку більшість кальцію шлакової фази переходить не в газову фазу, а в метал.

Слід зазначити практично лінійну залежність вмісту кальцію від питомого заряду шлаку на висхідних ділянках кривих при підвищеному тиску. Це створює можливість надійного керування необхідним вмістом кальцію в сталі від слідів до верхньої межі 0,35%. Для подальшого збільшення змісту кальцію в сталі необхідно збільшувати частку СаО у шлаку та масу самого шлаку.

Якщо вміст кальцію в сталі із збільшенням позитивного заряду шлаку монотонно зростає від дуже малих значень до верхньої межі, то вміст магнію проходить через максимуми 0,020-0,026%, приблизно відповідні мінімальним

тискам утворення газової фази. При подальшому збільшенні заряду шлаку вміст магнію помітно зменшується і стабілізується на рівні 0,01% при $q > 1,25$ F/моль. Це пов'язано з тим, що частина магнію йде у газову фазу. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа не збільшує максимальний вміст магнію в сталі. Для одержання сталі з вищим вмістом магнію необхідно збільшувати частку MgO в шлаку.

Цікаво відзначити, що модифіковану сталь із високим вмістом кальцію та магнію та наднизьким вмістом сірки та кисню можна отримати навіть з використанням нелегованого напівпродукту та конвертерного шлаку.

Теоретично за допомогою ВЕЛР можна практично повністю видалити сірку та кисень з металу за рахунок ефективного усунення рівноваги в системі метал-шлак-газ. Однак при насиченні шлаку киснем і сіркою шлакова фаза стає термодинамічно нестабільною і може початися її випаровування раніше, ніж відбудеться повне видалення сірки. Питання термодинамічної стійкості неелектронейтральної шлакової фази досить складний і вимагає окремого дослідження, зокрема розгляду функції стабільності ψ .

Далі розглянемо роботу про термодинаміку та кінетику процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу.

У роботі ставиться завдання модифікувати рівняння термодинамічної рівноваги стосовно ВЕЛР; розв'язати систему кінетичних диференціальних рівнянь, що описують траєкторію руху до рівноваги системі "метал-шлак" при ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2; а також виконати аналіз факторів, що впливають на заряд шлаку в системі "метал-шлак", що розглядається як конденсатор.

Якщо прикласти напругу до шлаку (один електрод) та металу (інший електрод), то система "метал-шлак" починає працювати як електричний конденсатор. Таким чином, зміщення осі абсцис на графіці електронейтральності (рис 2.3) буде пропорційним доданій напрузі та ємності конденсатора. У хорошому конденсаторі витоку струму майже не

відбувається, але у випадку ВЕЛР такий витік існує і саме він відповідає за електролізне відновлення, тобто за Фарадею.

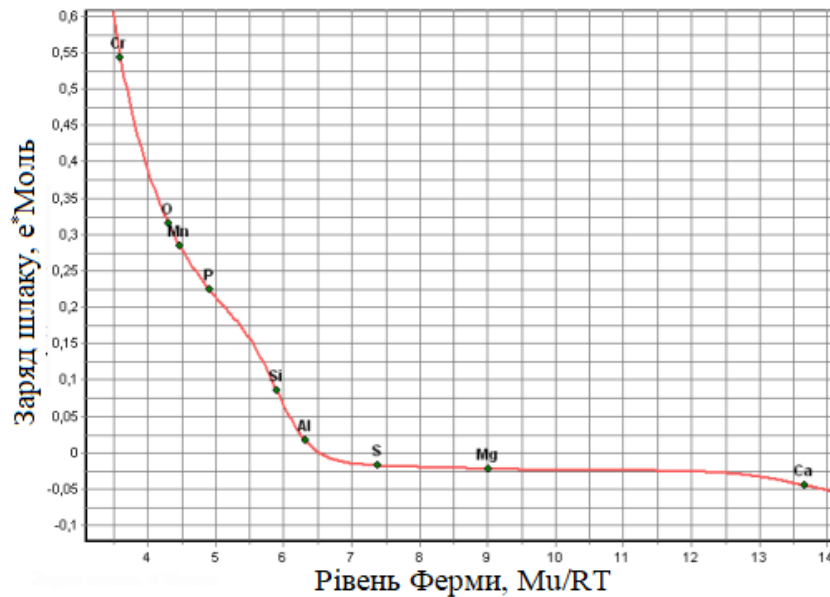


Рисунок 2.3 - Фрагмент кривої електронейтральності при доданому заряді до шлаку 0,05 од. Фарадея при ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2

Для оцінки електролізної складової ВЕЛР необхідно виміряти вольтамперну характеристику системи "метал-шлак", яка може бути суттєво нелінійною при малих струмах і напругах.

Система рівнянь, що описують термодинамічний рівновагу в системі «метал-шлак» в умовах ВЕЛР відрізняється від традиційної, описаної, наприклад, у роботі [22], тим, що рівняння електронейтральності у правій частині містить заряд шлаку Q , виражений в одиницях постійної Фарадея (F):

$$\sum_{i=1}^k n_{(i)} \cdot v_i = Q, \quad (2.1)$$

де $n_{(i)}$, v_i , - відповідно число молей і валентність i -го елемента в шлаку; k число хімічних елементів, що становлять систему «метал-шлак».

Перетворення шуканих величин числа молей елементів у металі та шлаку до фазовим змінним Y і μ дозволяє навести вихідну систему $k+1$ нелінійних рівнянь до двох рівнянь щодо невідомих Y та μ :

$$F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu \cdot v_i)} - Q = 0; \quad (2.2)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i v_i}{1 + \exp(-A_i + Y + \mu \cdot v_i)} - \frac{N}{1 + \exp(Y)} = 0, \quad (2.3)$$

де $Y = \ln(N_m / N_s)$ – натуральний логарифм зворотної величини мольної кратності шлаку; N – сума молей всіх елементів у системі; n – число молей i -го елемента в системі; μ – окислювально-відновний потенціал системи (рівень Фермі); A_i – логарифми консолідованих (або ефективних) констант рівноваги "метал-шлак" по i -му елементу.

2.4 Кінетика відновлення елементів в процесі ВЕЛР

Для опису кінетики процесу ВЕЛР використовували автономну динамічну систему $2k$ до диференціальних рівнянь щодо чисел молей у металі та шлаку, з яких незалежними служать або k рівнянь щодо чисел молей у металі, або k рівнянь щодо чисел молей у шлаку.

Кінетика відновлення елементів з позитивною валентністю та переходу їх у метал характеризується монотонністю за винятком кальцію (рис. 2.4). Елементи відновлюються практично одночасно при русі до рівноваги, причому алюміній відновлюється останнім. Зміст кальцію описується складною кривою з перегинами та локальним мінімумом. Крім того, в повному відповідно до досвідчених даних, спостерігається десульфуріяція металу та монотонне зниження в ньому вмісту сірки. Вміст кисню у металі знижується до рівноважного значення 0,007% без помітних особливостей.

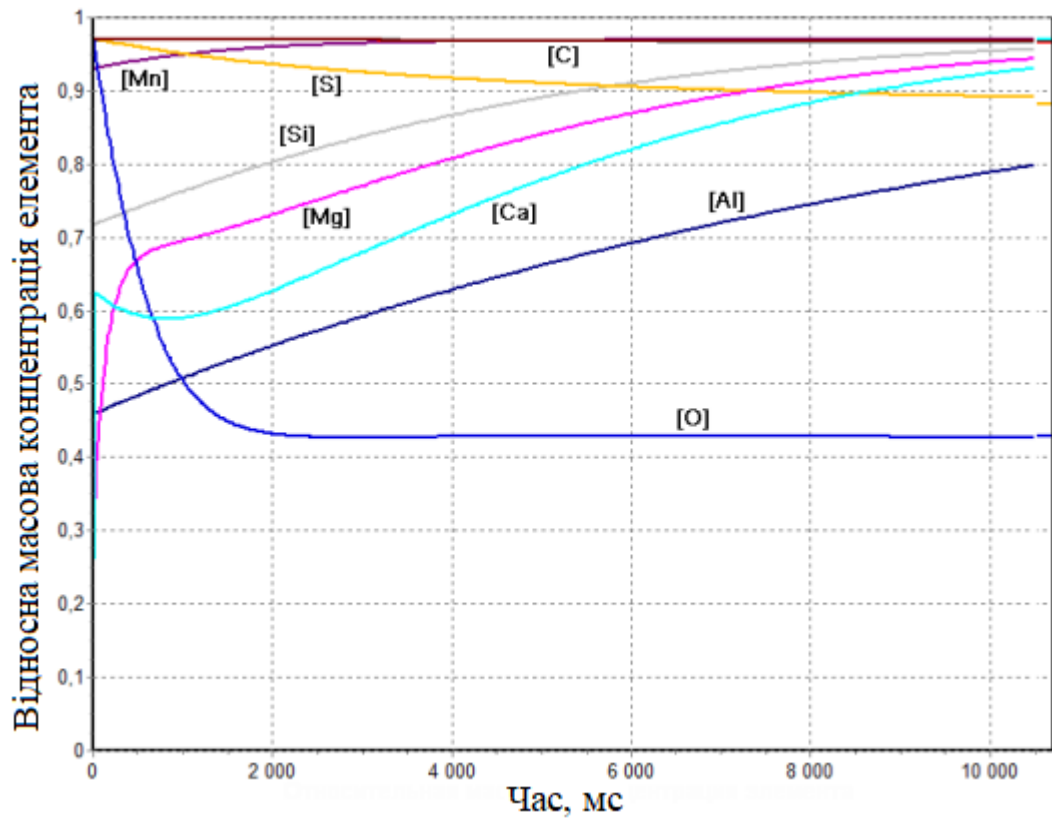
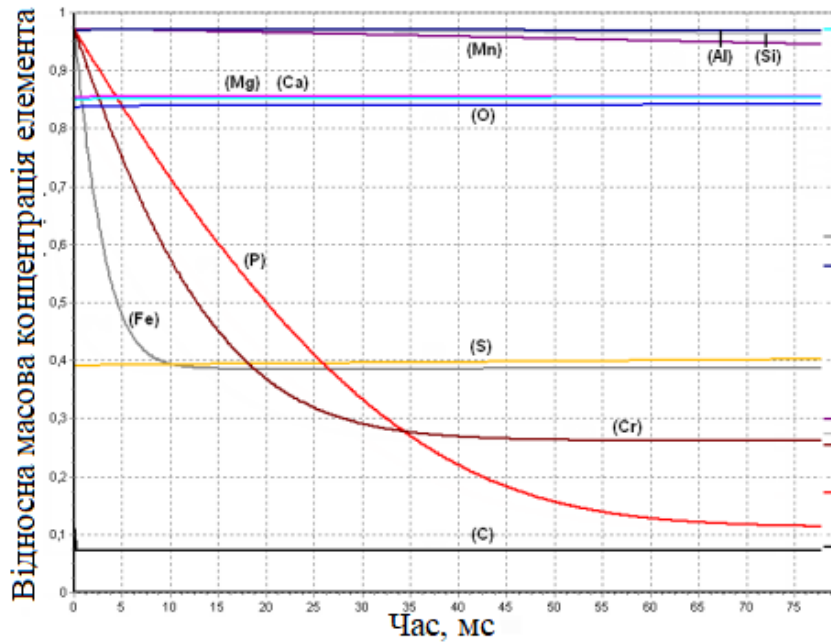
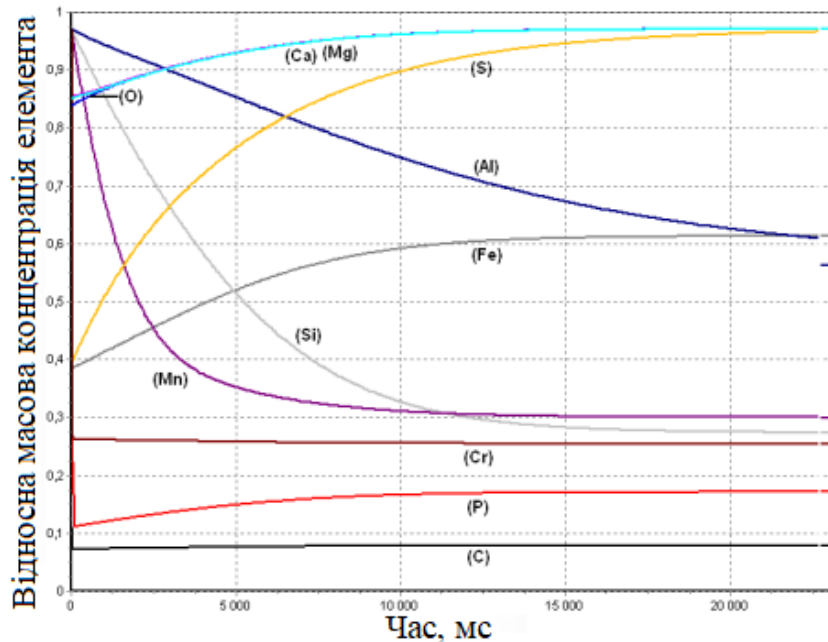


Рисунок 2.4 - Траєкторії руху до рівноваги концентрації елементів у металі в процесі ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2

У шлаку загалом спостерігається протилежна картина, що ілюструється (рис. 2.5). Усі елементи з позитивною валентністю мають чітку тенденцію до їхнього вмісту. Зниження вмісту заліза та фосфору має особливість проходить через мінімум. Одночасно з цим спостерігається зростання вмісту кисню та сірки. Шлак у стані рівноваги стає електрично зарядженим, що підтримується зовнішнім джерелом постійного струму. В експериментальних плавках за рахунок електролізної складової маса відновлених елементів (кремнію та алюмінію) перевищує таку, розраховану лише за рівновагою у системі «метал-шлак». Це підвищує ефективність процесу ВЕЛР, хоча потребує додаткових витрат електроенергії.



(а)



(б)

Рисунок 2.5 – траєкторія руху до рівноваги концентрацій елементів у шлаку ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2 за витримкою 80мс (а) и 23мс (б)

У табл. 2.2 наведені початкові та кінцеві концентрації елементів у металі (сталі 14MnCrSi4-3-2) та шлаку, що відповідають графікам, представленим на рис. 2.4 та 2.5. Як видно з наведених даних, в металі найбільш помітним є збільшення вмісту кремнію на 0,19% з одночасним зниженням його вмісту шлаку на 12,66%. Спостерігається також більш ніж дворазове зростання вмісту алюмінію та магнію в металі відповідно до рівня

0,009% і 2-10%. Зниження зі- утримання кисню в металі до 0,007% гарантує його очищення від оксидних неметалевих включень. Вміст сірки в металі знижується незначно - на 0,003%, проте в шлаку спостерігається більш ніж дворазове зростання з 0,15 до 0,39%. Як впливає з рис. 2.3 для істотного зниження її вмісту в металі потрібно додатково збільшити позитивний заряд шлаку на 0,04 F.

Таблиця 2.2 – Початкові та кінцеві концентрації елементів металу та шлаку в процесі ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2

М/Ш	Вміст хімічних елементів в металі та шлаку, мас.%										
	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
М поч	97,7	0,14	0,56	0,92	0,004	0,029	0,027	$1^* 10^{-4}$	0,64	0,016	Сл..
М кін	97,4	0,14	0,75	0,96	0,009	0,026	0,027	$2^* 10^{-4}$	0,64	0,007	Сл..
Ш нач	0,93	Сл.	18,0	4,07	0,69	0,15	0,004	2,24	0,03	38,3	35,6
Ш кін	0,61	Сл.	5,34	1,32	0,42	0,39	$7^* 10^{-4}$	2,67	0,008	46,6	42,7

Важливою особливістю процесу ВЕЛР при позитивному заряді шлаку є суттєве зниження його маси (на 31% для сталі 14MnCrSi4-3-2), що необхідно враховувати під час проектування промислових установок ВЕЛР. Висновки. Отримано системи рівнянь, що описують рівноважну термодинаміку процесу ВЕЛР та кінетичні траєкторії руху системи «метал-шлак» до рівноваги. Отримані чисельні рішення дають детальну картину зміни концентрацій хімічних елементів у металі та шлаку, що дозволяє проектувати ефективний технологічний процес ВЕЛР. Виконано аналіз факторів, впливаючих на заряд шлаку в системі «метал-шлак», що розглядається як електролітичний конденсатор, що дозволяє розрахувати величини, необхідні для ВЕЛР сталей з особливо низьким вмістом кисню та сірки.

2.5 Висновки

1. Встановлено, що у процесі ВЕЛР збільшення як позитивного, так і негативного питомого заряду шлаку за абсолютною величиною призводить

до утворення газової фази, обсяг виділення якої залежить від зовнішнього тиску. При атмосферному тиску в позитивному процесі значна частина кальцію йде в газову фазу, що не дозволяє отримати його вміст сталі більше 0,04%. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа під час питомого заряду шлаку ≥ 1 F/моль збільшує верхню межу вмісту кальцію сталі до 0,35%. Для легування сталі лужноземельними металами технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дорогого порошкового дроту.

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

3. Отримані системи рівнянь описують рівноважну термодинаміку процесу ВЕЛР і кінетичні траєкторії руху системи «метал-шлак» до рівноваги. Отримані чисельні рішення дають детальну картину зміни концентрацій хімічних елементів у металі та шлаку, що дозволяє проектувати ефективний технологічний процес ВЕЛР. Виконано аналіз факторів, що впливають на заряд шлаку в системі «метал-шлак», що розглядається як електролітичний конденсатор, що дозволяє розрахувати величини, необхідні для ВЕЛР сталей з особливо низьким вмістом кисню та сірки.

4. Термодинамічне моделювання ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність даного процесу та добре узгоджується з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень. Залежно від популярності електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може застосовуватися як власне для розкислення-легування та десульфурзації, так і для окислювального рафінування та зневуглицювання рідкої сталі. Встановлено, що у процесі ВЕЛР збільшення як позитивного, і негативного питомого заряду шлаку за абсолютною величиною призводить до утворення газової фази, обсяг виділення якої залежить від зовнішнього тиску. При атмосферному тиску в позитивному процесі значна частина

кальцію йде в газову фазу, що не дозволяє отримати його вміст у сталі понад 0,04%. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа при питомому заряді шлаку $q > 1 \text{ F/моль}$ збільшує верхній межа вмісту кальцію сталі до 0,35 %. Для легування сталі лужноземельними металами технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дорогої порошкової дроту.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР

3.1 Програмний комплекс «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» [23]. Наступний крок у розробці програмних середовищ для металургійних розрахунків був реалізований у системі «Оракул» [24], 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, працюючі у тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [25] та її наступних модифікаціях [26; 27], ентальпійному тепловому балансі [28] та обліку кінетичного запізнювання [29]. У алгоритмі обратної задачі реалізований універсальний метод фазових

операторів [30], частним випадком котрих є диференційне коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) у метали [31].

Промислова реалізація одного з варіантів програми – системи управління плавкою та позапічною обробкою «Гіббс»® [32] – 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 :

- проведення інтегрованного термодинамічного розрахунку кінечної температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;
- виконання термодинамічного розрахунку рівноваги у багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» з урахуванням теплоти хімічних реакцій;
- розрахунок та відображення всіх інтегральних та парціальних термодинамічних функцій складових системи, включно всі фази та окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;
- можливість розрахунку парціального тиску всіх атомарних та молекулярних складових газової фази;
- 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;
- точний облік теплоти енергоносіїв та теплових втрат, температури та агрегатного стану матеріалів;

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

- 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;

- 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;

- застосування матричної алгебри фазових операторів та швидкодіючого алгоритму двоїстого симплекс-методу;

- розрахунок консолідованої матриці впливу добавок матеріалів та енергоносіїв на масу та склад фаз, а також температури системи;

- практична реалізація принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативної виробки альтернативних варіантів легування, розкислення та позапічної обробки сталі при відсутності рішення зворотньої задачі у первісному вигляді.

- облік невизначеності вихідних та розрахункових даних шляхом задання відповідних довірчих інтервалів «нижня межа – верхня межа»;

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.3.1).

№	Матеріал	т	№	Ел	Мет	мас%	Шлк	мас%	Газ	мас%	НВ	мас%	№	Газ	P >=	P <=
1	FeMn	1,555	0	Fe	98,31	98,24	0,915	0,872	0,017	0,017			1	CO	0,993	0,994
2	SiMn		1	C	0,322	0,337	0	0	42,66	42,67			2	CO2	4,9e-3	4,7e-3
3	FeSi65		2	Si	0,5	0,522	26,83	26,77	0,022	0,022			3	Mg	9,0e-4	9,2e-4
4	ФХ100Б		3	Mn	0,8	0,832	2,29	2,28	0,093	0,096			4	Mn	4,8e-4	4,9e-4
5	ФХ800Б		4	Al	0,005	0,005	1,06	1,038	0	0			5	SiO	2,2e-4	2,2e-4
6	ФСХ33		5	S	0,035	0,035	0,234	0,242	0,0005	0,0005			6	Fe	8,5e-5	8,3e-5
7	АВ-87		6	P	0,022	0,022	0,004	0,003	0	0			7	Ca	3,7e-6	3,7e-6
8	Коксик		7	Mg	0,0001	0,0001	4,844	4,851	0,078	0,079			8	COS	2,6e-6	2,6e-6
9	Карбід Si	1,151	8	Cr	0	0	0	0	0	0			9	SiS	1,6e-6	1,7e-6
10	Футерівка	0,1	9	O	0,01	0,01			57,12	57,12			10	PO	2,7e-7	2,6e-7
11	Вапно	0,196	10	Ca	0	0	63,82	63,94	0,0005	0,0005			11	S	1,7e-7	1,7e-7
12	Е/е МВтг	1,776	Σ	kg	152618	152652	1002	999,9	155,4	157,6			12	FeS	1,1e-7	1,1e-7
													13	CS	4,5e-8	4,6e-8
													14	MgO	3,3e-8	3,2e-8
													15	SiO2	3,1e-8	2,9e-8
													16	MnS	2,7e-8	2,7e-8
													17	SO	2,4e-8	2,2e-8
													18	S2	1,7e-8	1,7e-8
													19	MnO	1,6e-8	1,6e-8
													20	Al	1,0e-8	1,0e-8
													21	P	8,2e-9	8,0e-9
													22	PS	6,7e-9	6,6e-9

Рис. 3.1 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 елементу 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) застосовуюемо 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, потрібний 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 відображаються усі ключові характеристики даного процесу.

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 14MnCrSi4-3-2 при випуску металу у ковш.

Файл завдань - 12MnSi4-3.TSK

Шлак 1т | Шлак 2т | Шлак 3т

N	Матеріал	Реком	Фікс	Мін т	Макс т	Мін %	Макс%
1	FeMn	1,7					
2	SiMn						
3	AB-87	0,05					
4	Футерівка		0,1				
5	Карбід Si	0,1					
6	Коксик						
7	FeSi65	1,5					

N	Ел	Мет>=	Мет<=	Проба	Шлк>=	Шлк<=	Проба
1	Fe						20
2	C	0,09	0,15	0,06			
3	Si	0,5	0,8				20
4	Mn	0,8	1,2	0,05			10
5	S		0,04	0,035			0,3
6	P		0,035	0,015			0,2
7	Ca						45
8	Mg						3
9	Al						1,5
10							
11							
12							

Мін / Макс М мет. Відома поч. М мет.
 150 - 150

Мін / Макс М шл. Відома поч. М шлаку
 1 - 1

Мін / Макс осн-ть Т-ра н.серед Заряд
 20

Мін / Макс М газу Поч. т-ра, °C Р, атм
 1600 1

Мін / Макс т-ра, °C Q+, МДж Q-, МДж

Відміна Довідка Прийняти

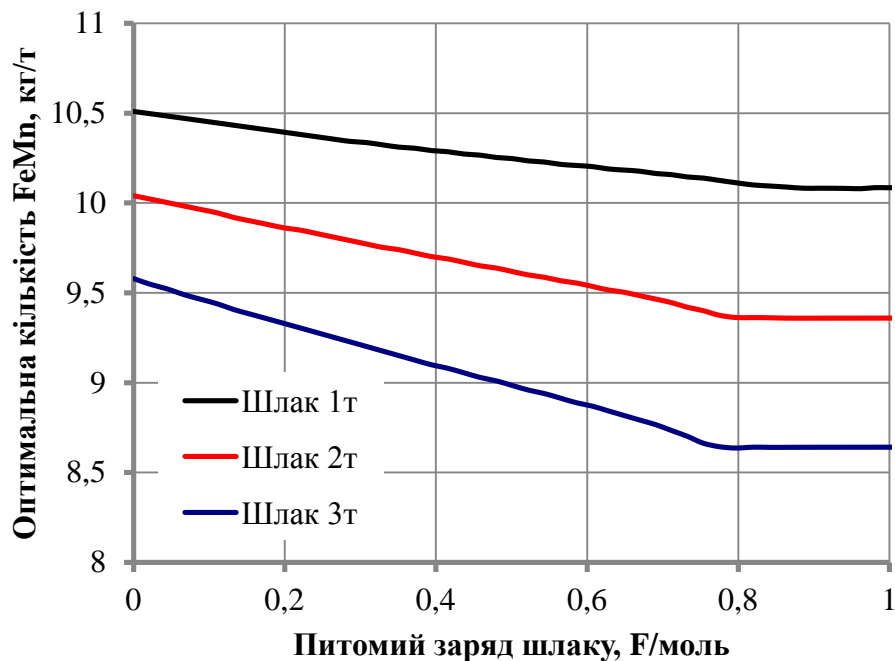
Рис. 3.2 Форма редактору завдання на плавку

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 моделювати різноманітні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурзації та дефосфорування сталі [33].

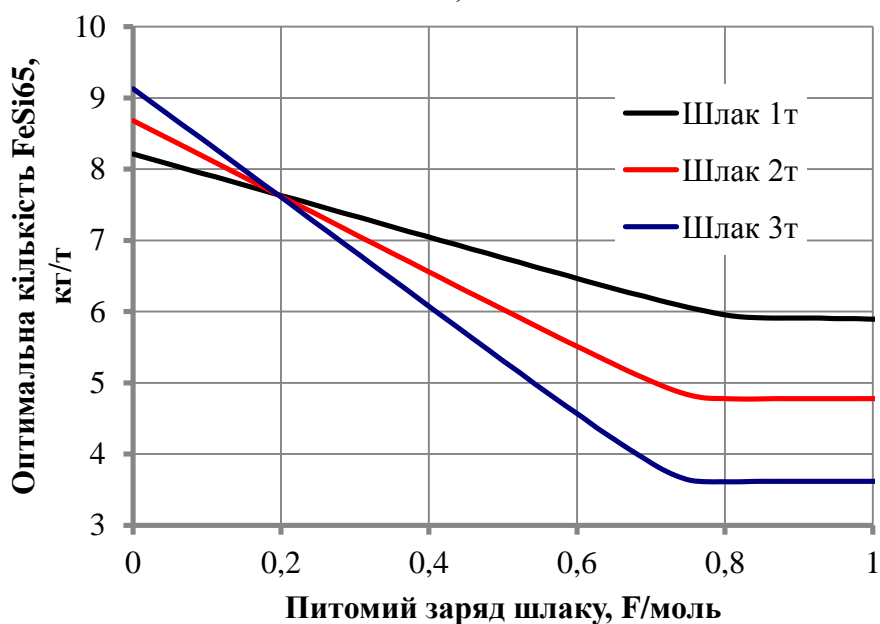
3.2 Обчислювальний експеримент

3.2.1 Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість

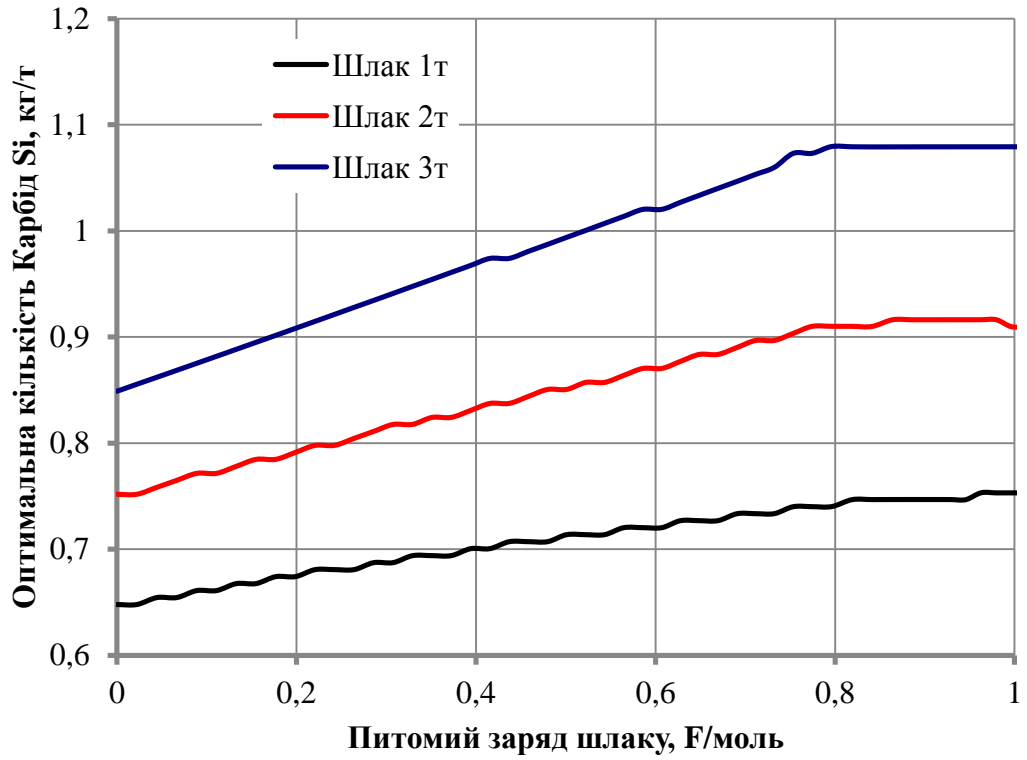
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 9MnSi6-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість. На рис 3.3 – 3.6 наведено результати розрахунків.



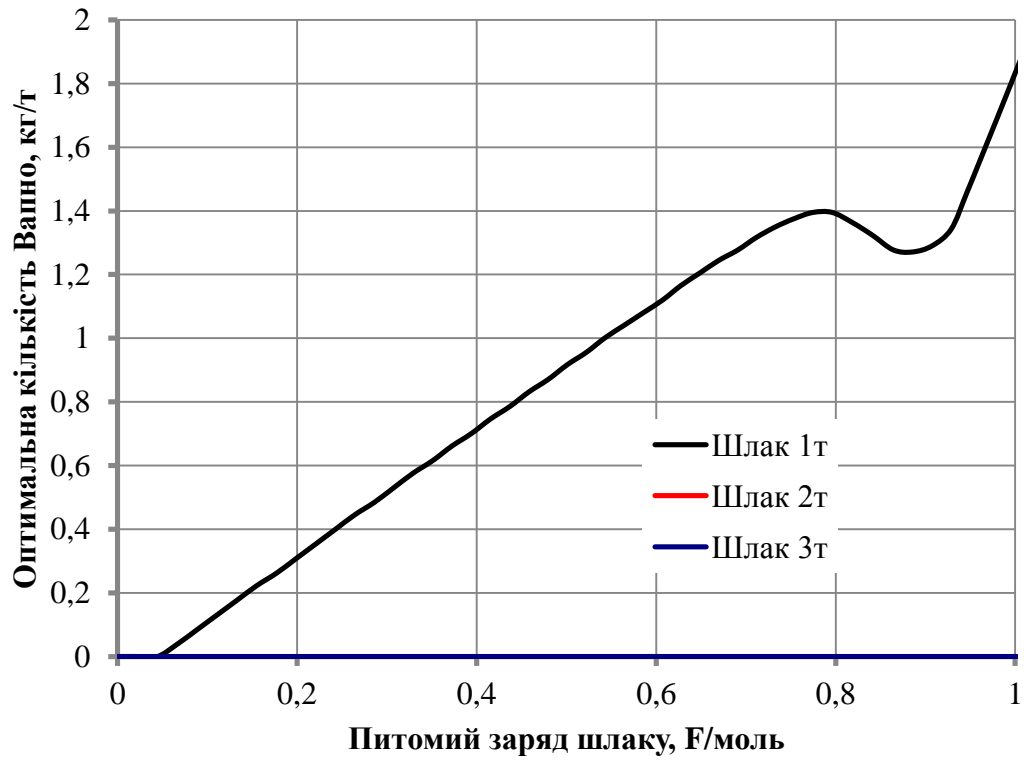
а)



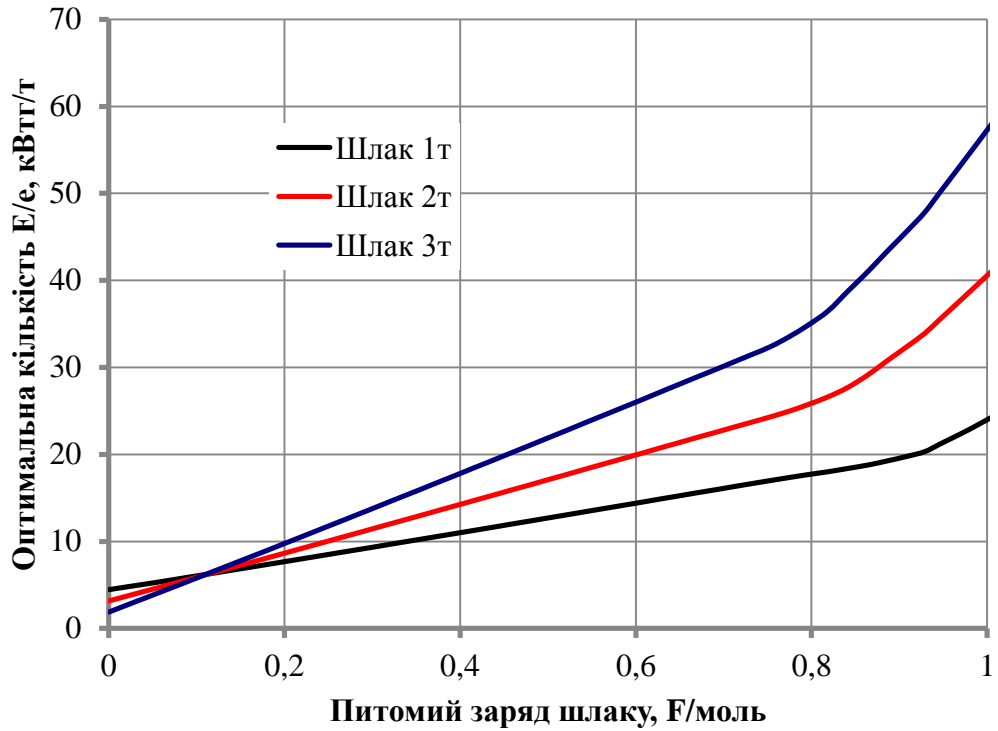
б)



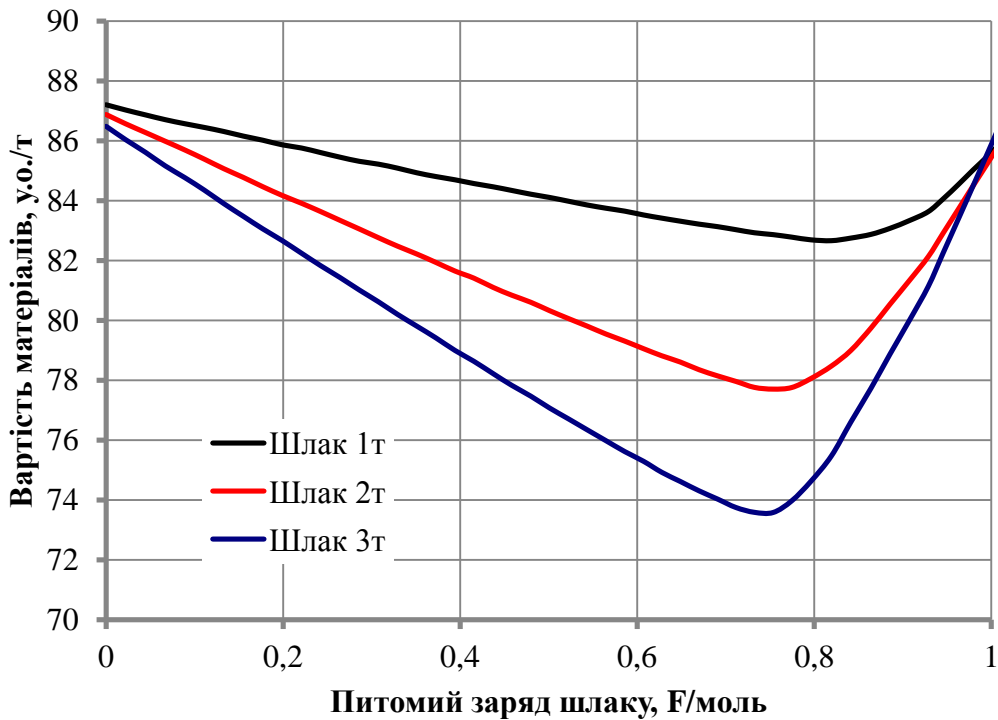
в)



г)

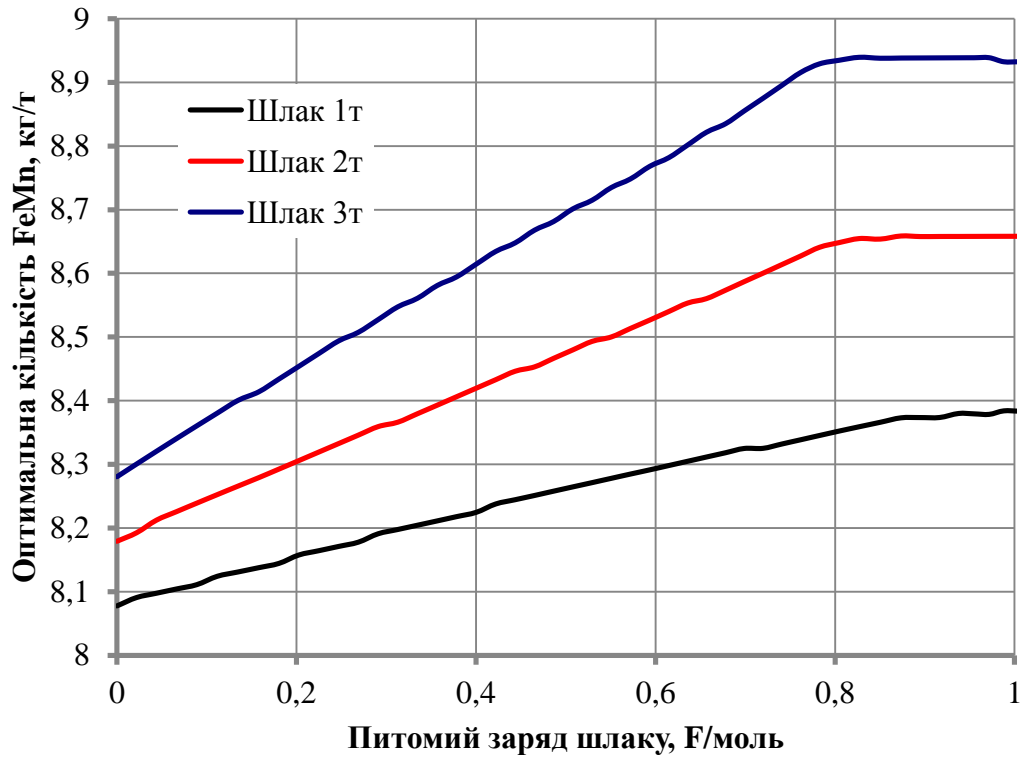


д)

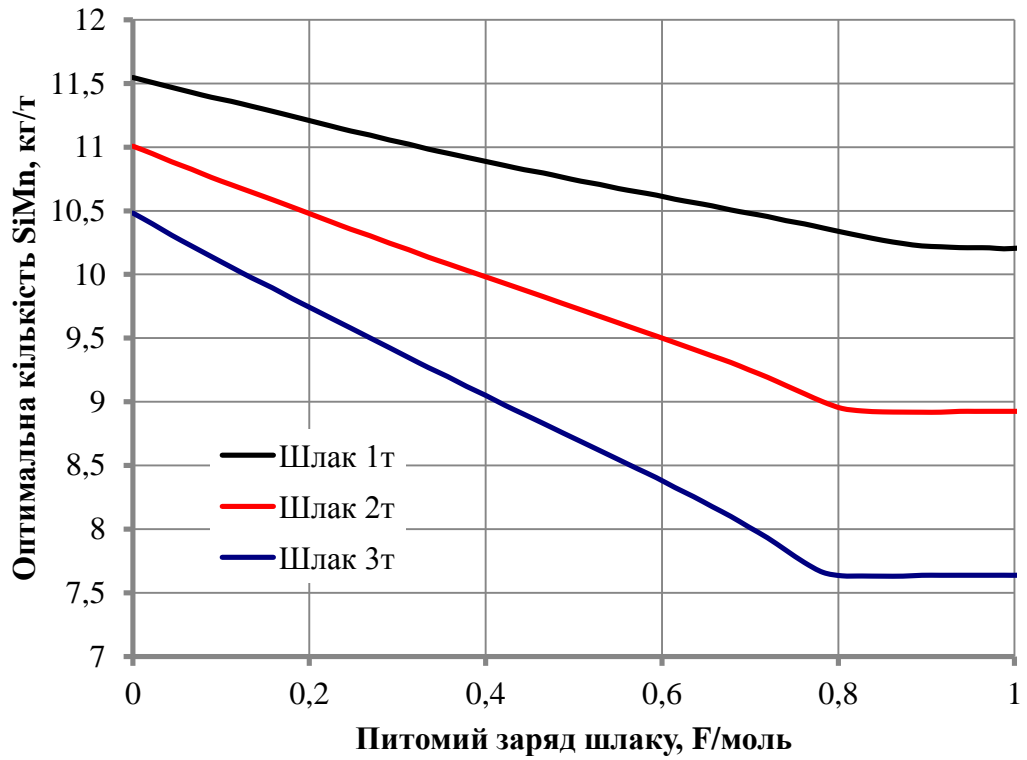


е)

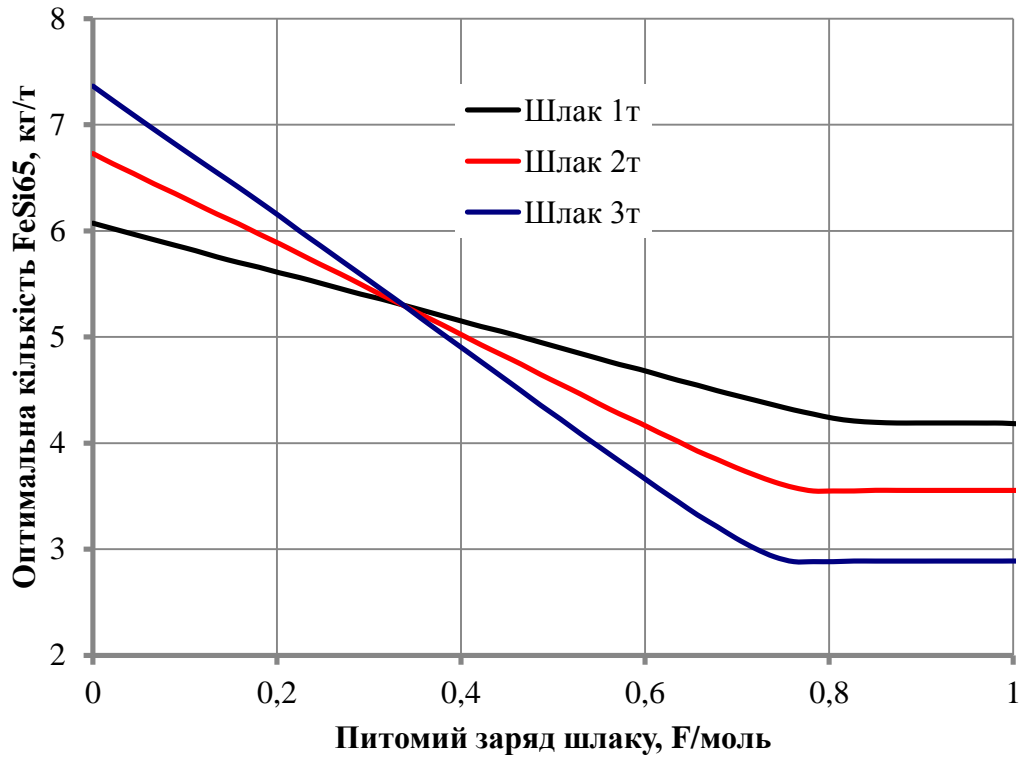
Рис.3.3 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легируючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 12MnSi4-3:
 а) FeMn; б) FeSi65; в) карбід Si; г) вапно; д) електроенергія; е) вартість матеріалів



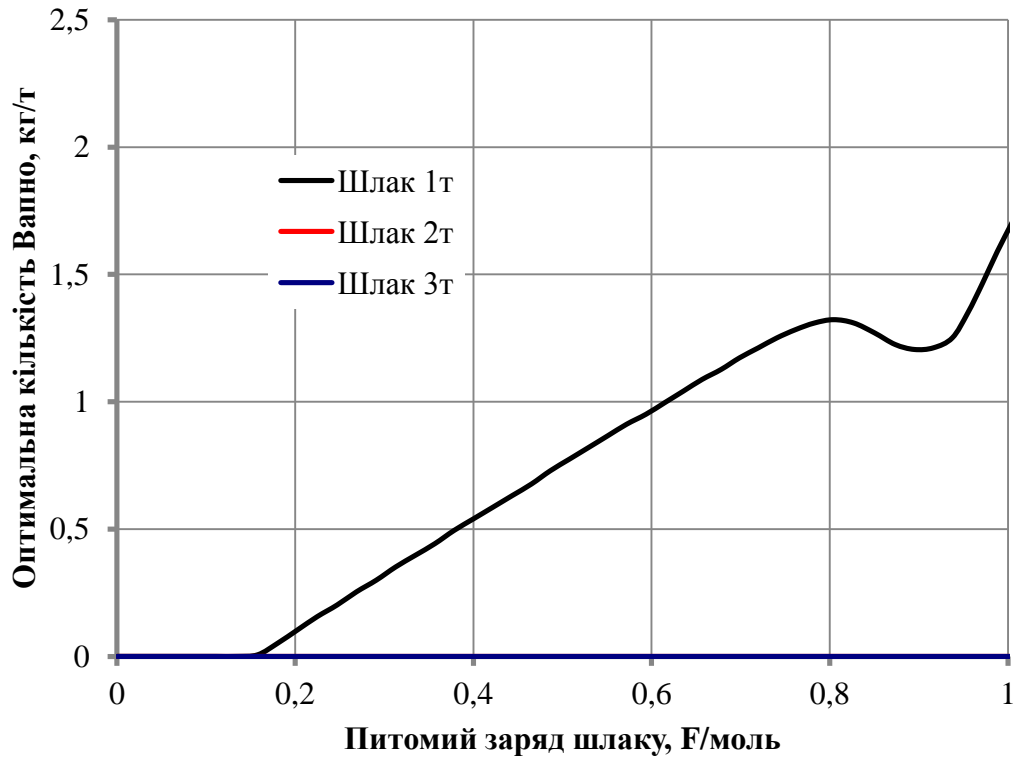
а)



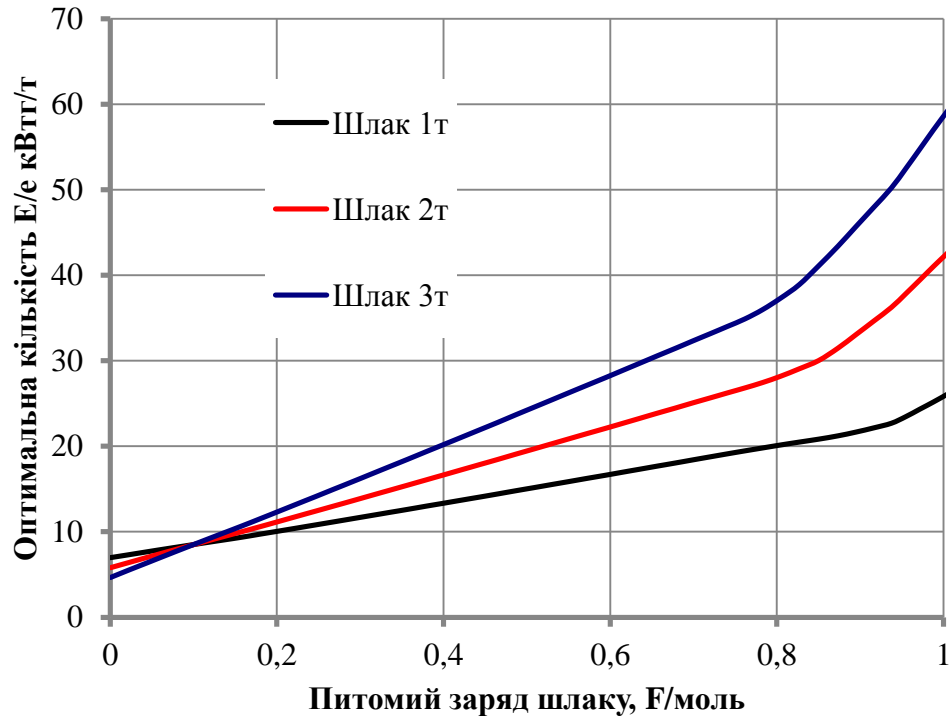
б)



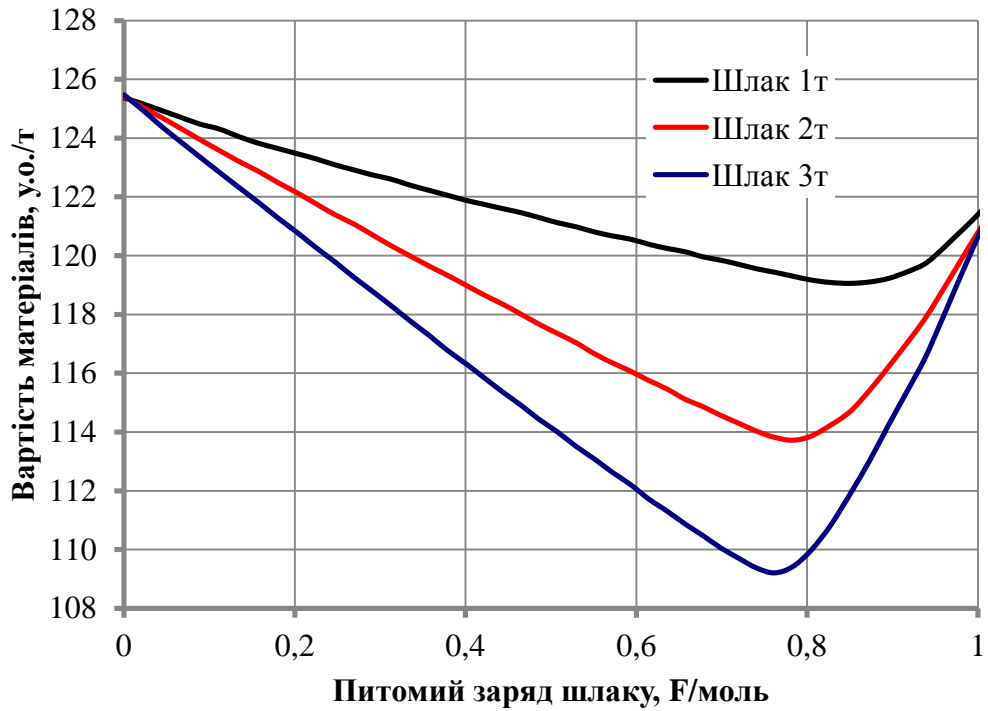
в)



г)

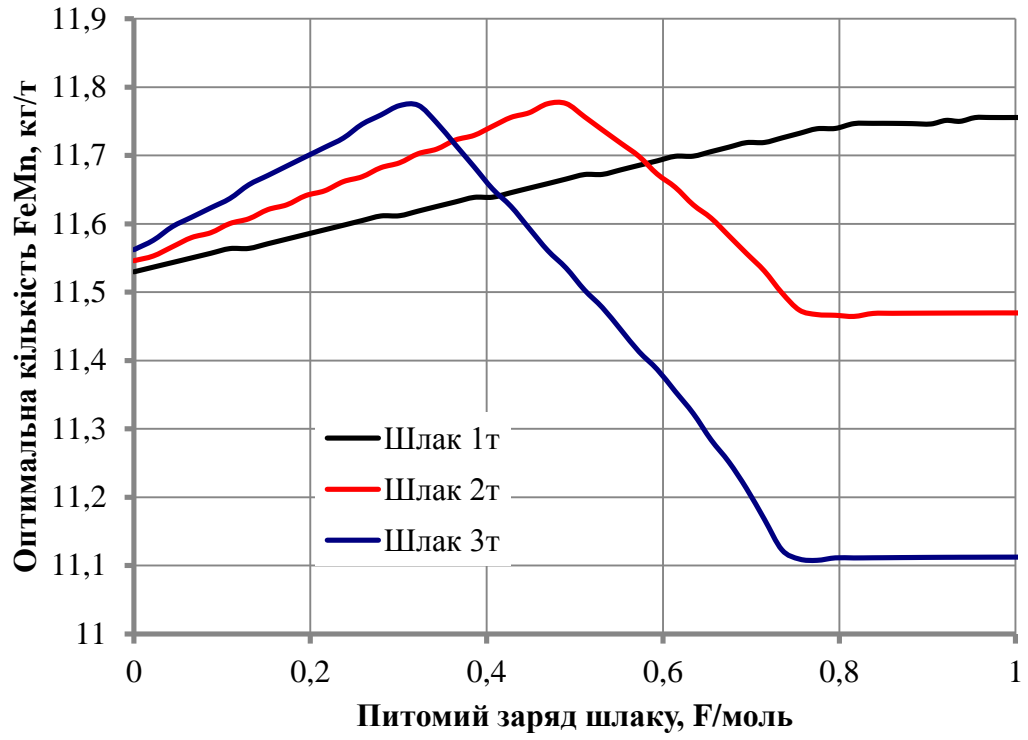


д)

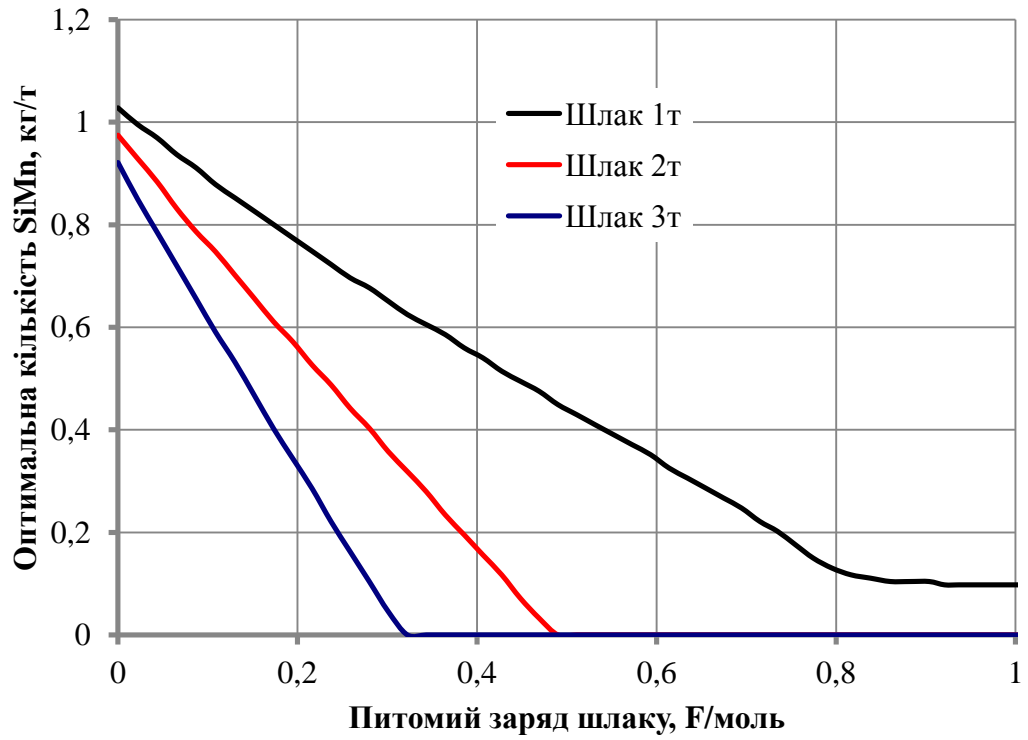


е)

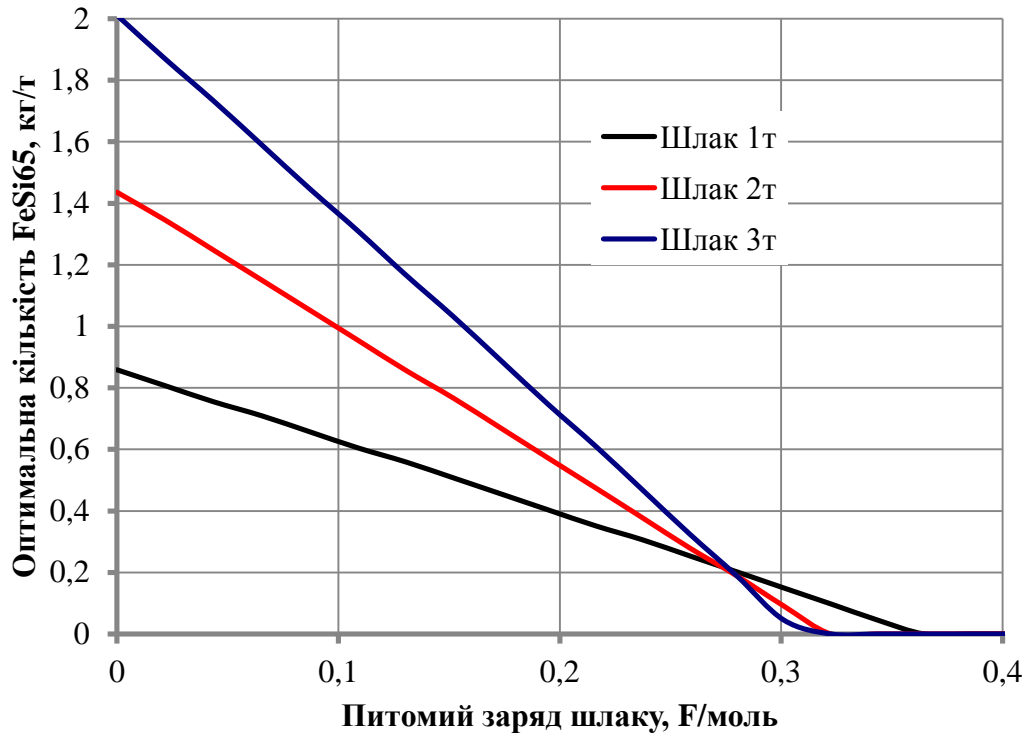
Рис.3.4 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легируючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 9MnSi6-3:
 а) FeMn; б) SiMn; в) FeSi65; г) вапно; д) електроенергія; е) вартість матеріалів



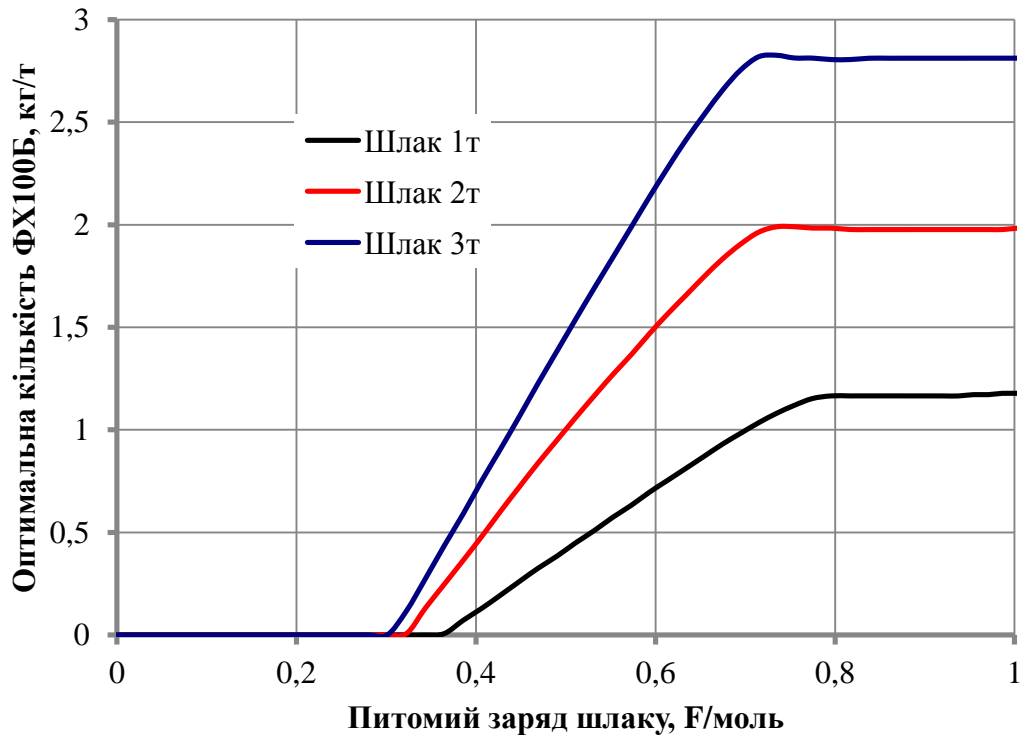
а)



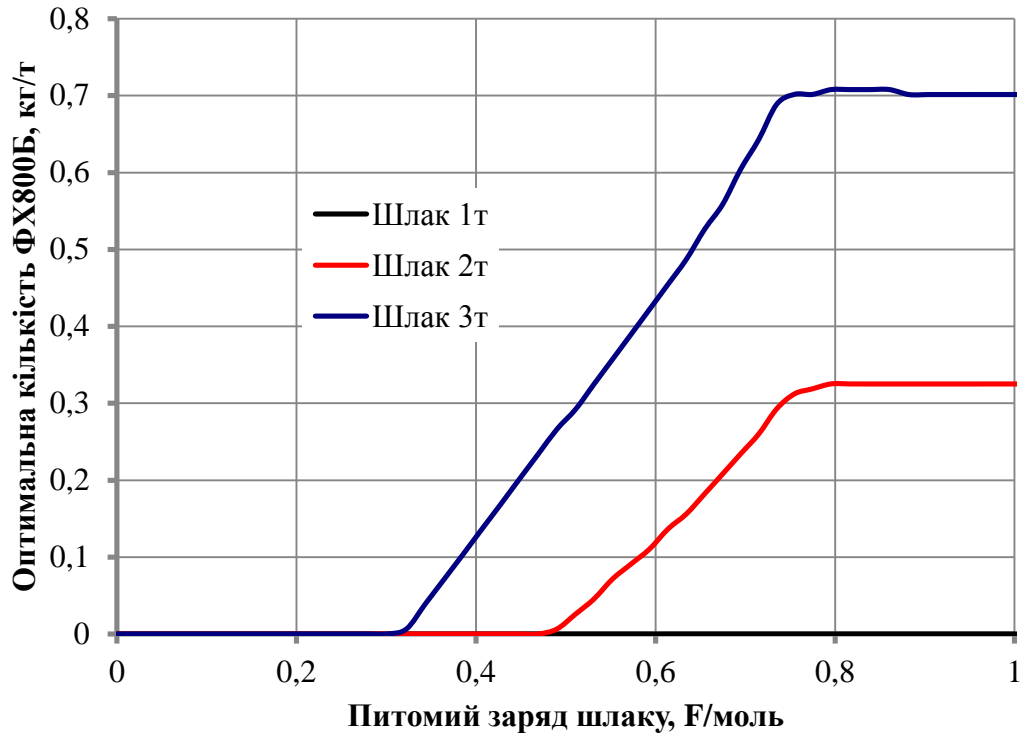
б)



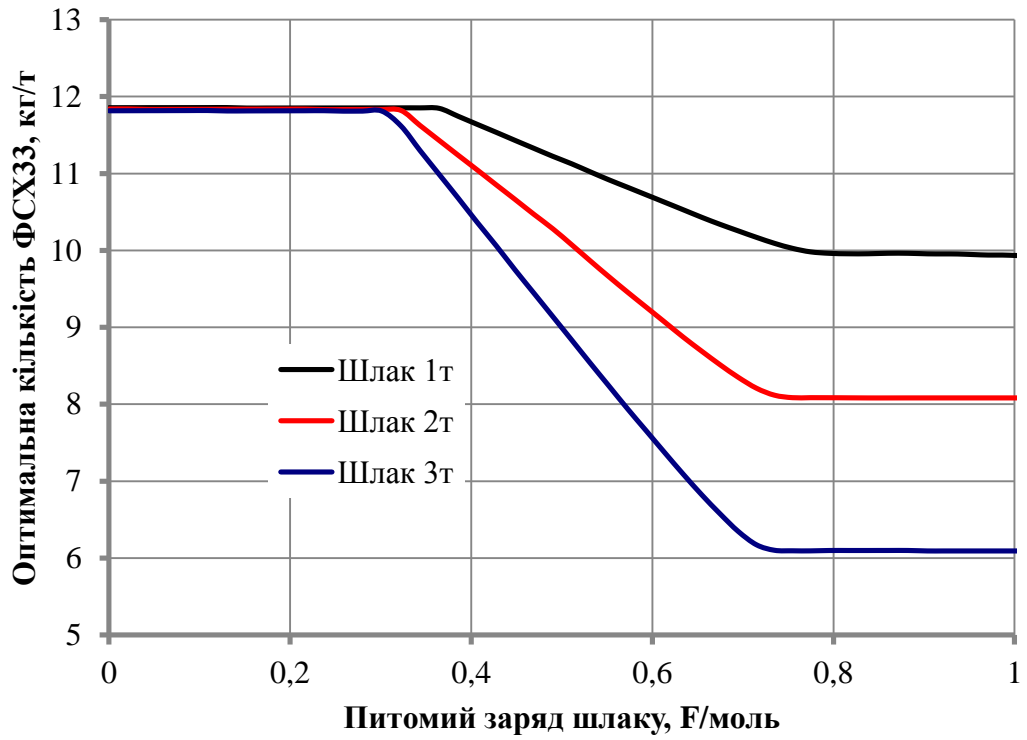
в)



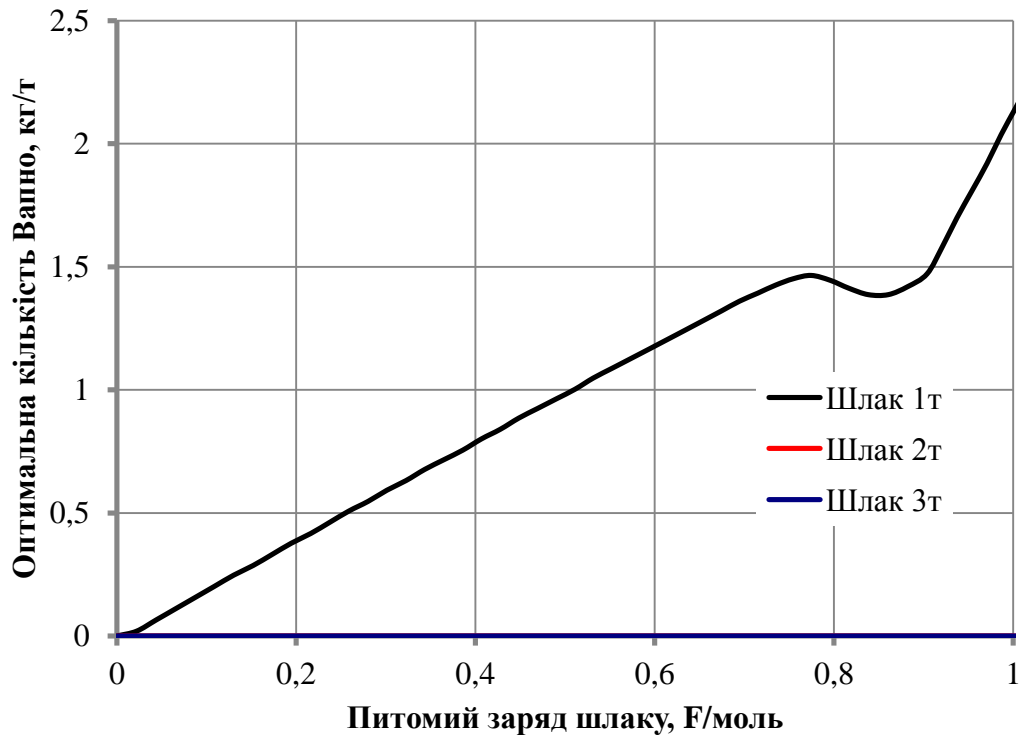
г)



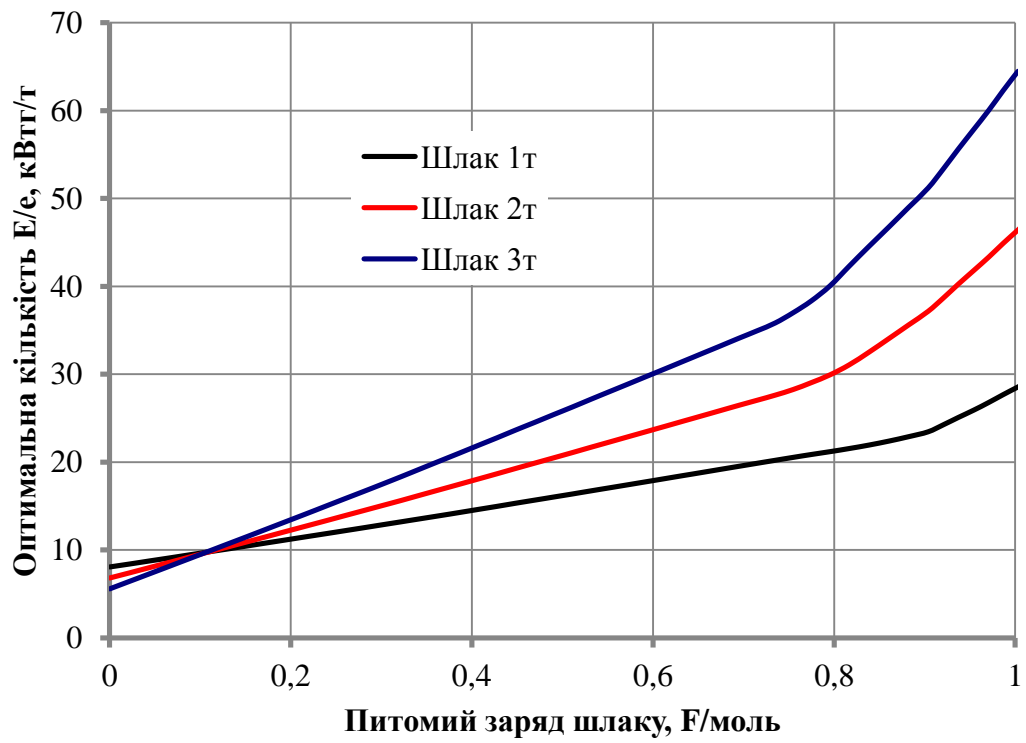
д)



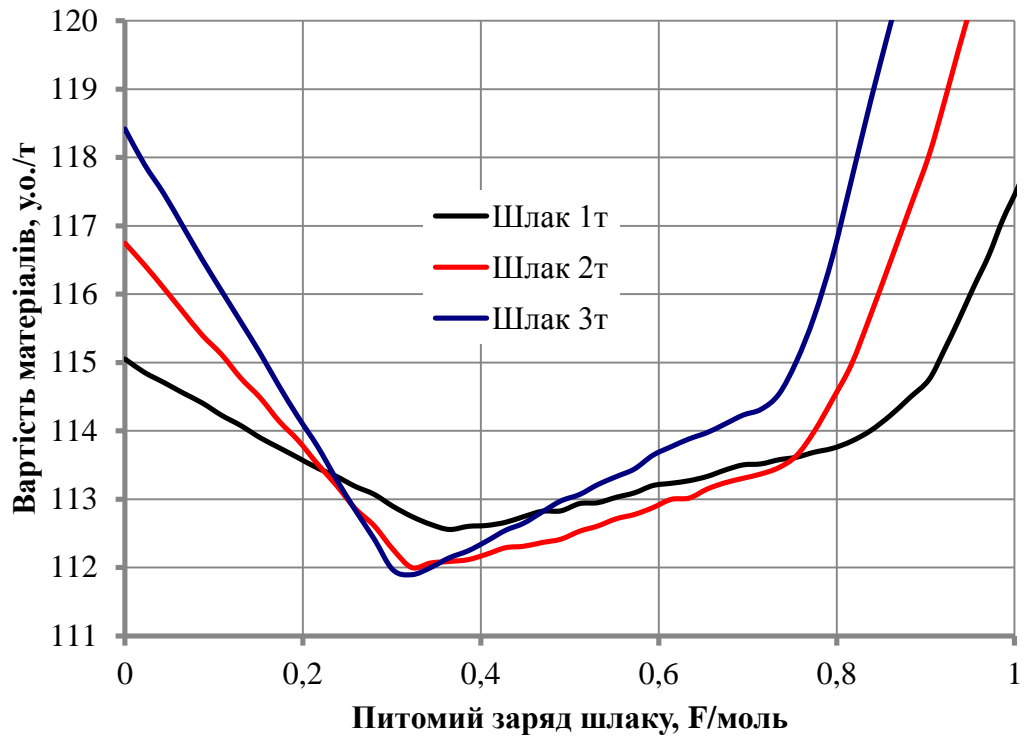
е)



є)

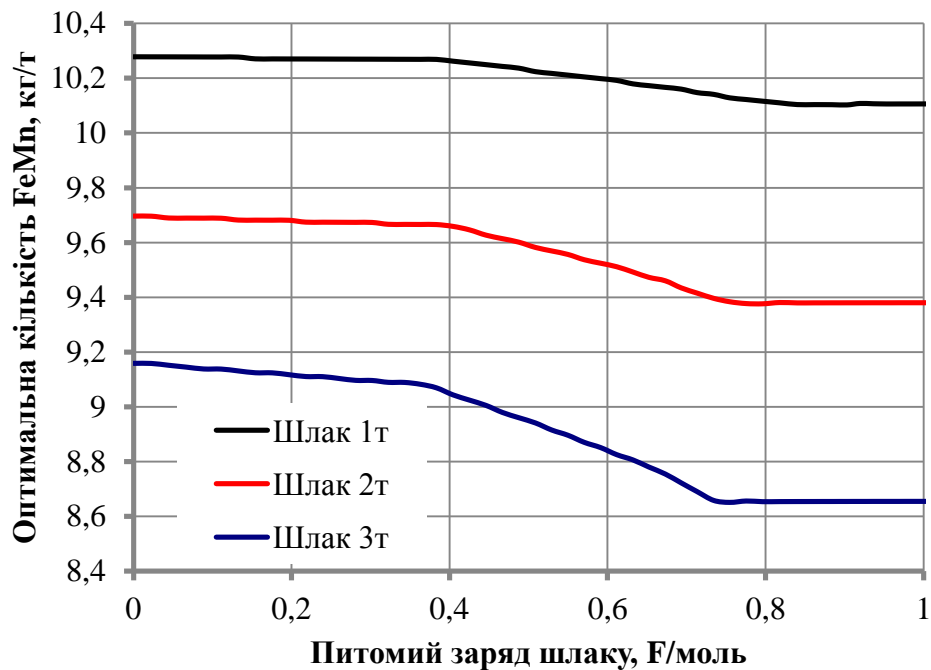


ж)

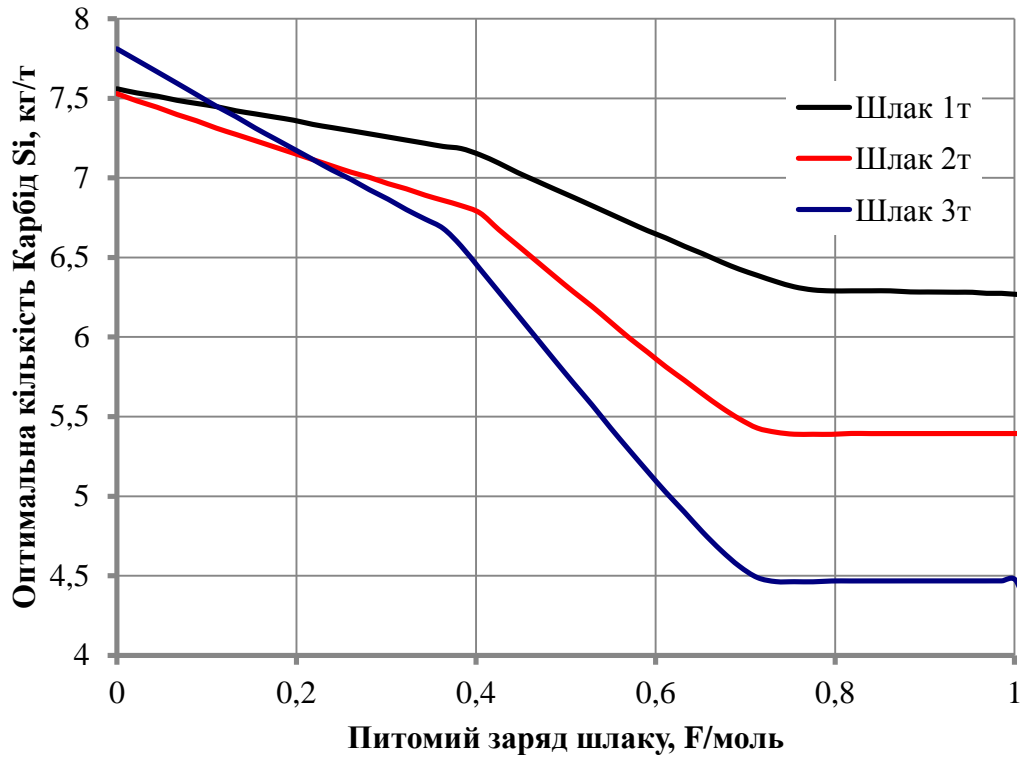


з)

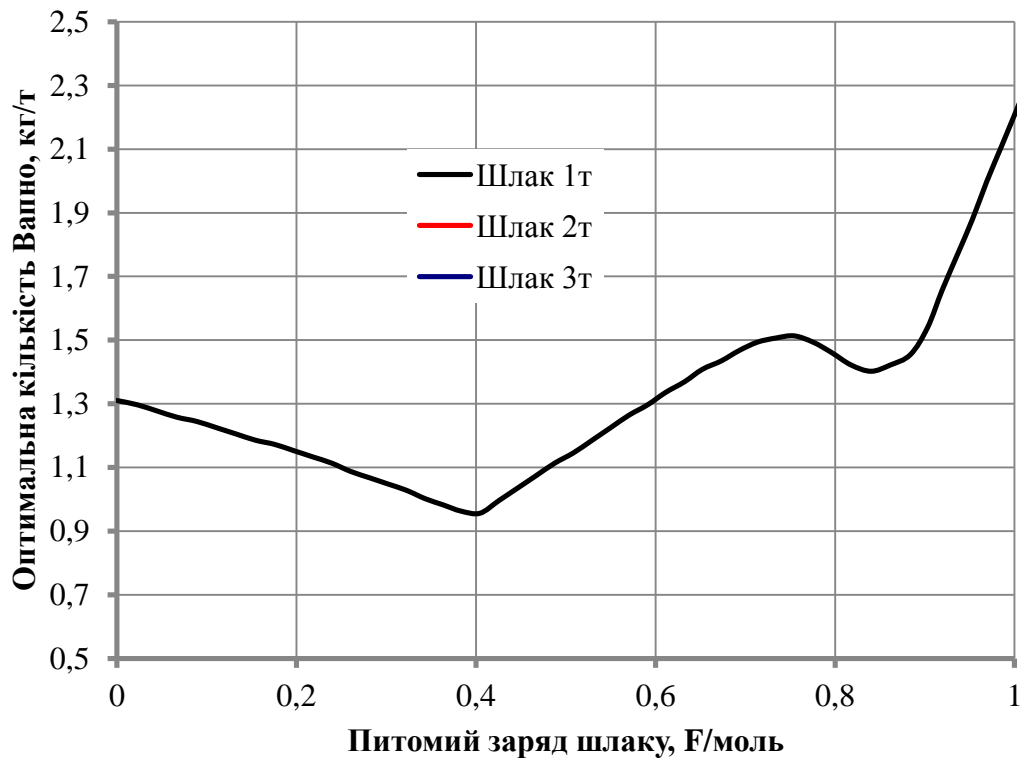
Рис.3.5 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 14MnCrSi4-3-2:
 а) FeMn; б) SiMn; в) FeSi65; г) ФХ100Б; д) ФХ800Б; е) ФСХ33; є) вапно; з) електроенергія ; ж) вартість матеріалів



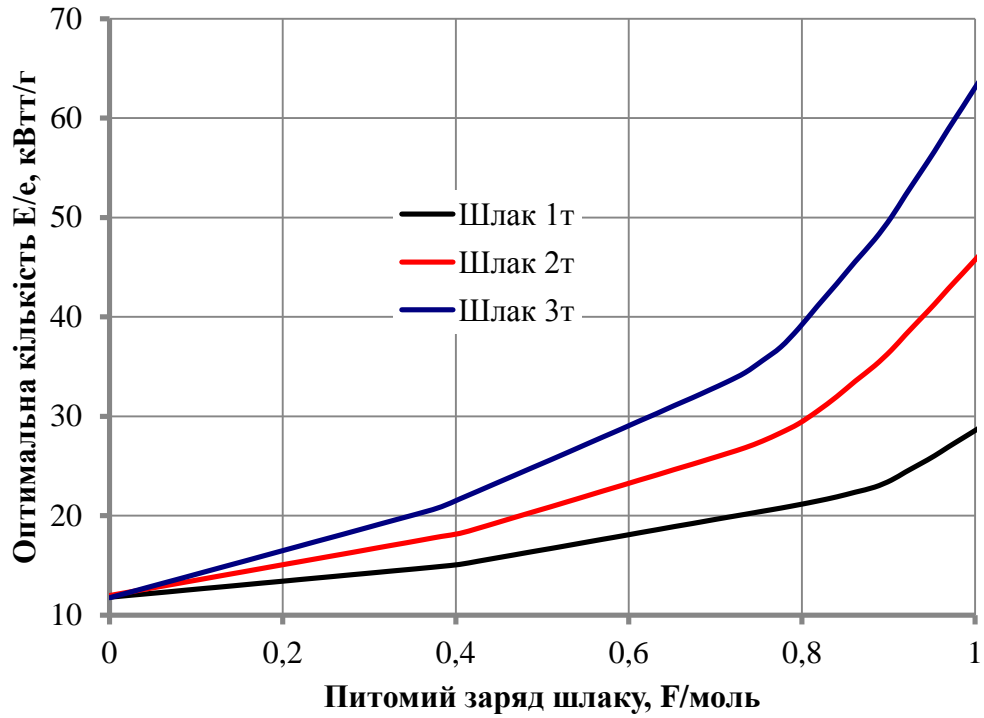
а)



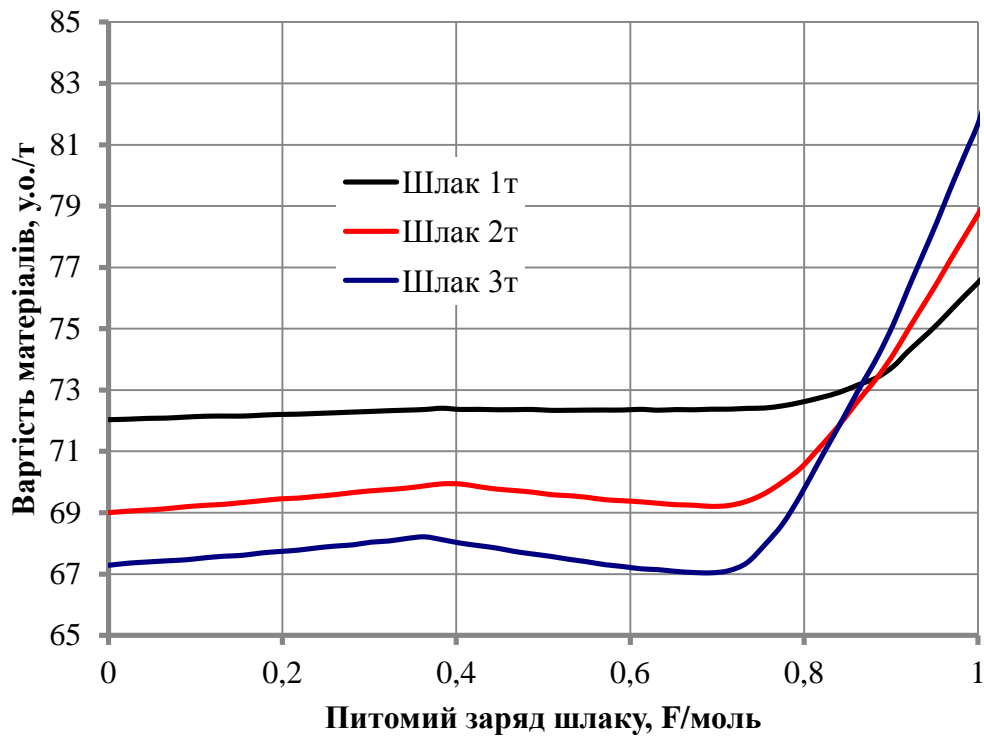
б)



в)



г)



д)

Рис.3.6 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 30MnSi4-3:

а) FeMn; б) карбід Si ; в) вапно; г) електроенергія; д) вартість матеріалів

Кількість легуючих матеріалів оптимізується з використанням симплекс методу лінійного програмування та диференціальних коефіцієнтів засвоєння таки чином, щоб рівень регламентованих хімічних елементів у сталі був якомога ближче до нижньої межі з гарантованою відповідністю заданому інтервалу. Разом с тим спостерігаються наступні закономірності.

1. При підвищенні питомого заряду шлаку при легуванні сталей 12MnSi4-3 та 9MnSi6-3 загальна вартість матеріалів зменшується і при 0,8 F/моль досягає мінімуму. Для сталі 14MnCrSi4-3-2 цей мінімум досягається при питомому заряді шлаку 0,3 F/моль. При подальшому зростанні заряду шлаку вартість легуючих матеріалів підвищується. Для сталі 30MnSi4-3 мінімум вартості не спостерігається при будь-якій масі шлаку, але обробка металу методом ВЕЛР має сенс завдяки глибоким десульфурації і розкисленню металу.

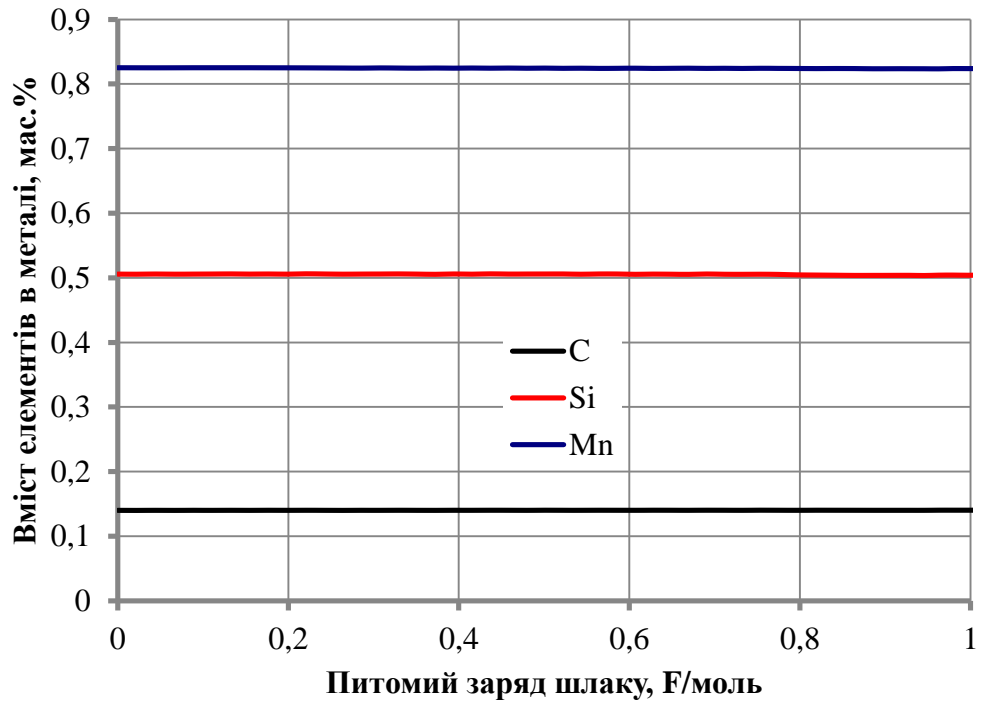
2. Витрати електроенергії при підвищенні питомого заряду шлаку постійно зростають для всіх марок сталей тим більше, чим більше маса шлаку. При нульовому заряду шлаку витрати електроенергії для підігріву металу складають 3...14 Е/е кВтг/г. Найбільші витрати електроенергії на рівні 110..120 кВтг/т спостерігаються при легуванні сталі 14MnCrSi4-3-2.

3. Витрати феросиліцію, силікомарганцю та силікохрому, якщо вони застосовуються, знижуються для всіх марок сталей. Кремній виявляється найбільш відновлювальним у процесі ВЕЛР, адже кількість його в шлаку значна. За рахунок цього знижується загальна вартість матеріалів до певної межі питомого заряду шлаку.

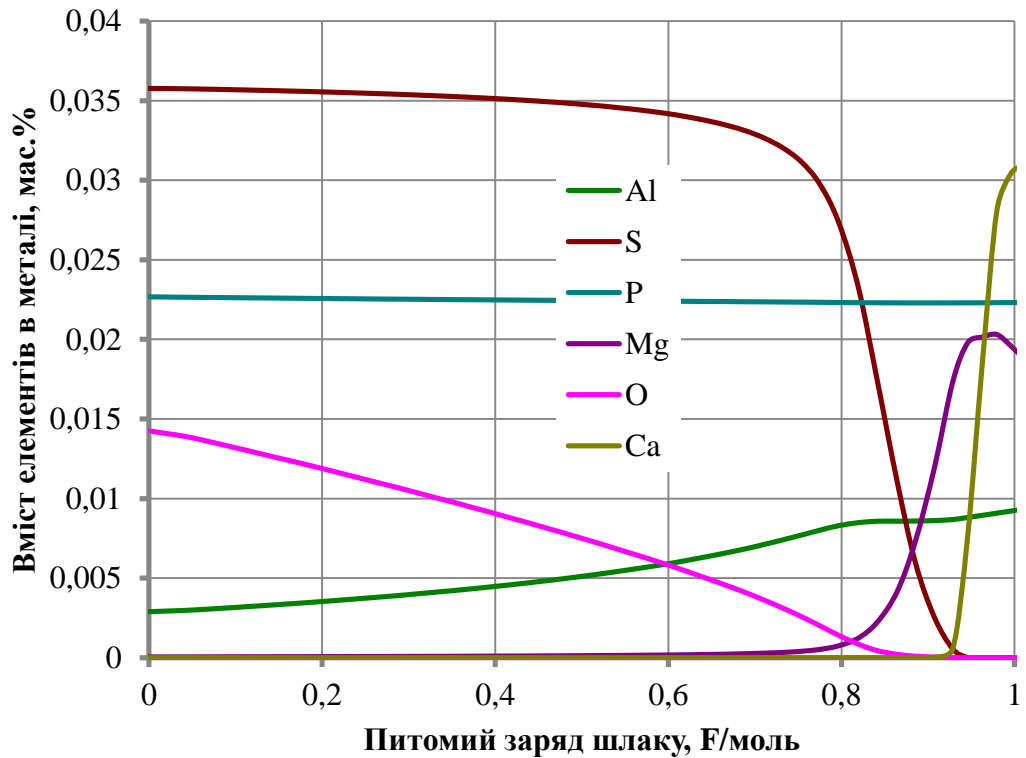
4. При підвищенні питомого заряду шлаку витрата вапна зростає до 1,5..2,0 кг/т тільки у випадку застосування 1 тонни начального шлаку для компенсації зниження його маси в процесі ВЕЛР.

3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі

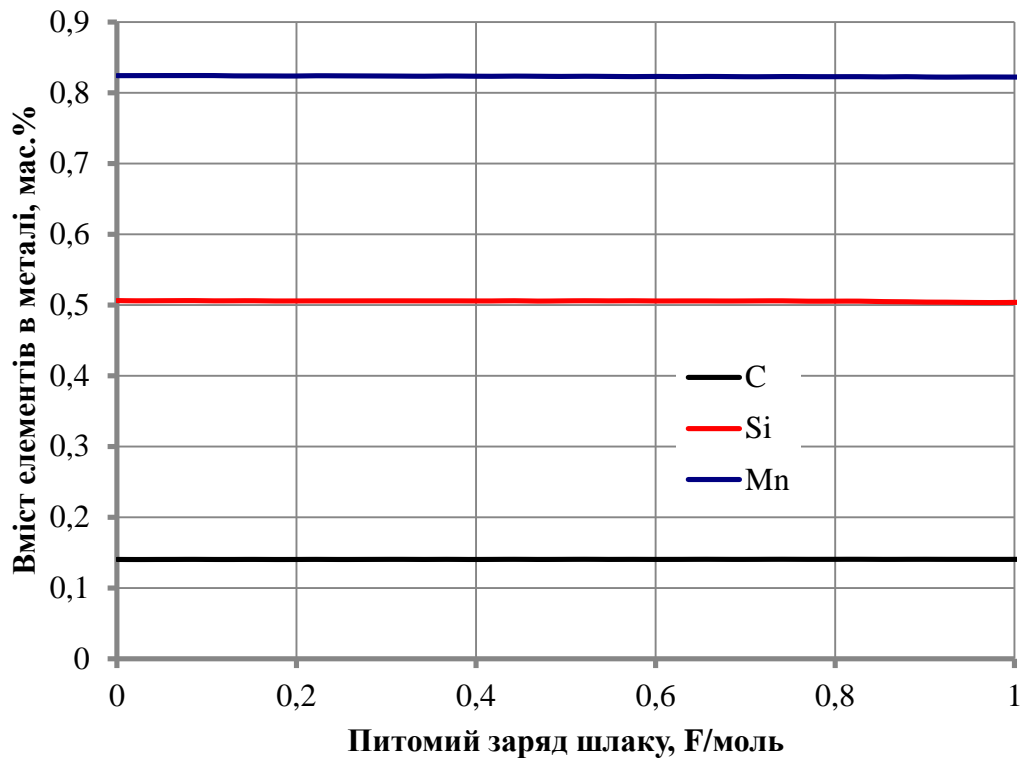
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі. На рисунках 3.7–3.15 наведено відповідні результати розрахунків.



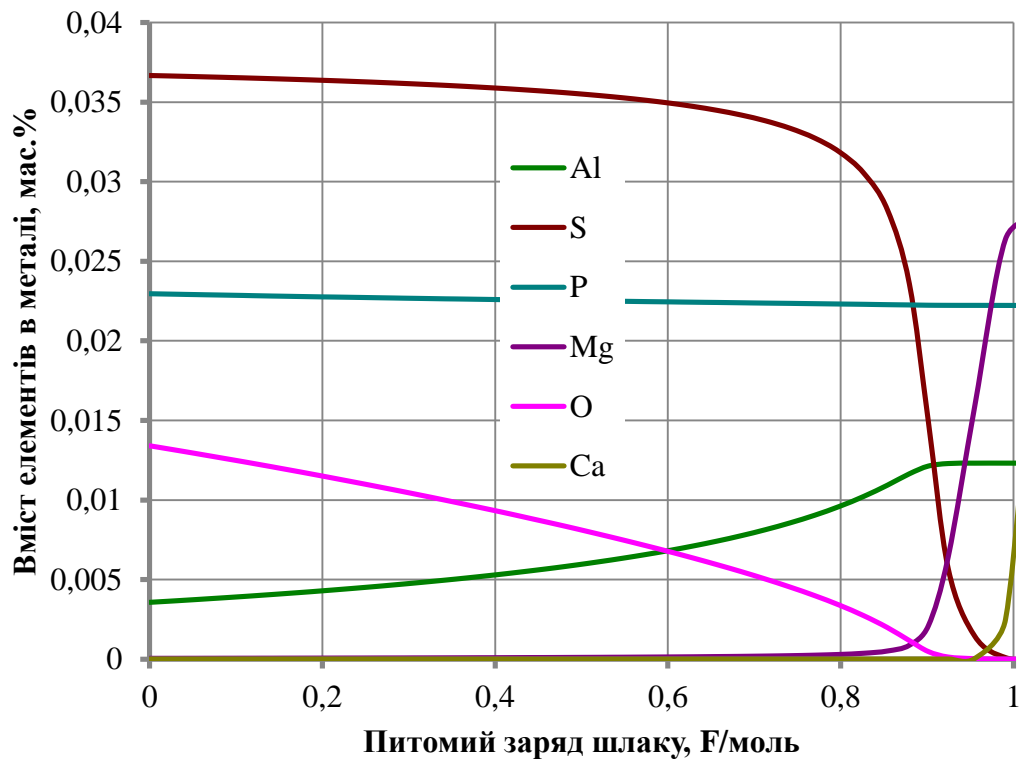
а)



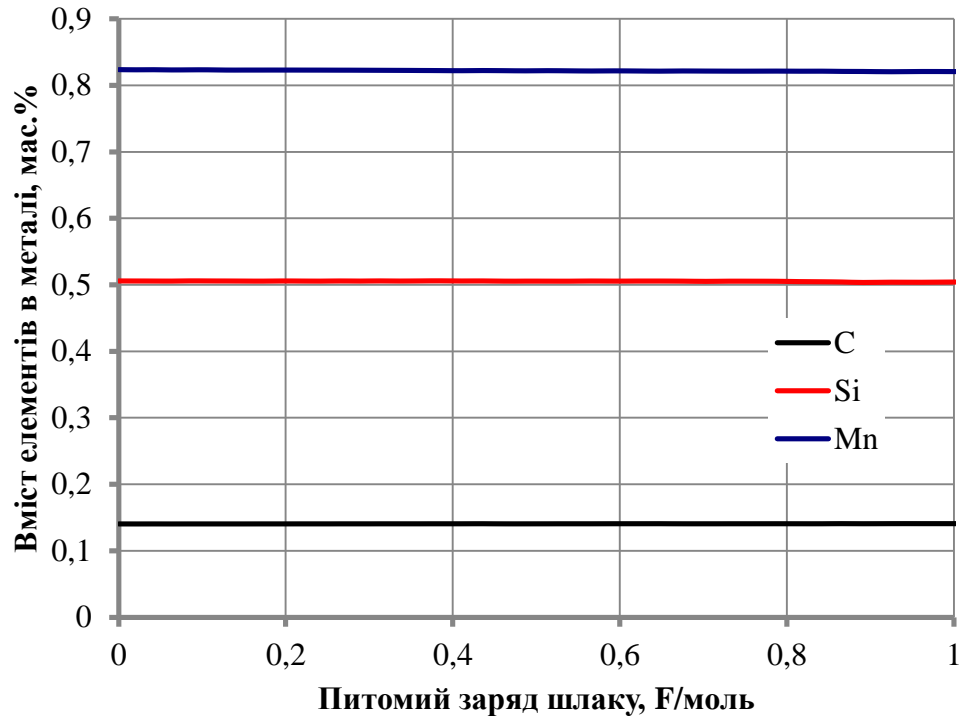
б)



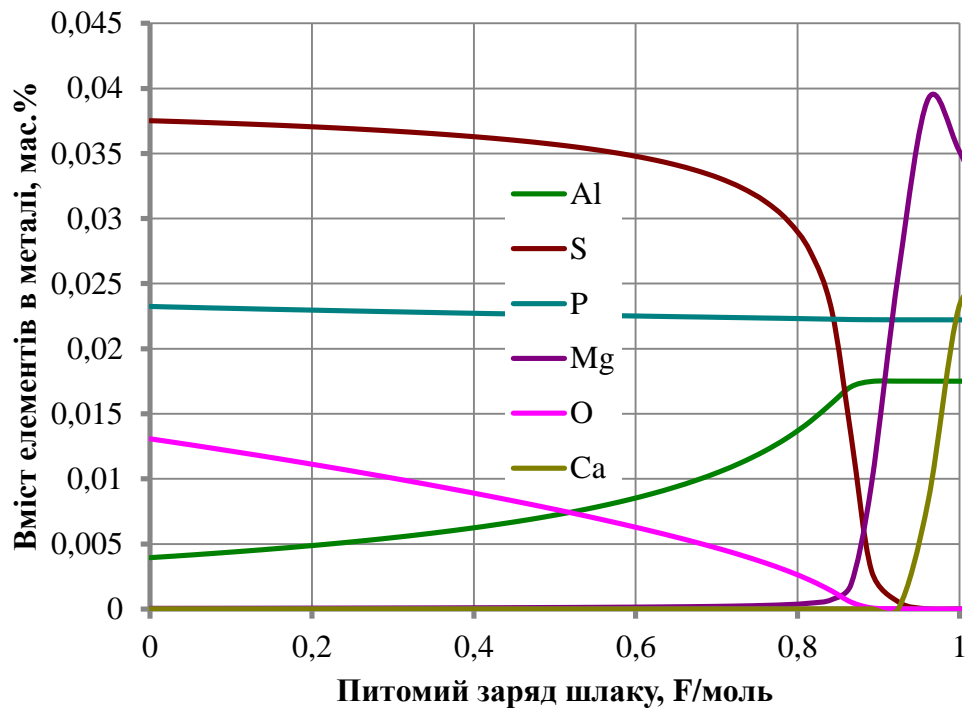
в)



г)

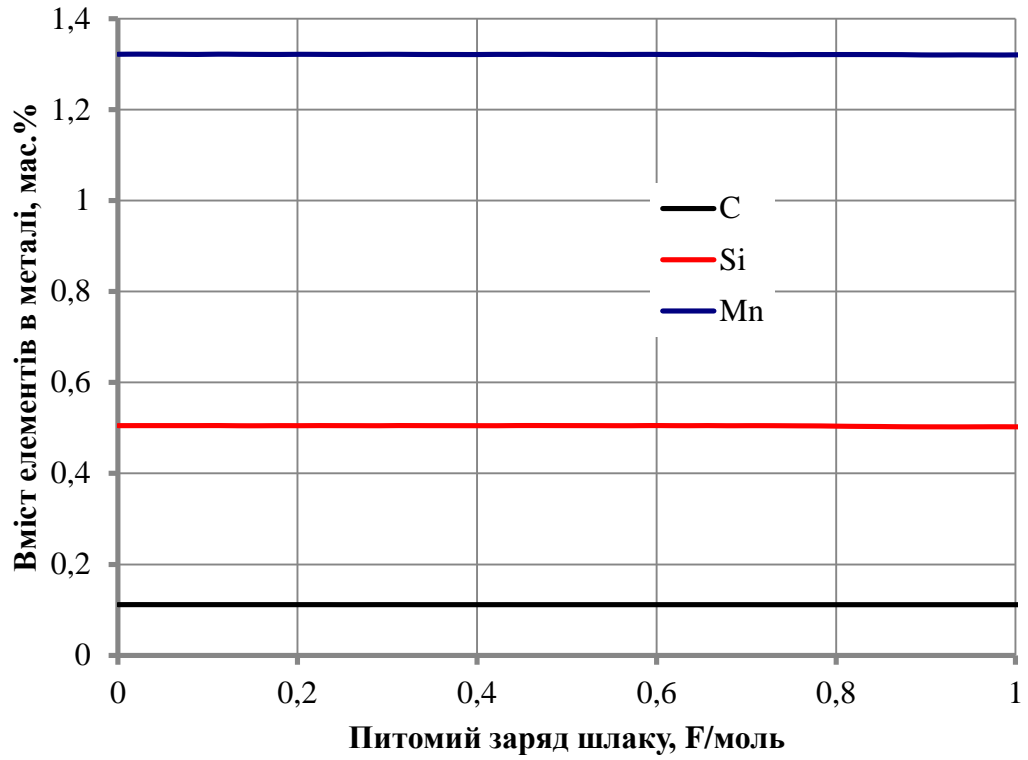


д)

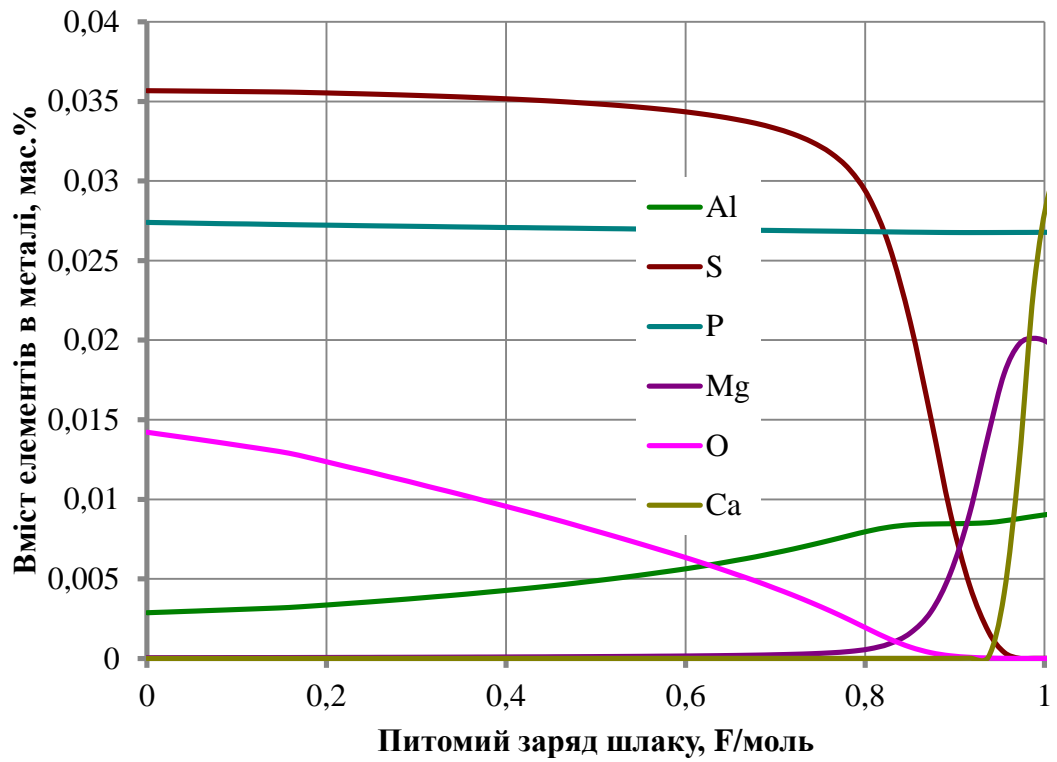


е)

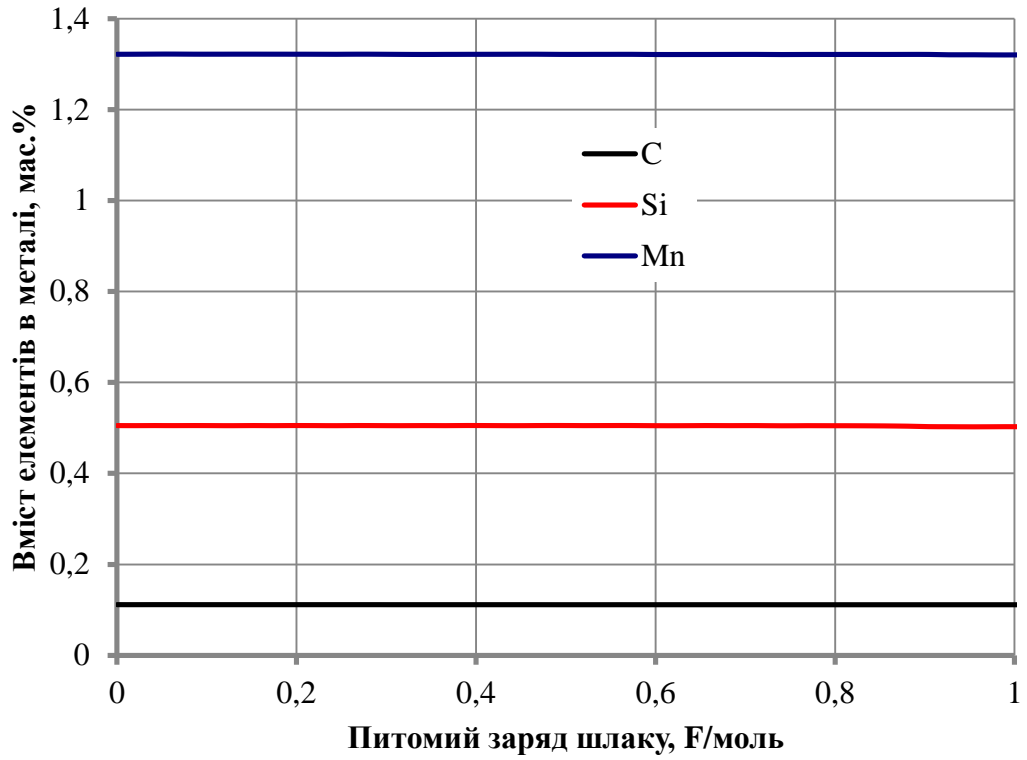
Рис 3.7 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 12MnSi4-3:
 вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



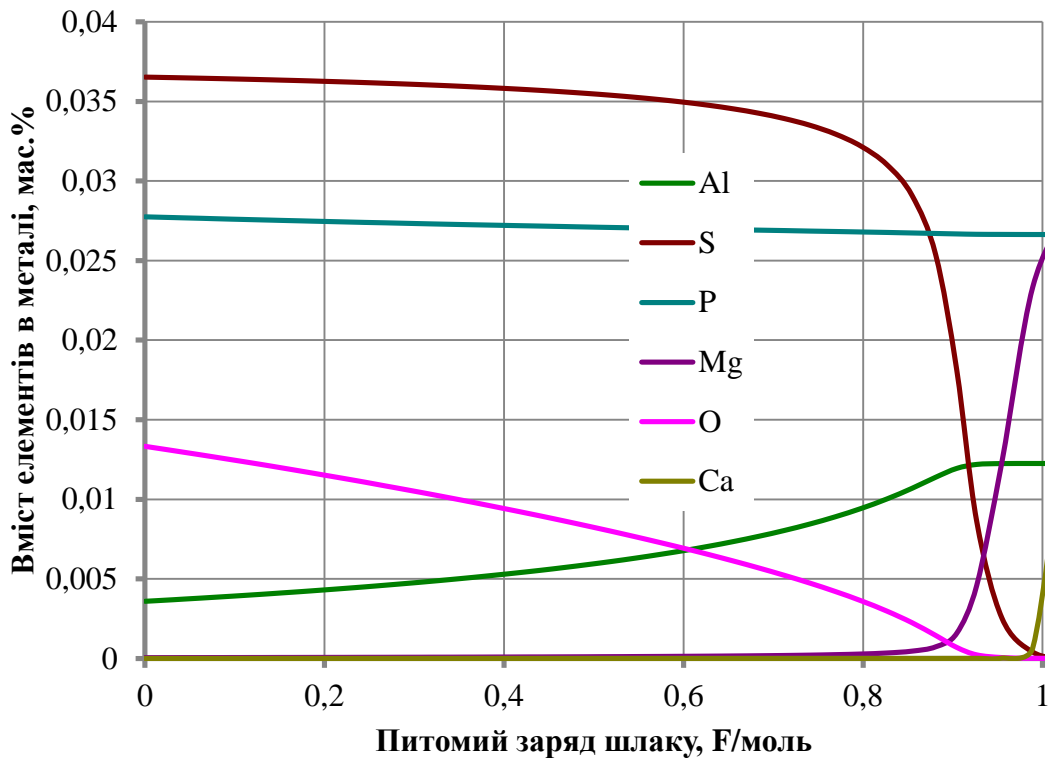
а)



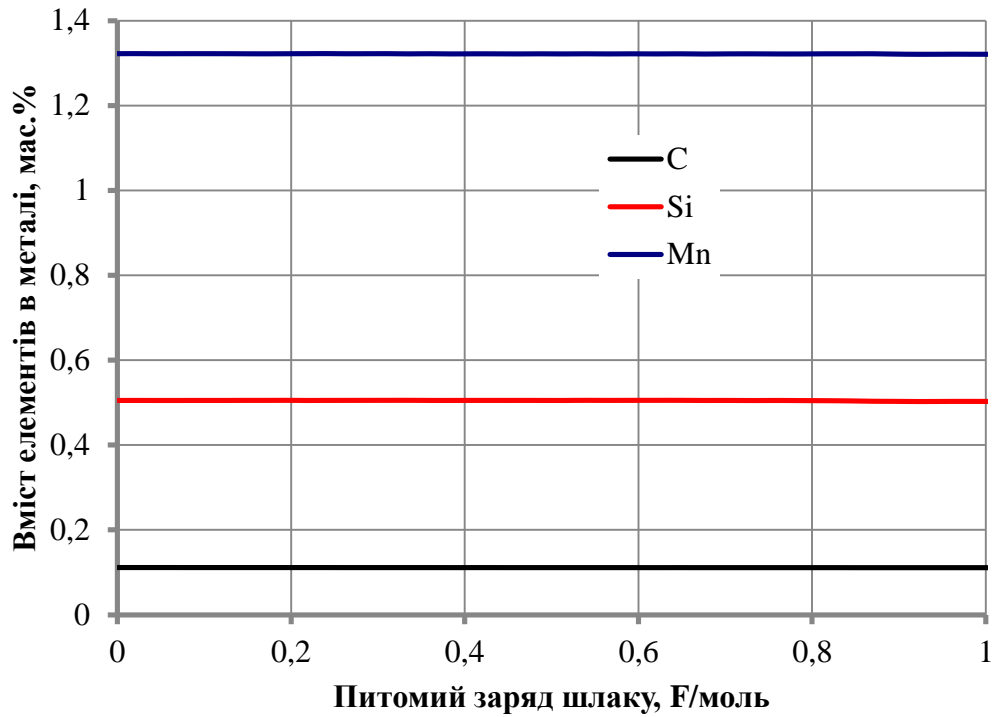
б)



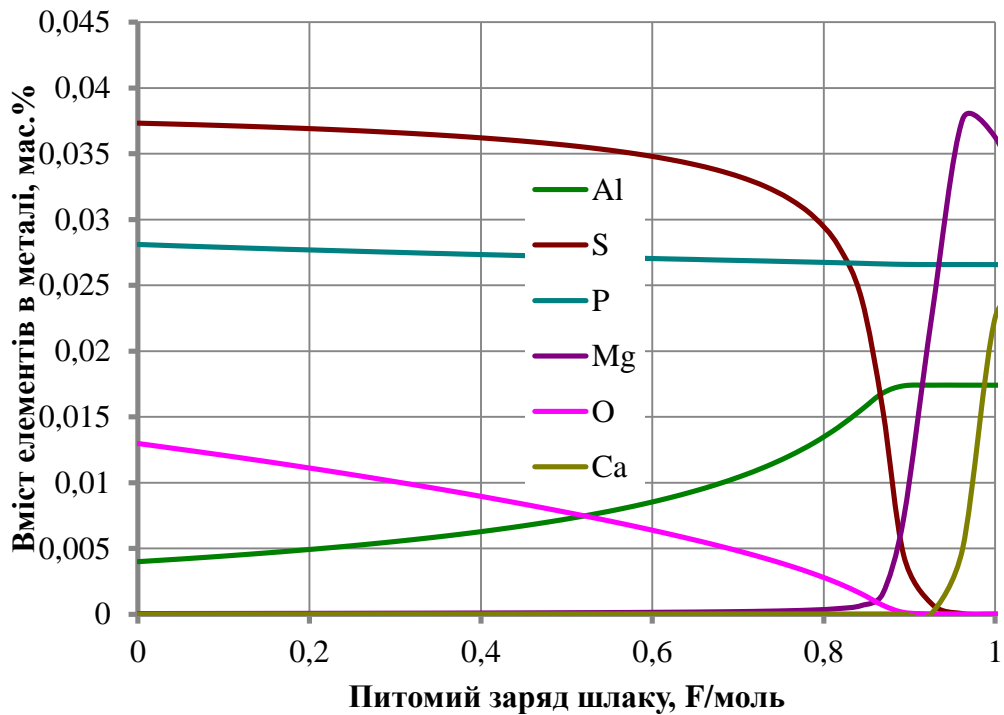
в)



г)



д)

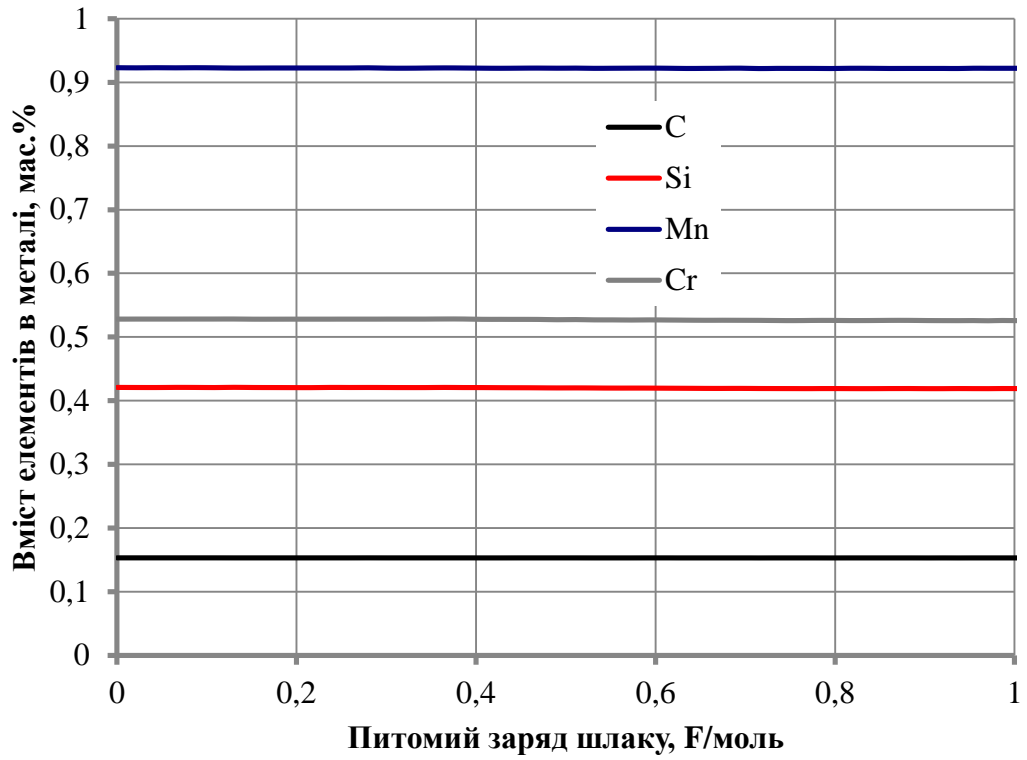


е)

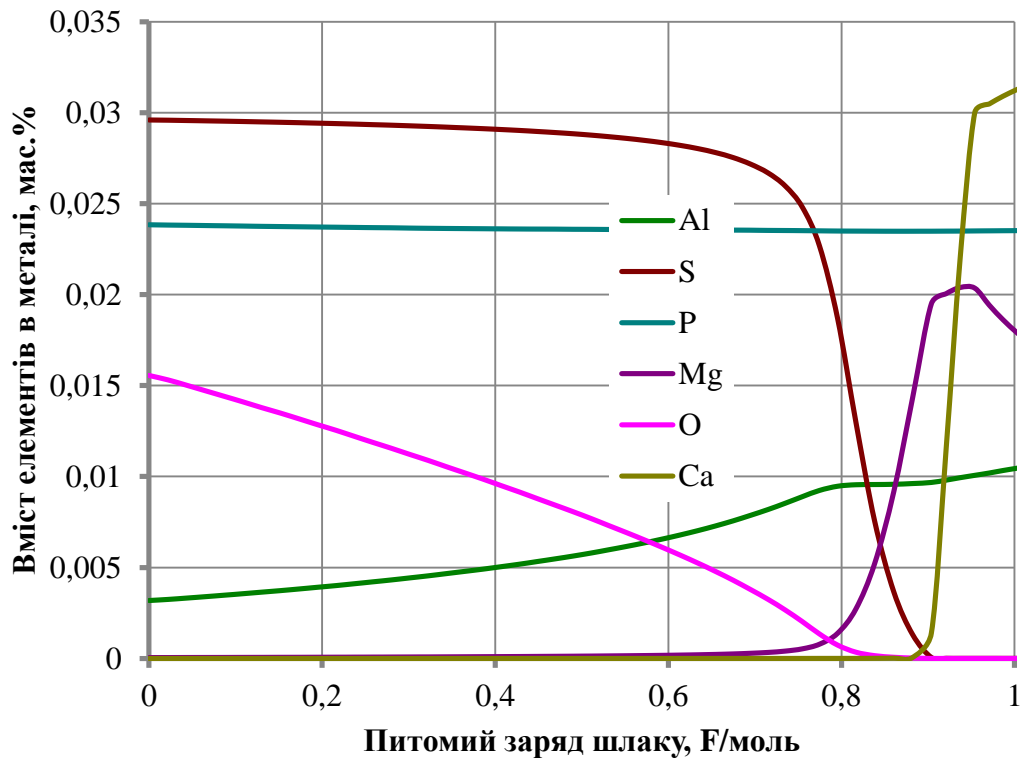
Рис 3.8 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі

9MnSi6-3:

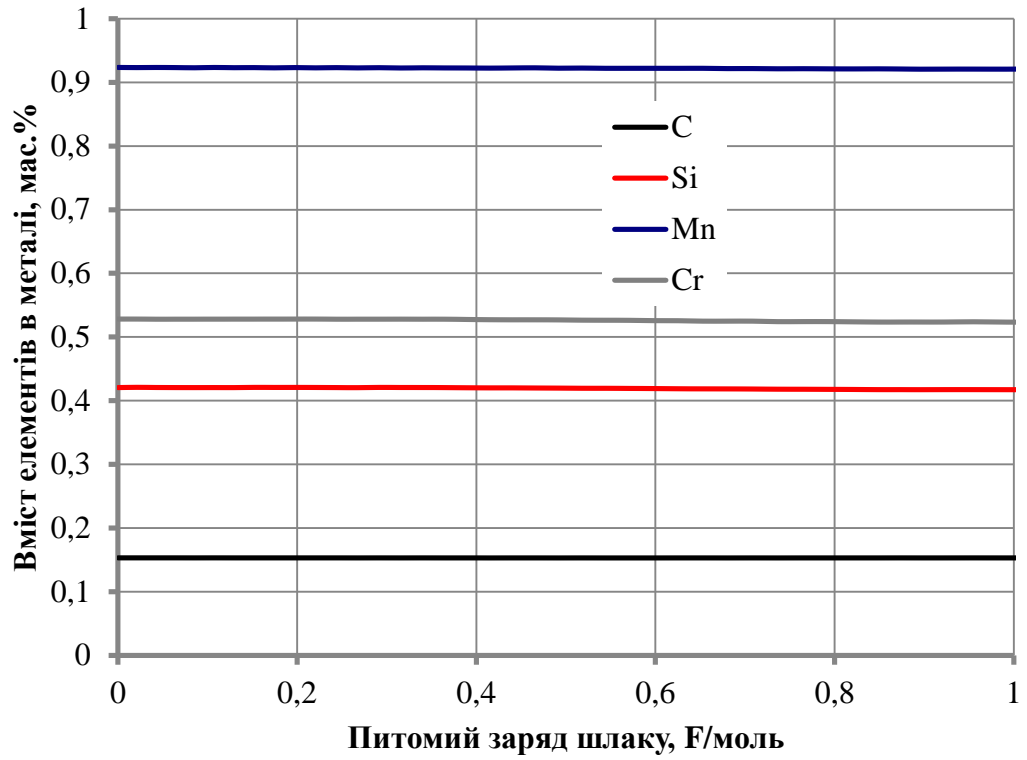
вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній,
магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



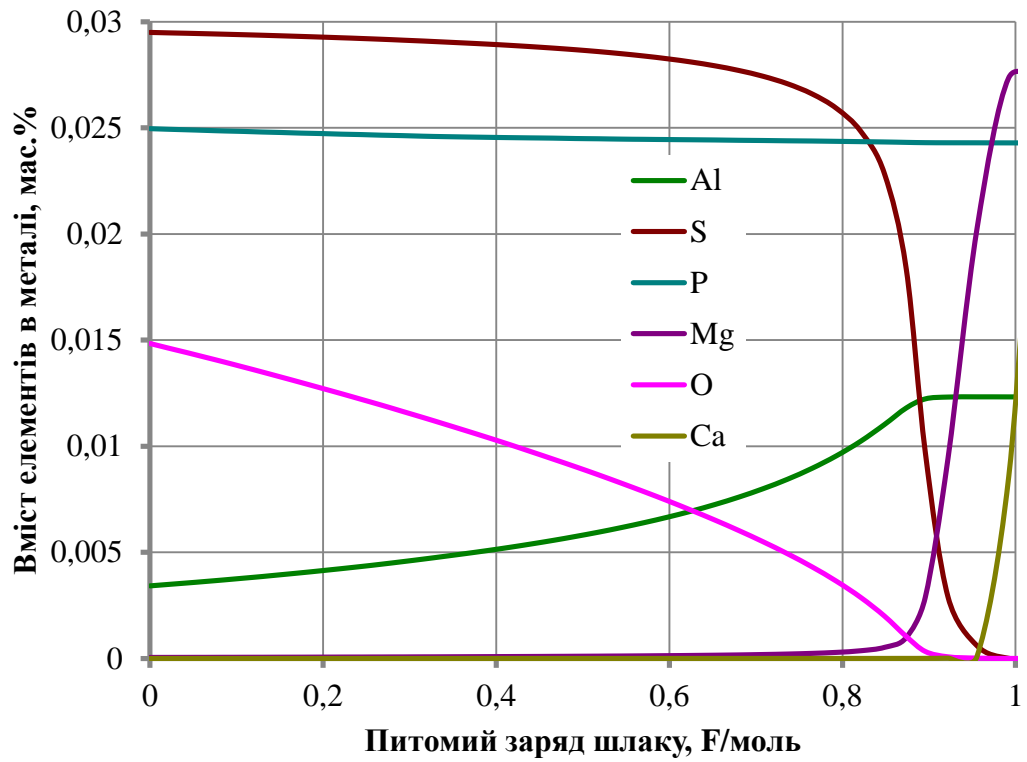
а)



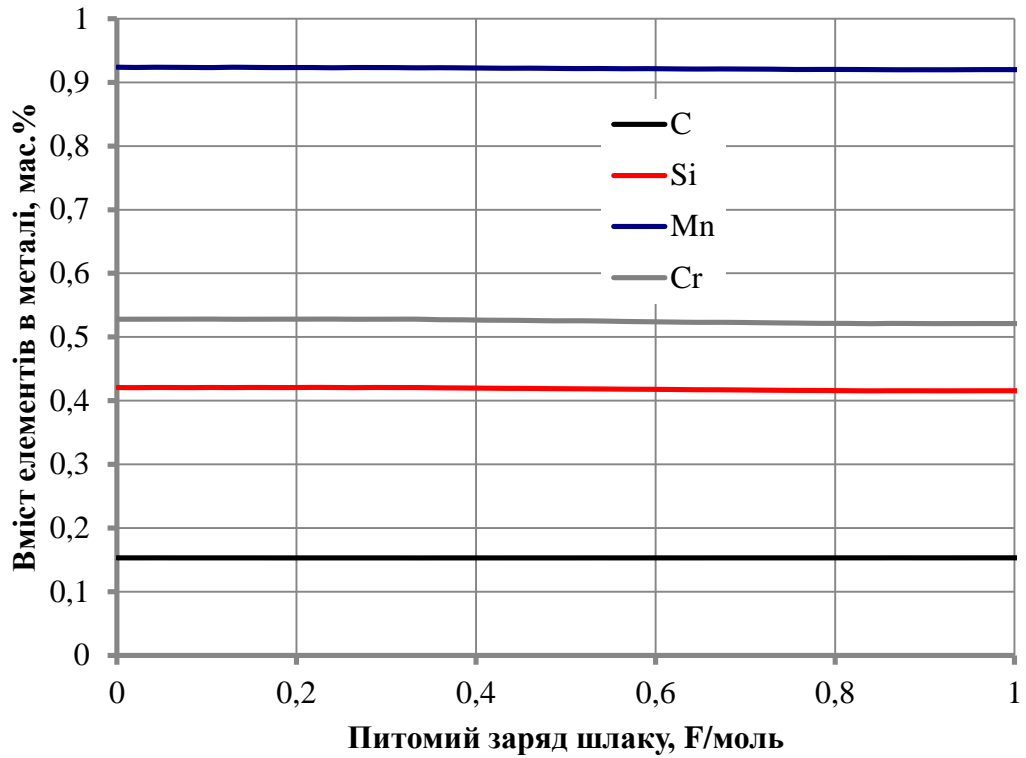
б)



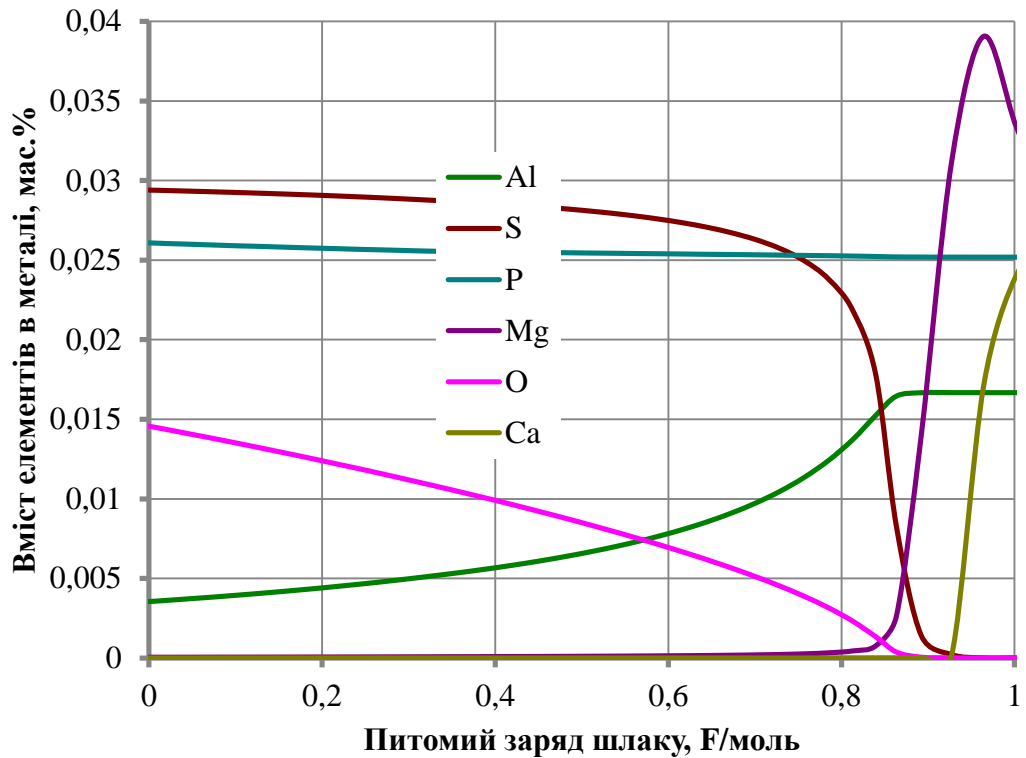
в)



г)

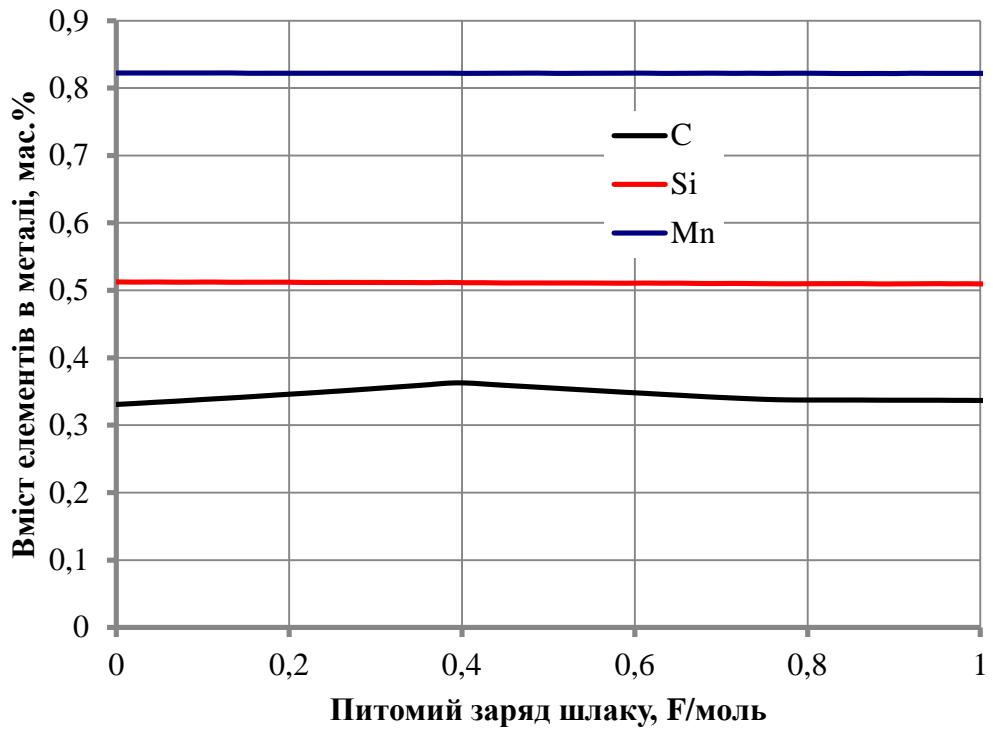


д)

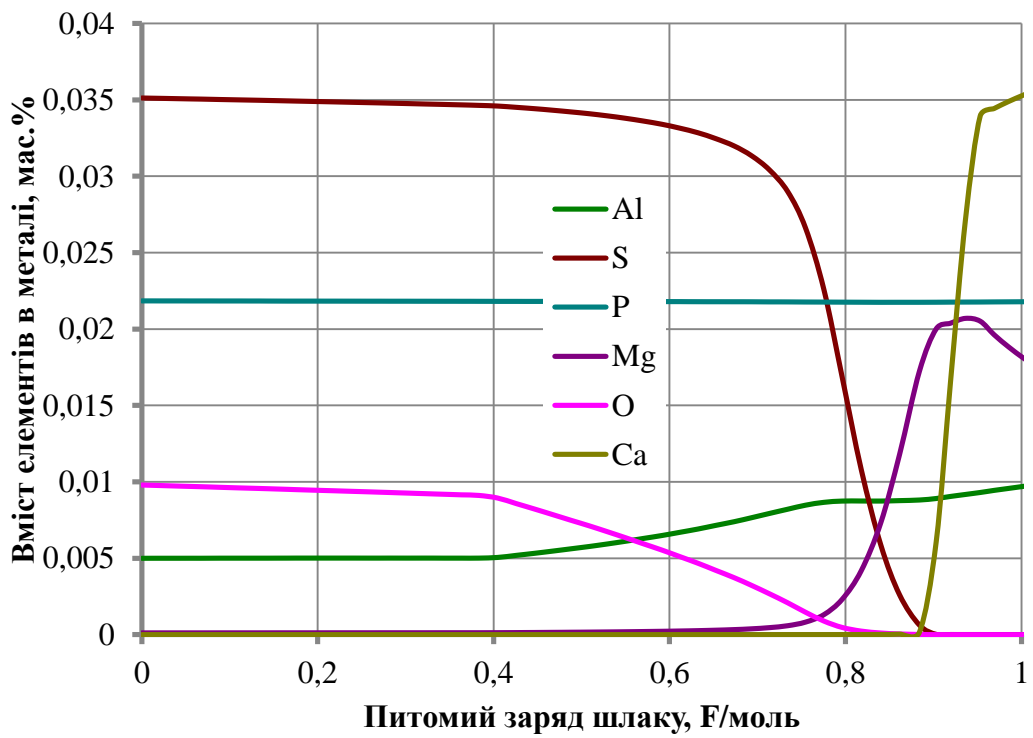


е)

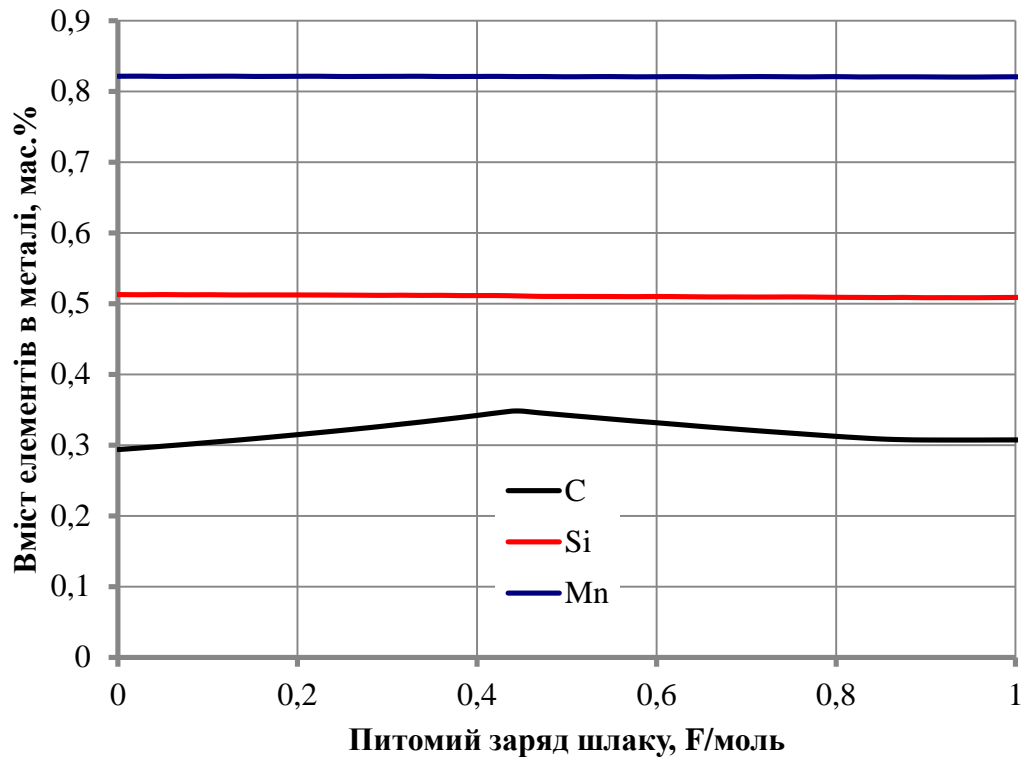
Рис 3.9 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 14MnCrSi4-3-2: кальцій,кіслород, кремній (а, в, д) ; залізо, марганець, алюміній, сірка, магній (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



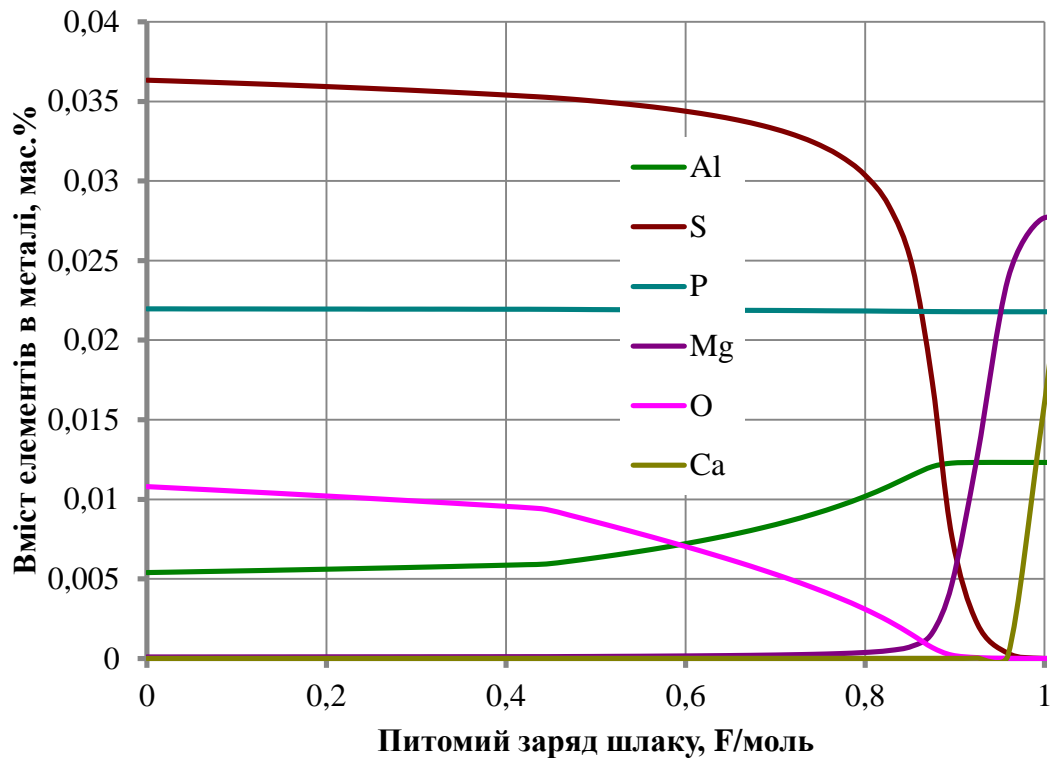
а)



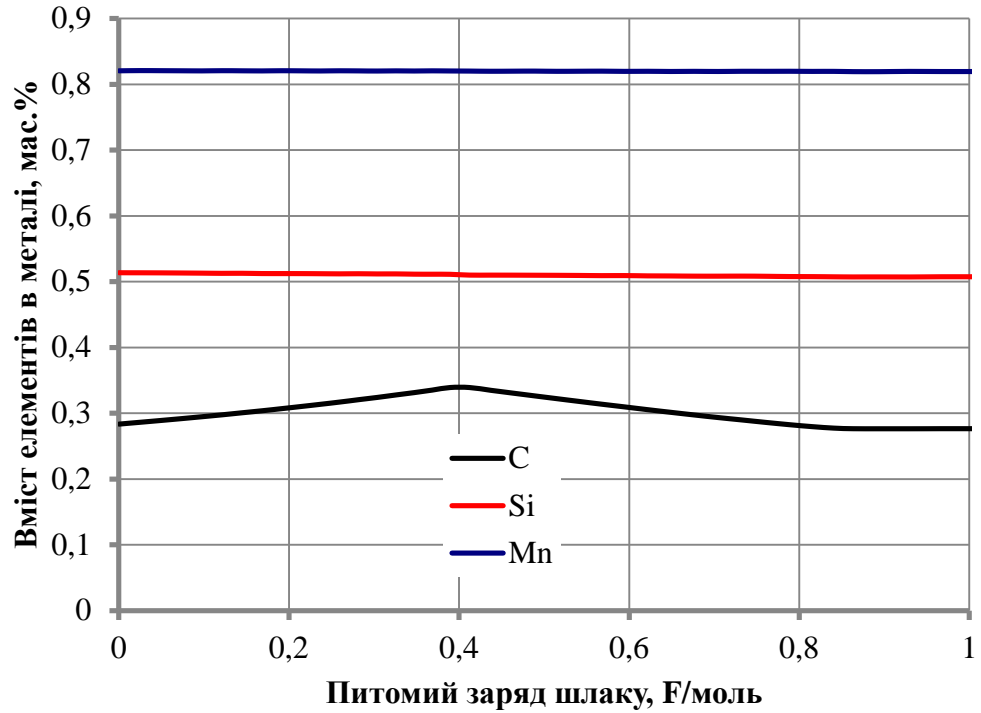
б)



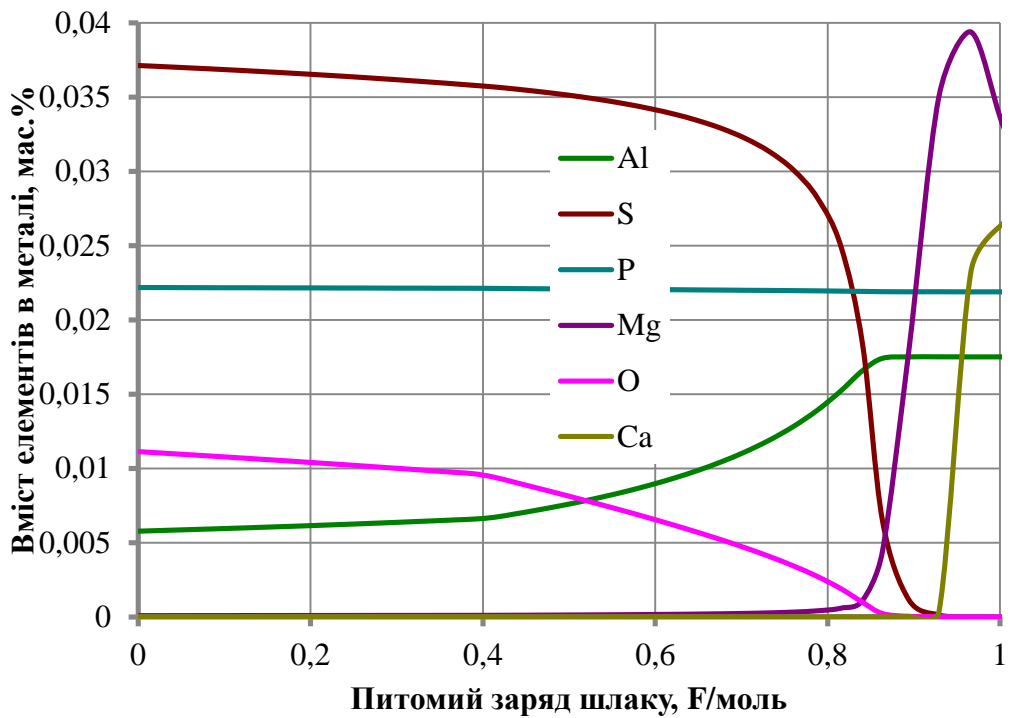
в)



г)



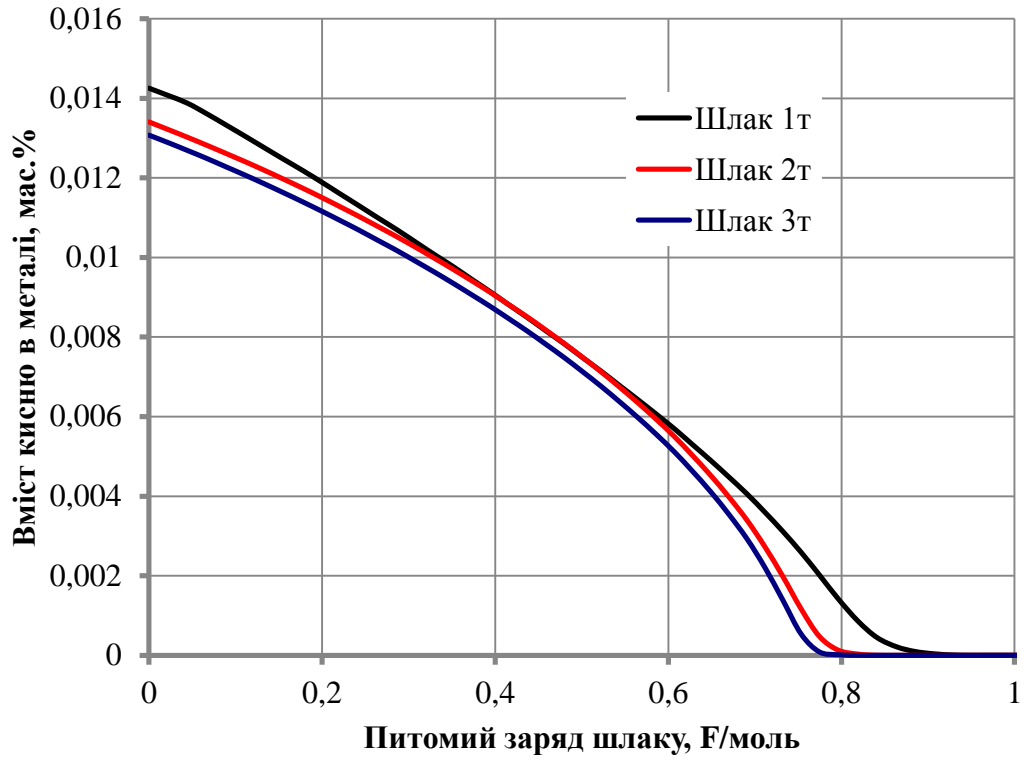
д)



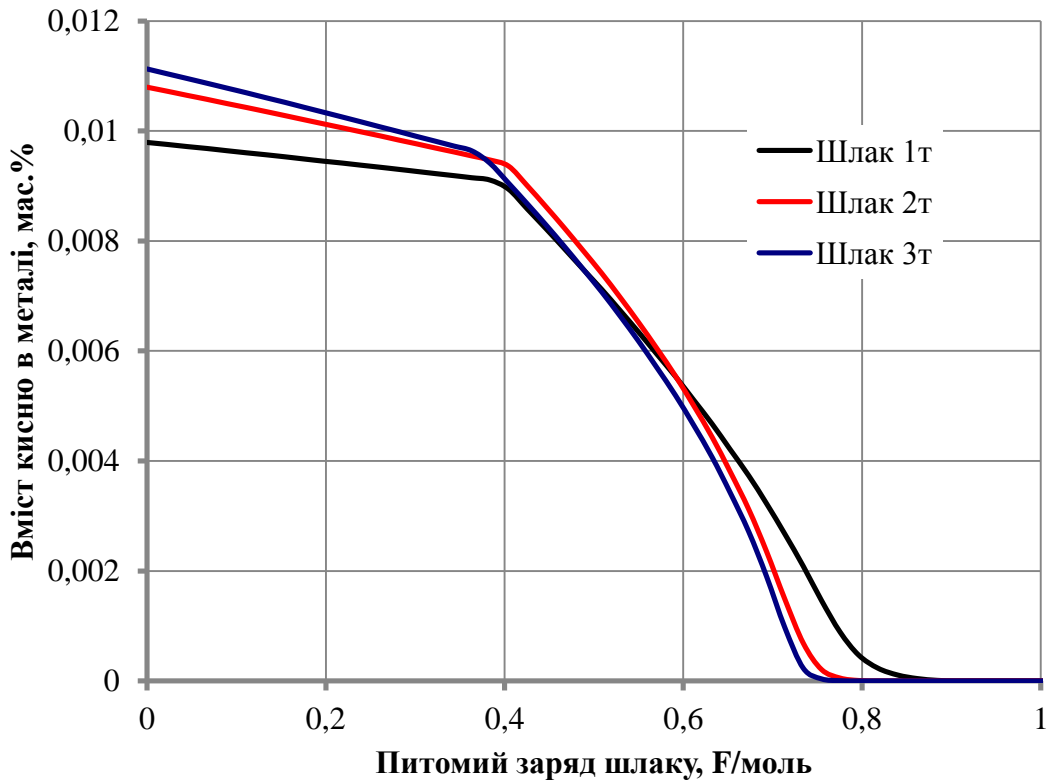
е)

Рис. 3.10 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 30MnSi4-3:

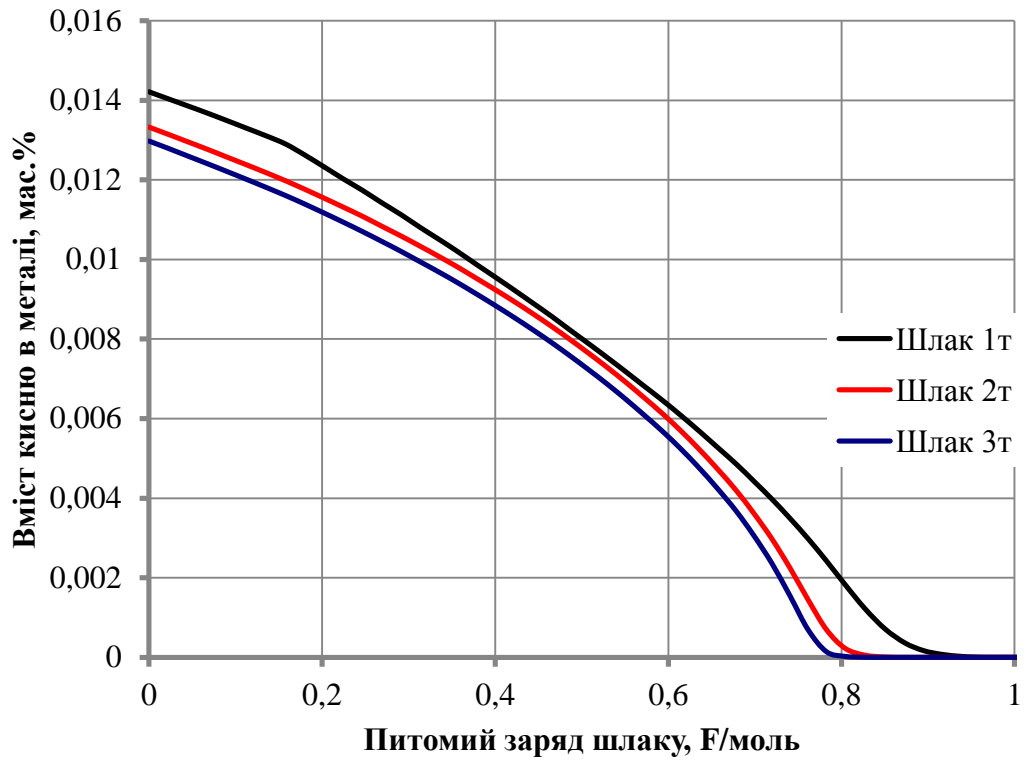
вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



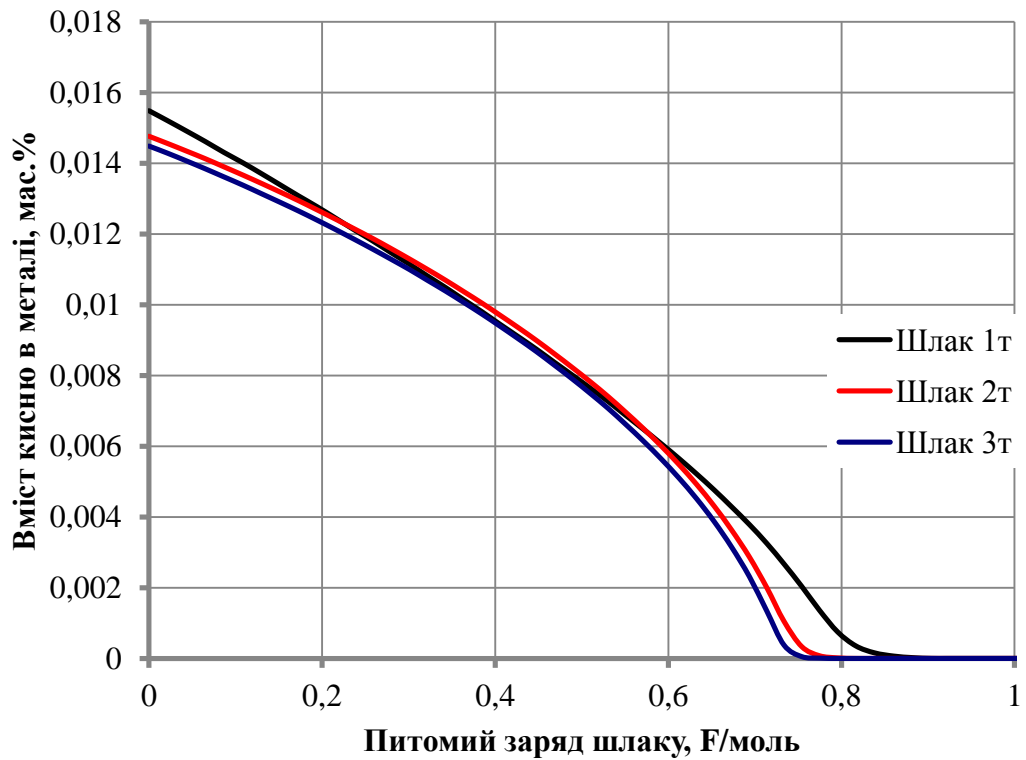
а)



б)



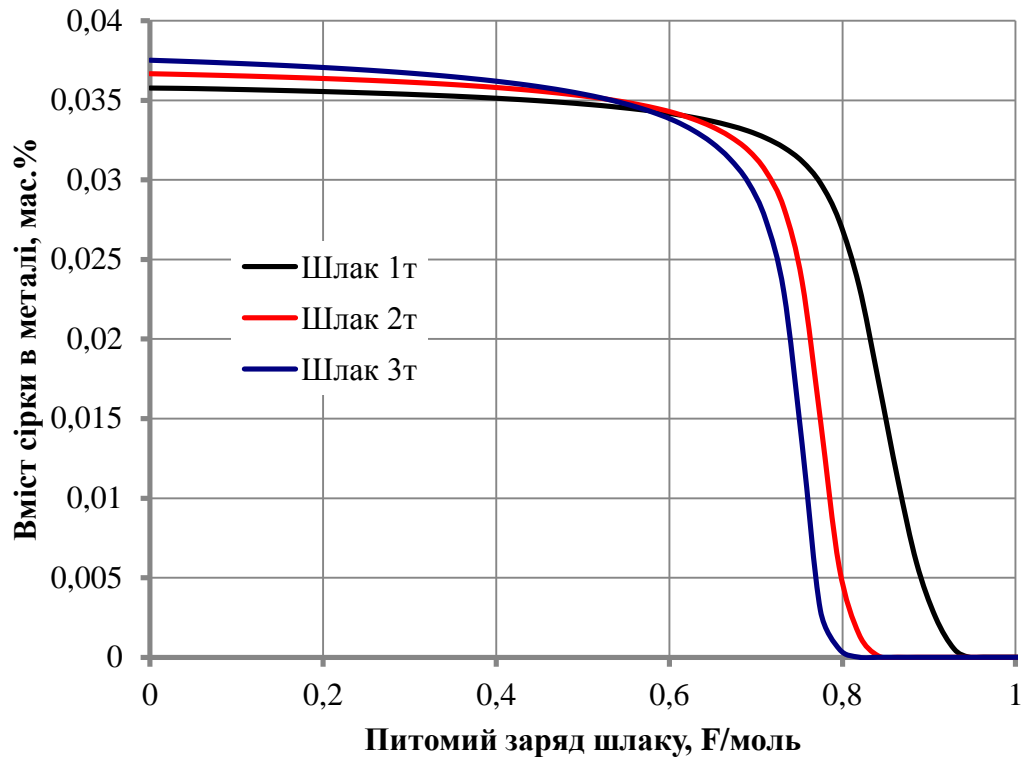
в)



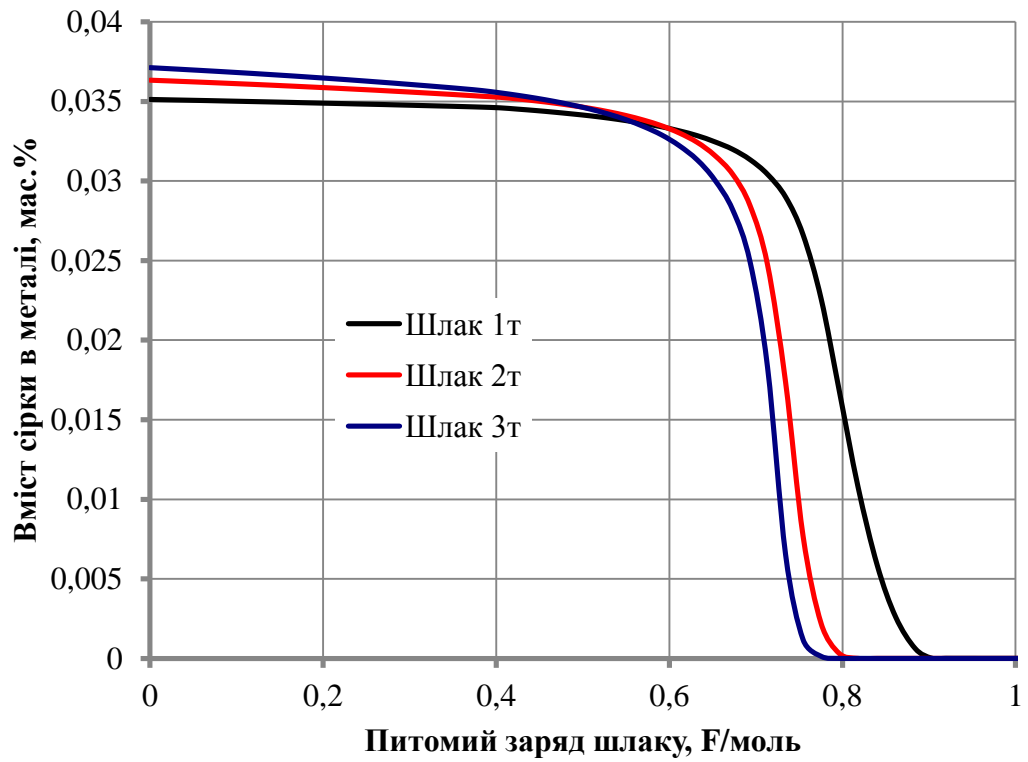
г)

Рис 3.11 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст кисню в сталі:

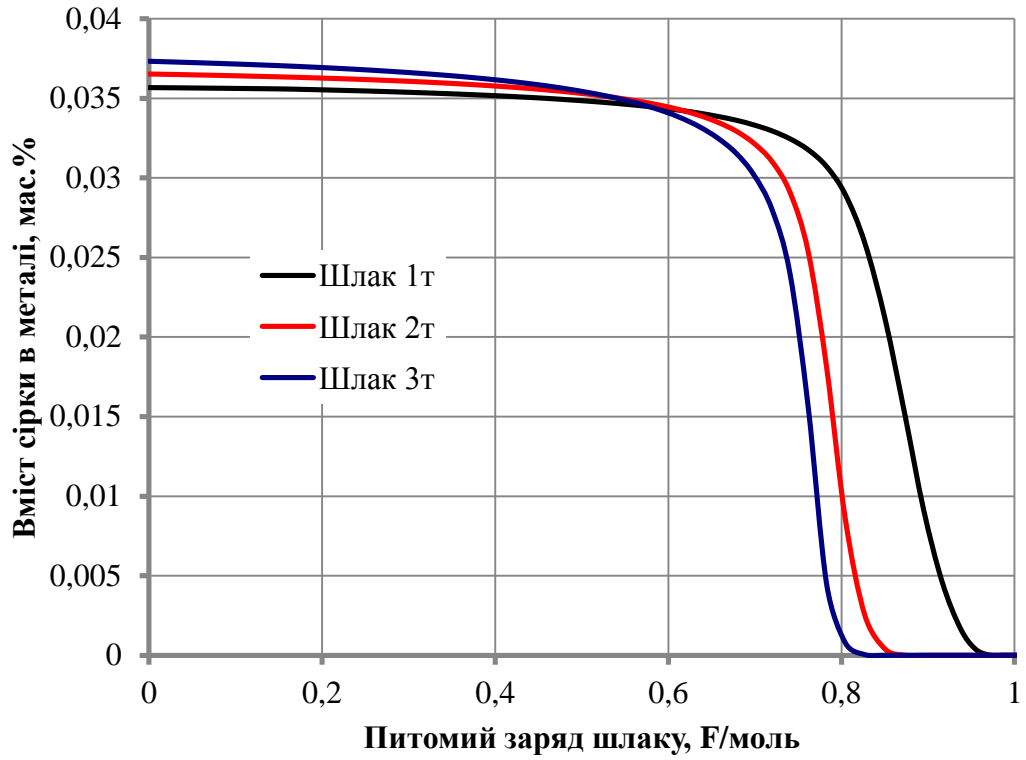
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2



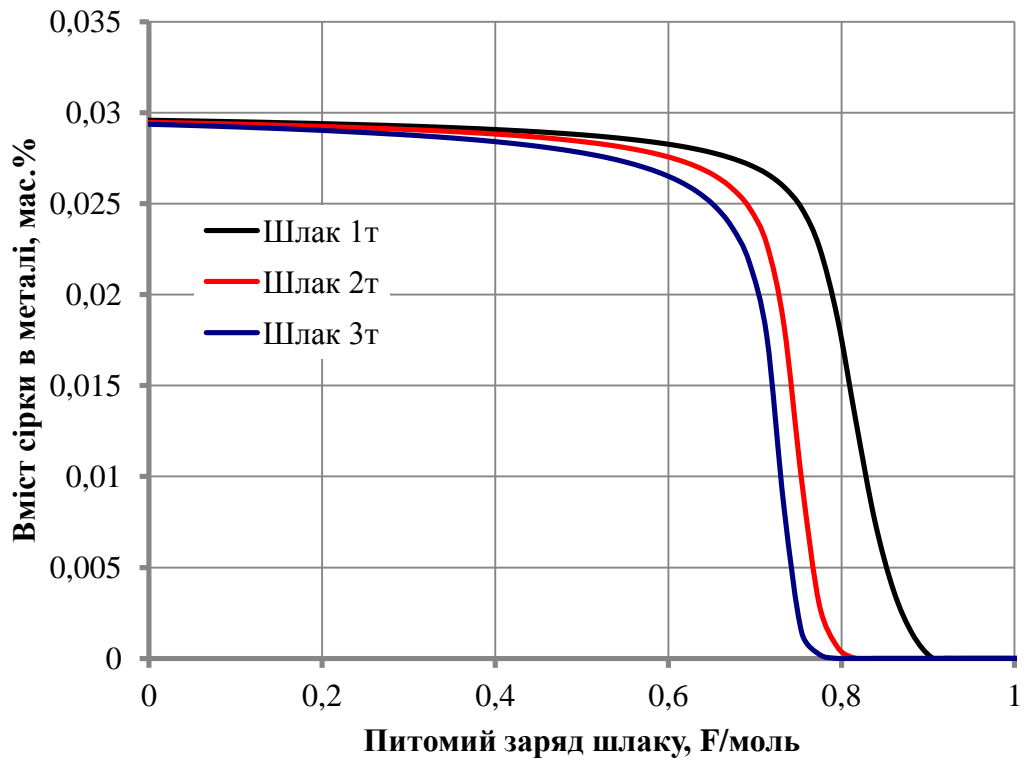
а)



б)



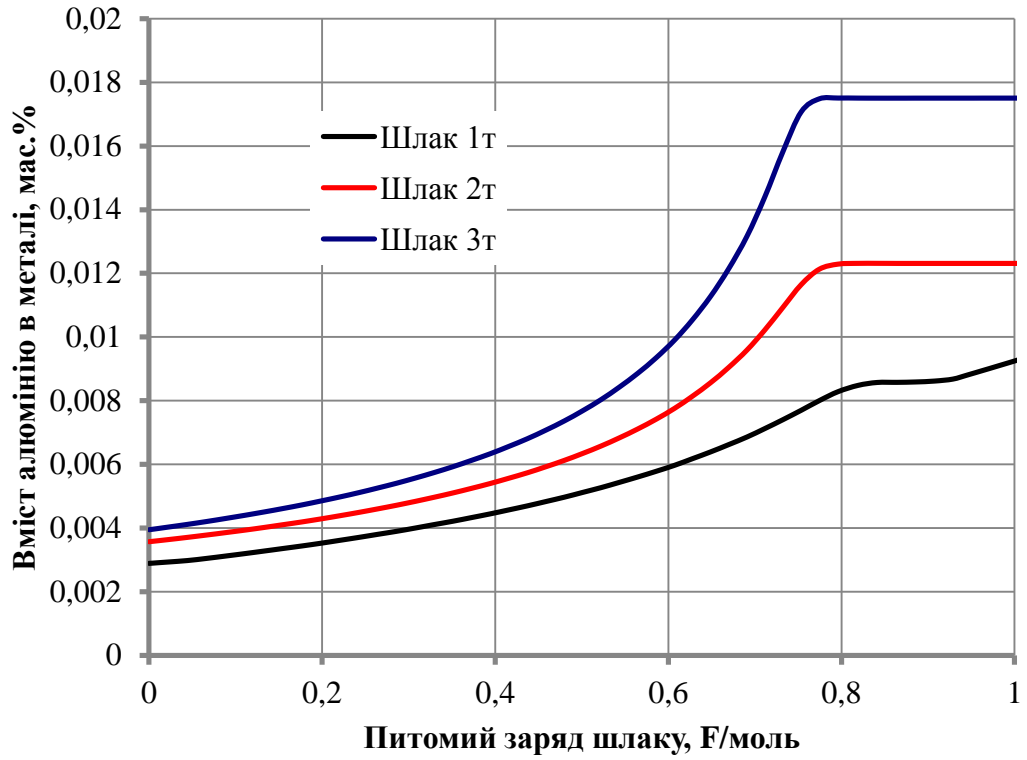
в)



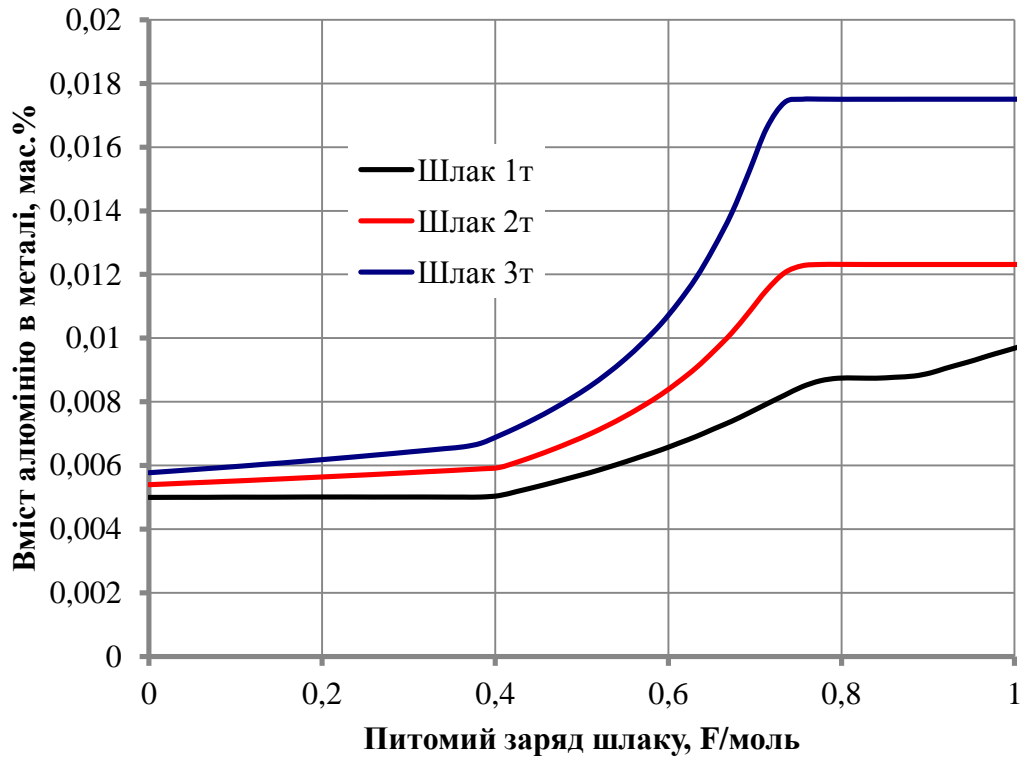
г)

Рис 3.12 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст сірки в сталі:

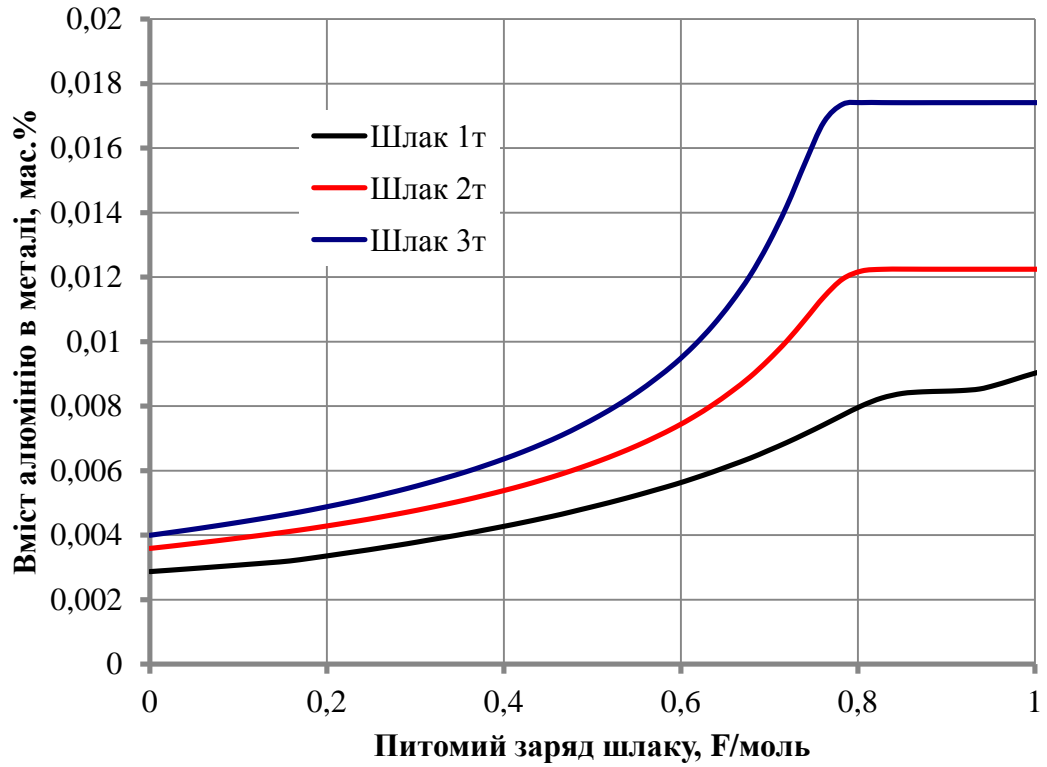
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2



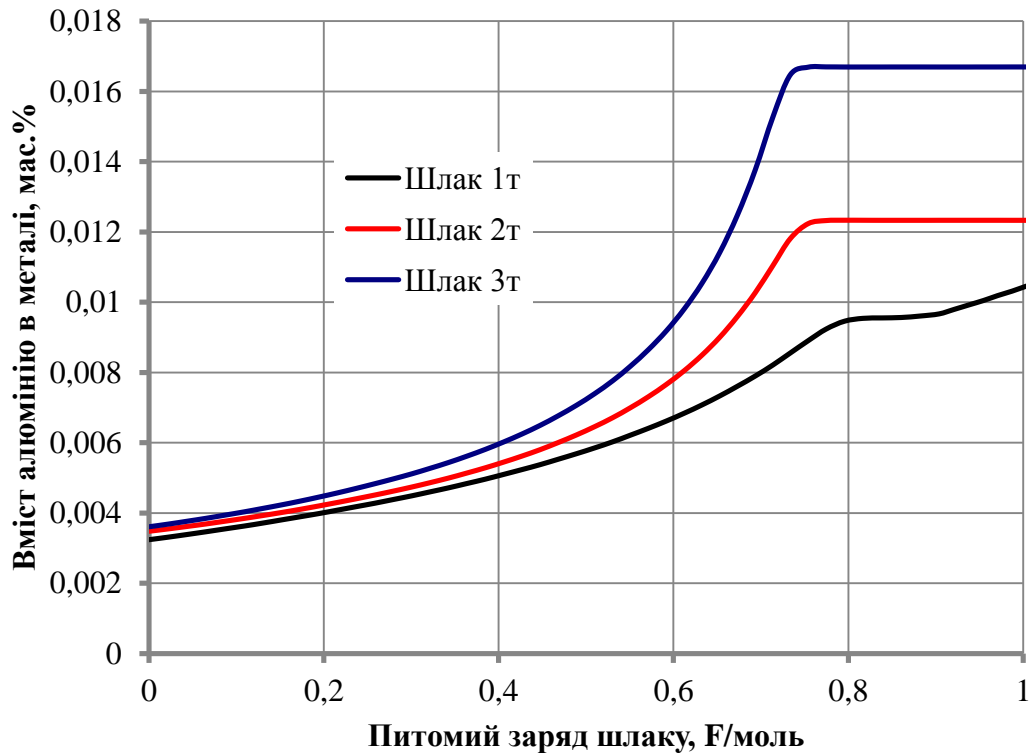
а)



б)



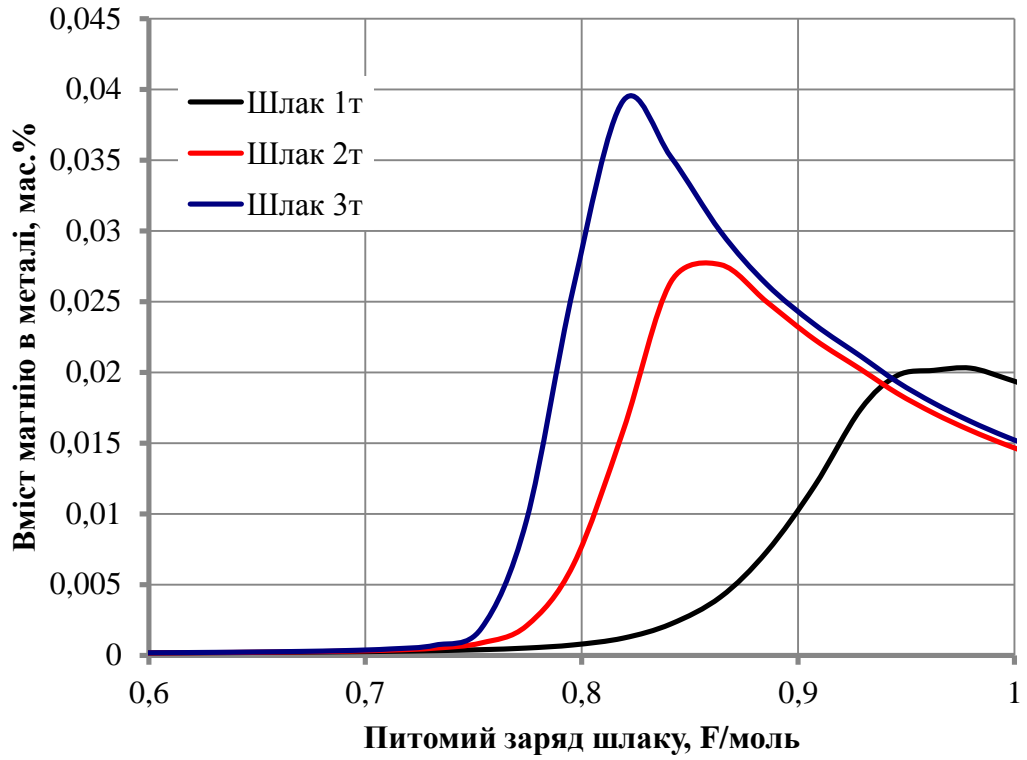
в)



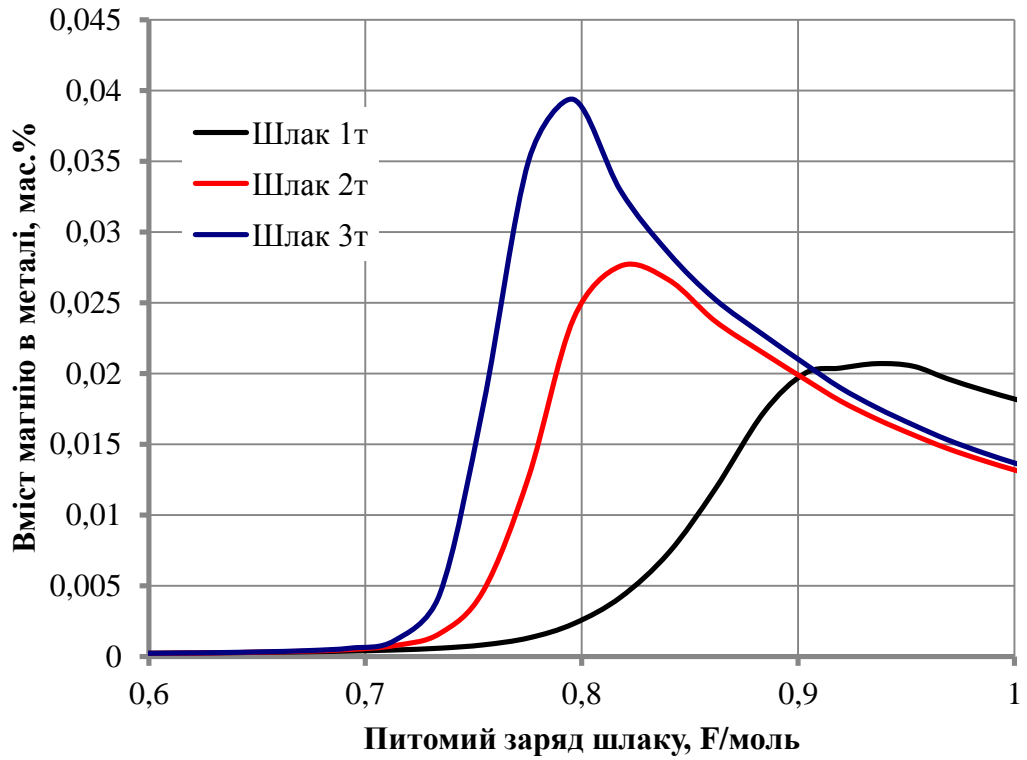
г)

Рис 3.13 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст алюмінію в сталі:

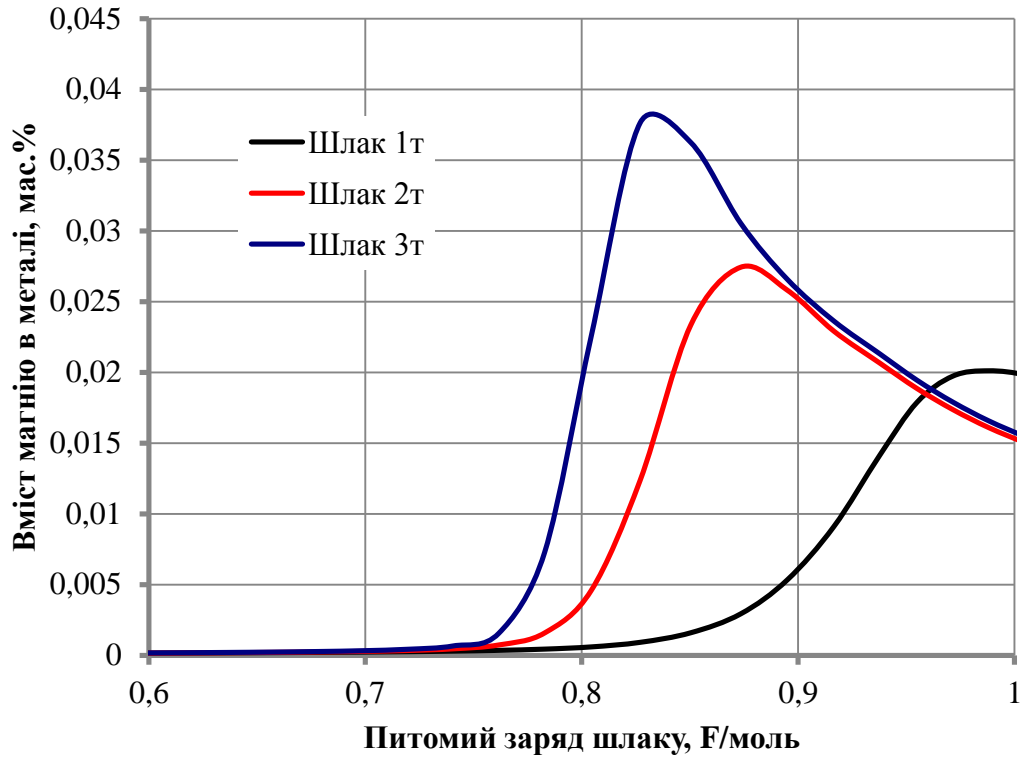
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2



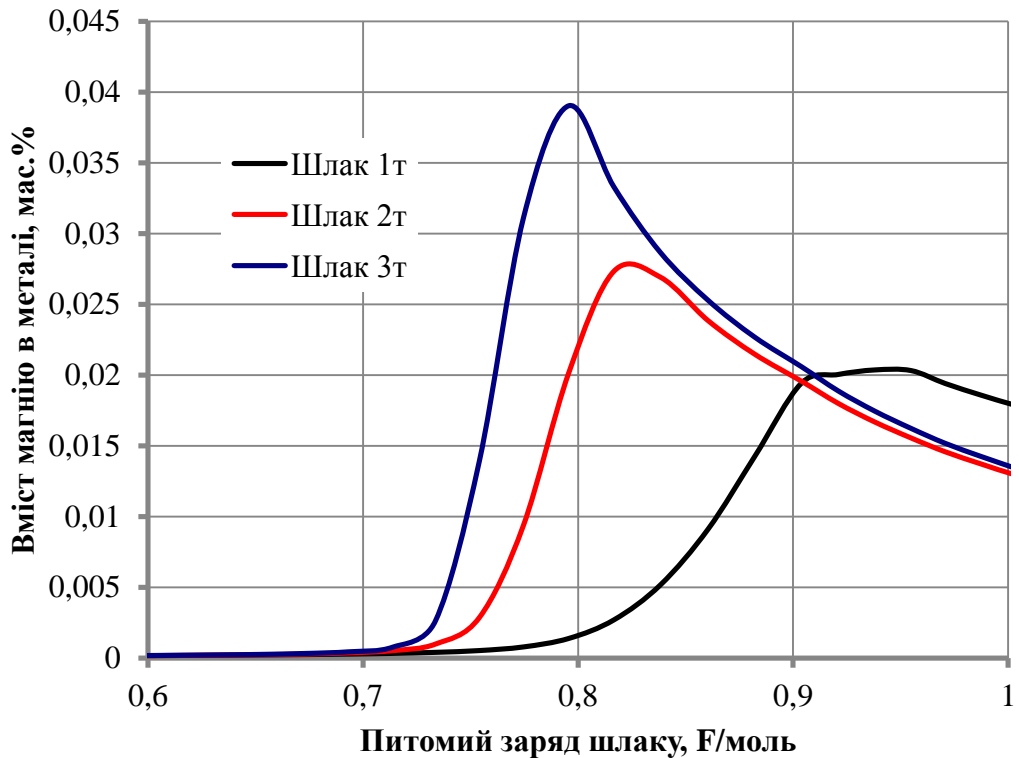
а)



б)



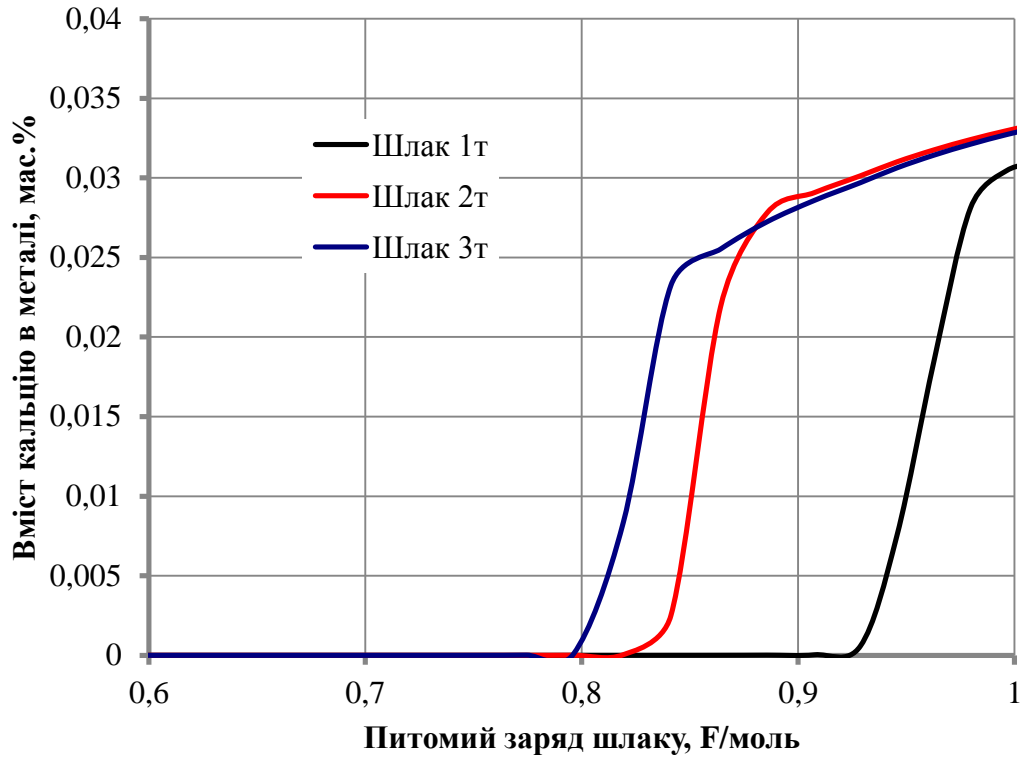
в)



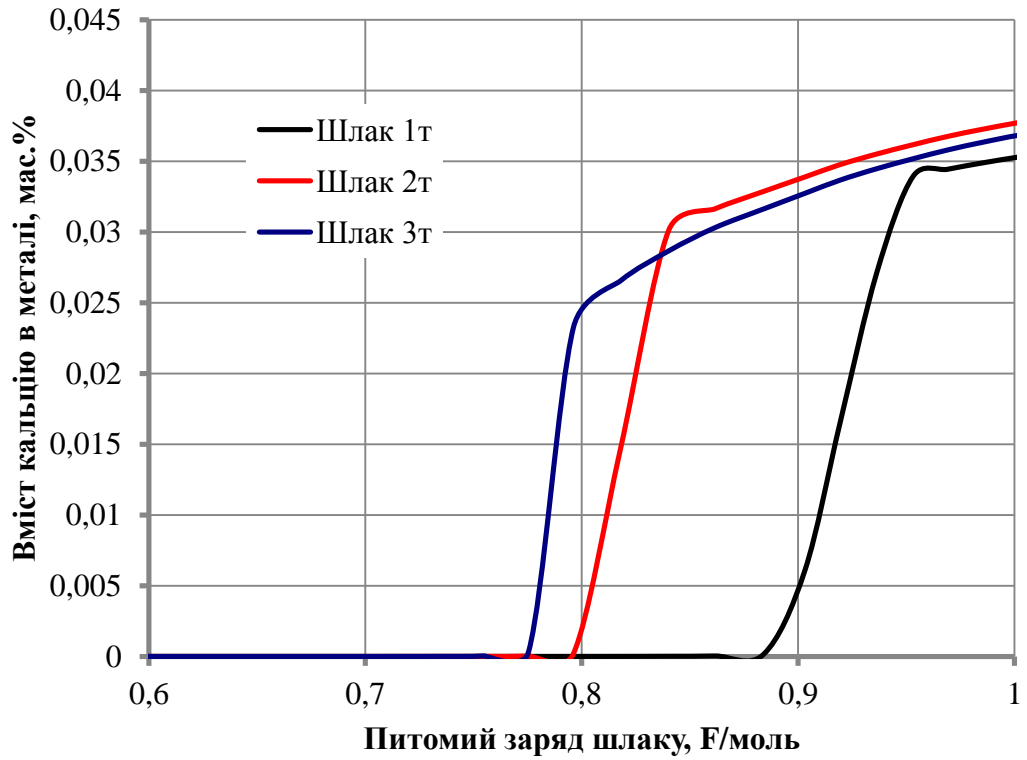
г)

Рис 3.14 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст магнію в сталі:

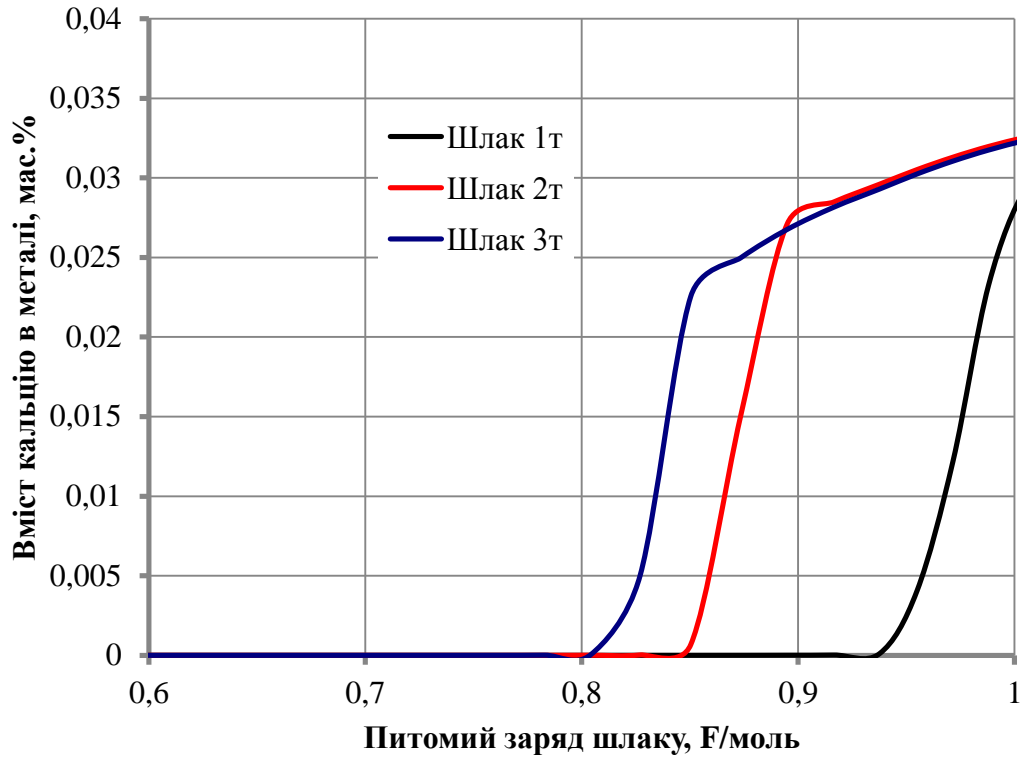
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2



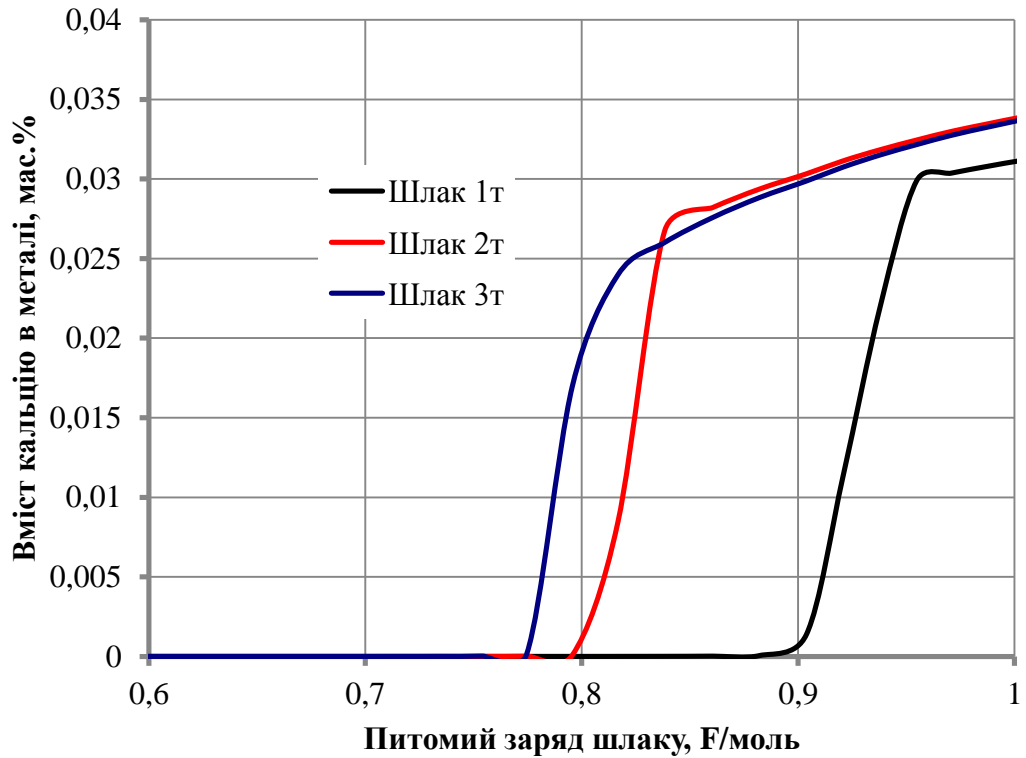
а)



б)



в)



г)

Рис 3.15 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст кальцію в сталі:

а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2

Дані, представлені на рис. 3.7–3.15 свідчать про те, що вміст сірки і кисню в сталі усіх марок системно знижується в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку. Слід зазначити, що для отримання наднизького рівня цих елементів в сталі має значення маса початкового шлаку. Чим більше маса шлаку, тим нижче рівень кисню і сірки при питомому заряді шлаку $\geq 0,8$ F/моль.

Концентрація кисню в середньому в 2,5 рази менше, ніж сірки, але зниження вмісту кисня відбувається повільніше на протязі усього досліджуваного інтервалу питомого заряду шлаку. Вміст сірки різко знижується при досягненні питомого заряду шлаку 0,8 F/моль. Отримані дані вказують на те, що теоретично вміст сірки і кисню може бути дуже малим, але, зважуючи на кинетику процесу і інтенсивне газоутворення при високих рівнях питомого заряду шлаку, можна припустити, що процес не досягає рівноваги за розумний проміжок часу. Експериментальні дані і дані кінетичного моделювання, отримані раніше [15; 16], підтверджують це припущення.

Вміст алюмінію повільно зростає з рівня 0,003% до досягнення питомого заряду шлаку 0,9 F/моль і сягає максимального рівня 0,015-0,017 %. Втім більшу концентрацію алюмінію в сталі можна отримати, збільшуючи вміст оксиду алюмінію в шлаку.

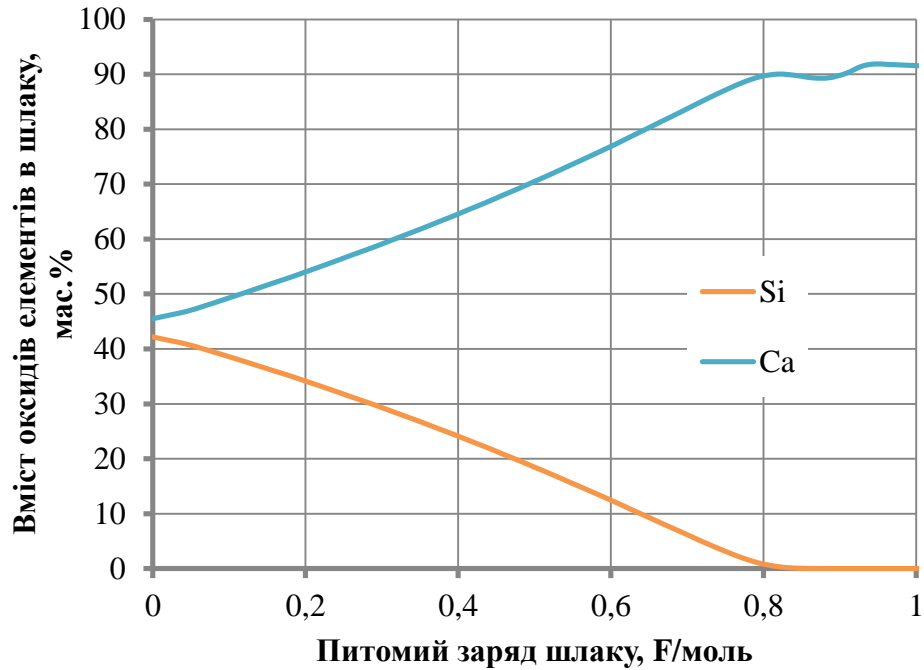
Вміст кальцію і магнію в сталі різко зростає після досягнення питомого заряду шлаку 0,8-0,9 F/моль, коли починається інтенсивне газоутворення. Початок зростання вмісту цих елементів залежить також від маси шлаку: чим більше маса шлаку, тим менший заряд шлаку потрібен для зростання їх концентрації в металі.

Вміст вуглецю, кремнію, марганцю і хрому практично не змінюється, адже їх незмінний рівень обумовлений оптимізацією витрати феросплавів з урахуванням дозволених інтервалів відповідно до стандартів.

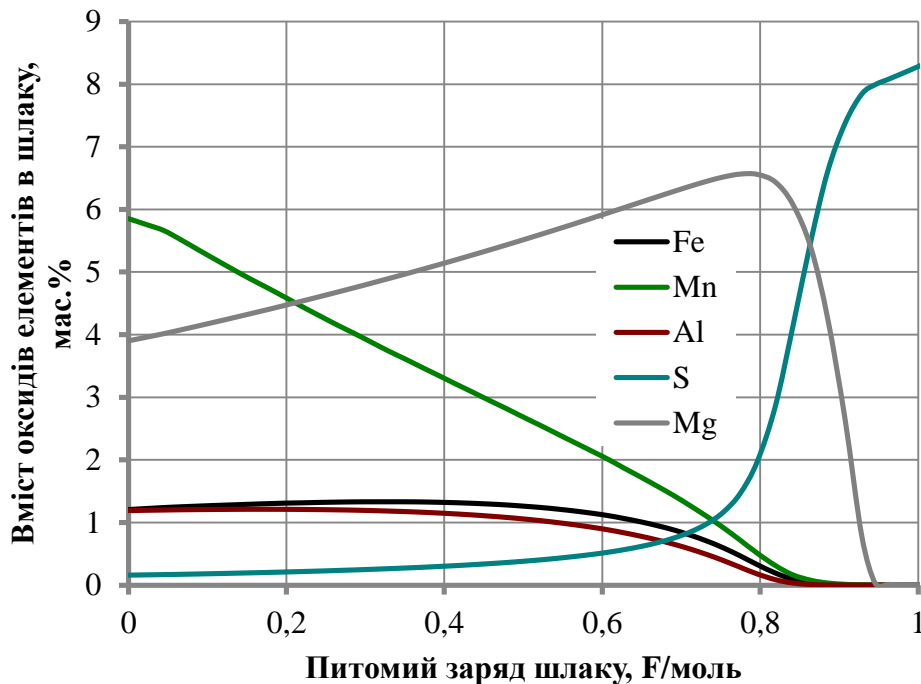
Вміст фосфору в досліджуваних сталях практично не змінюється.

3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку

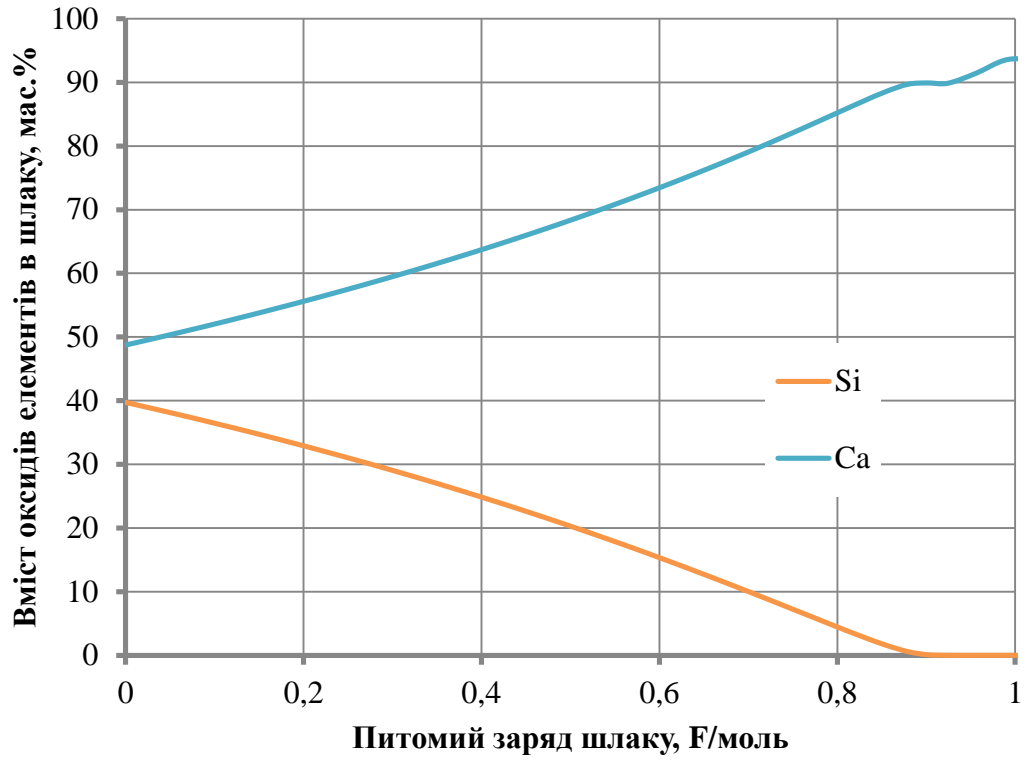
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку (окрім сірки). На рисунках 3.16–3.23 наведено відповідні результати розрахунків.



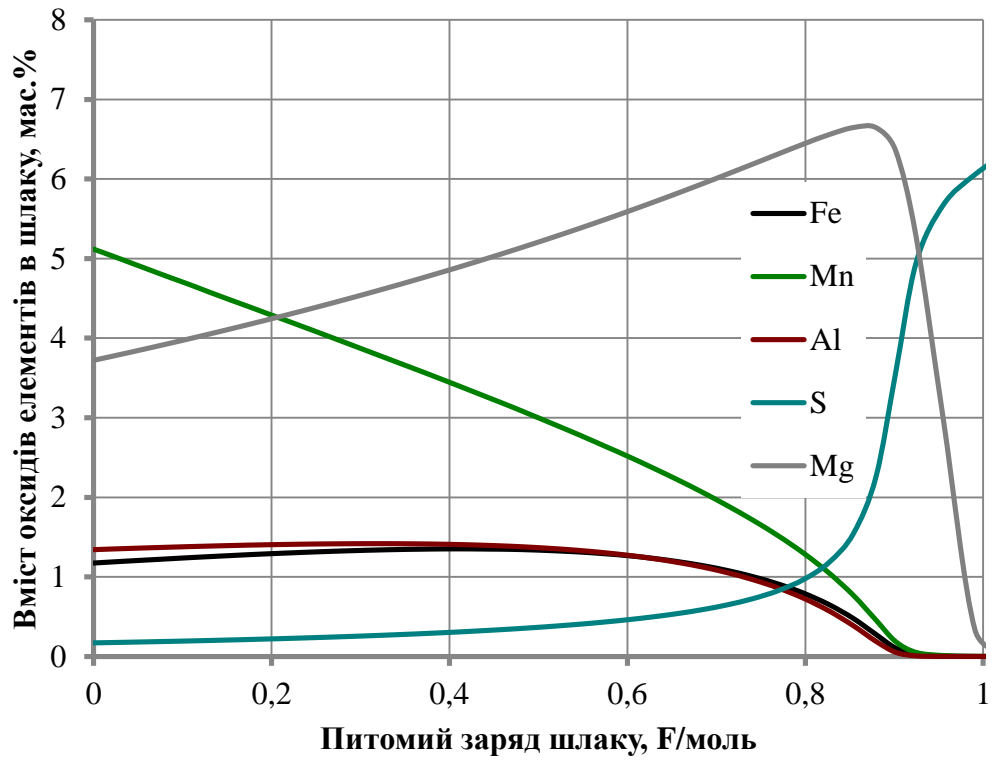
а)



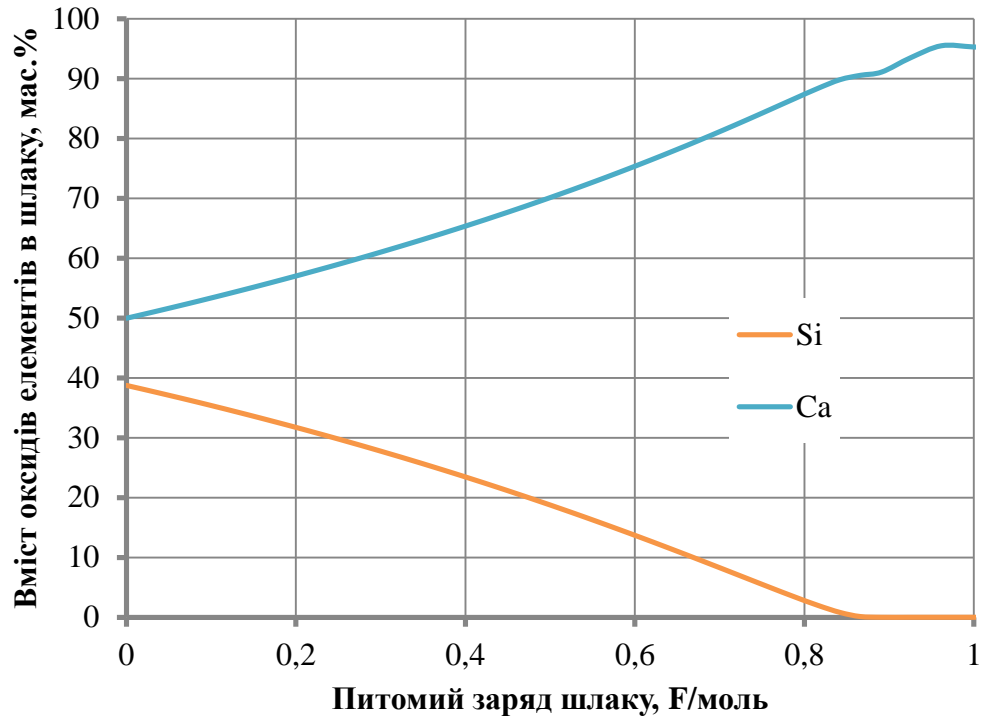
б)



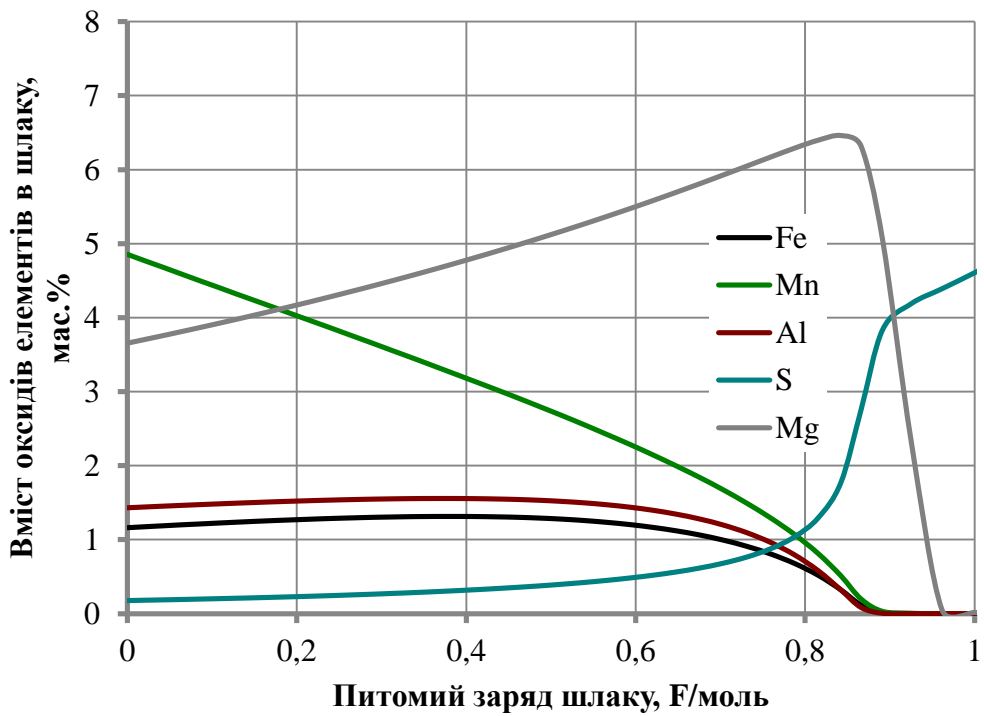
в)



г)

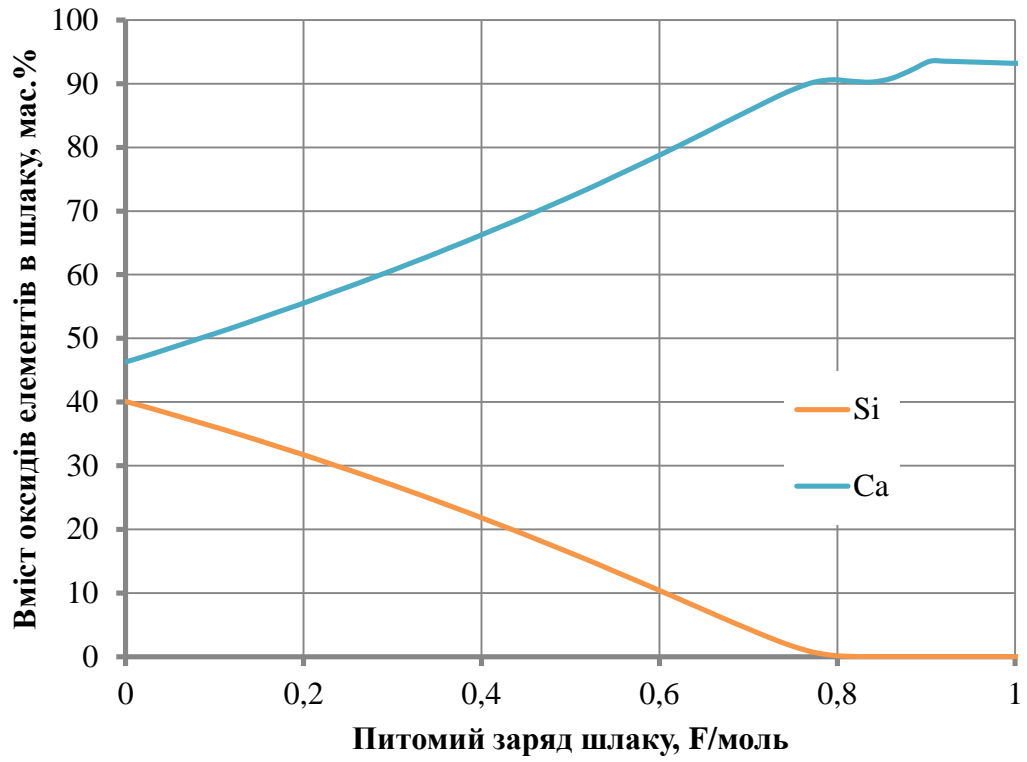


д)

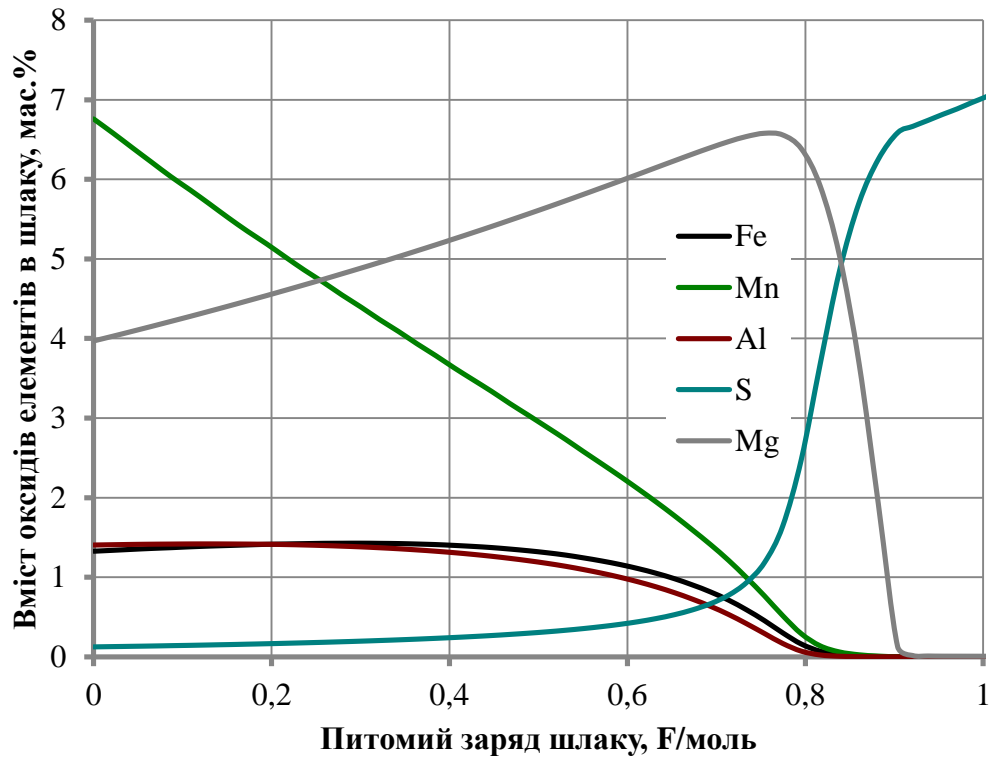


е)

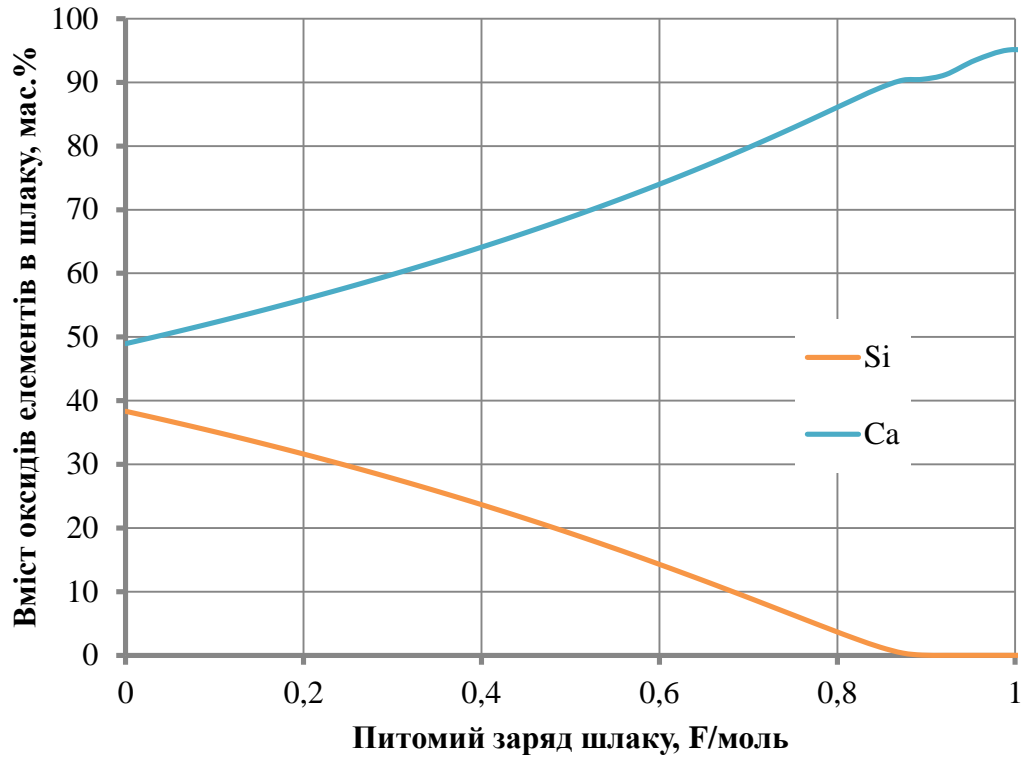
Рис 3.16 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 12MnSi4-3: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



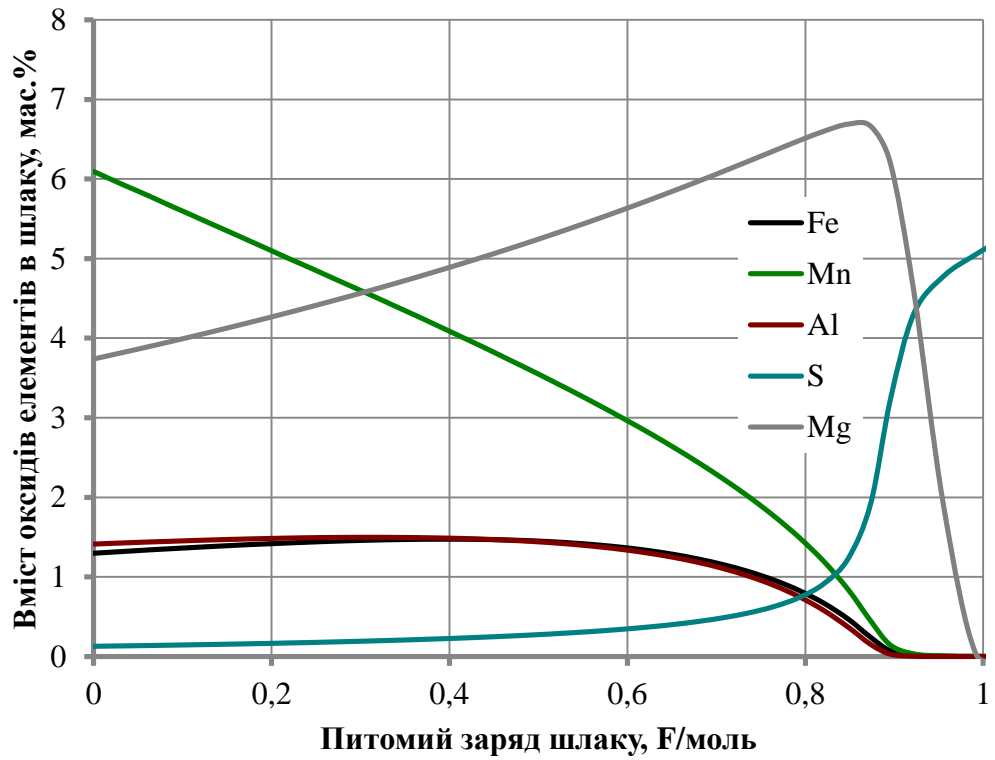
а)



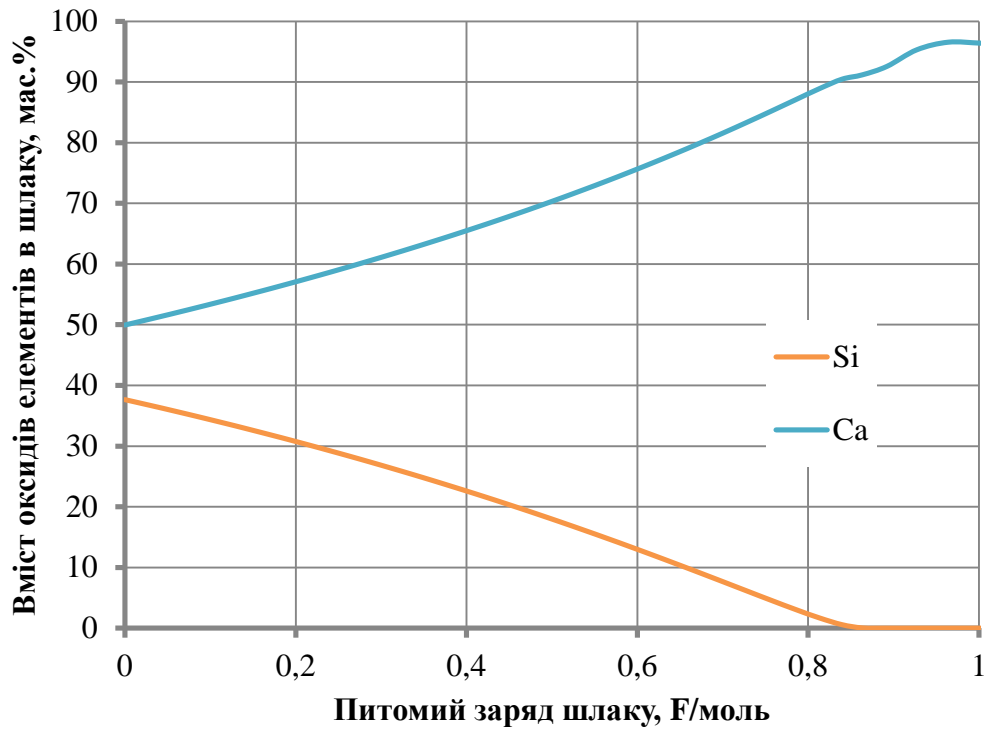
б)



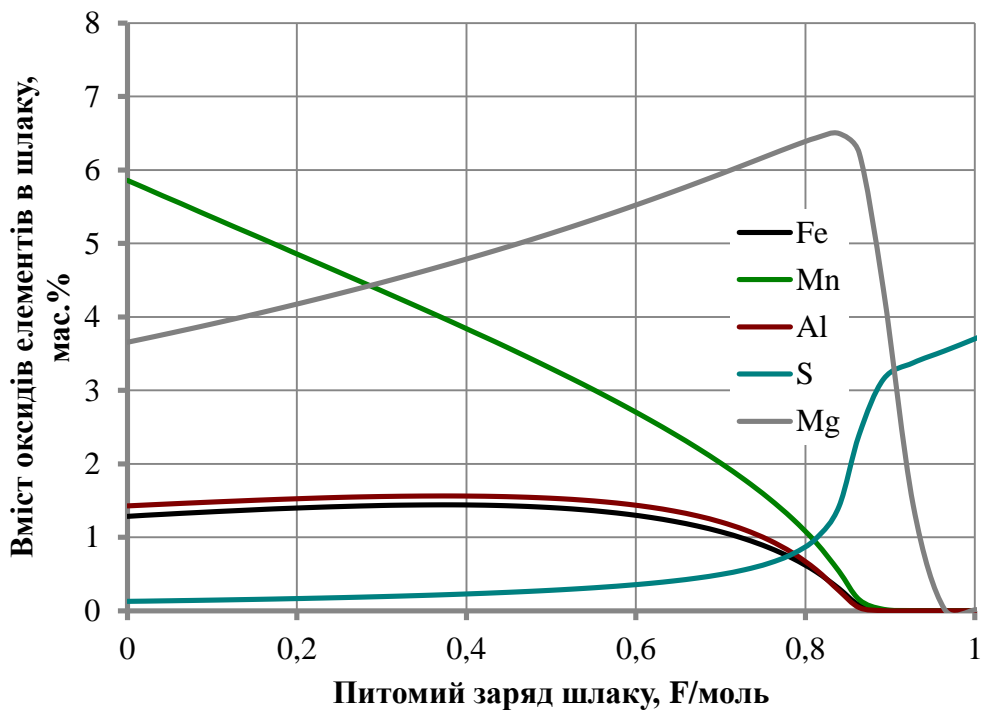
в)



г)

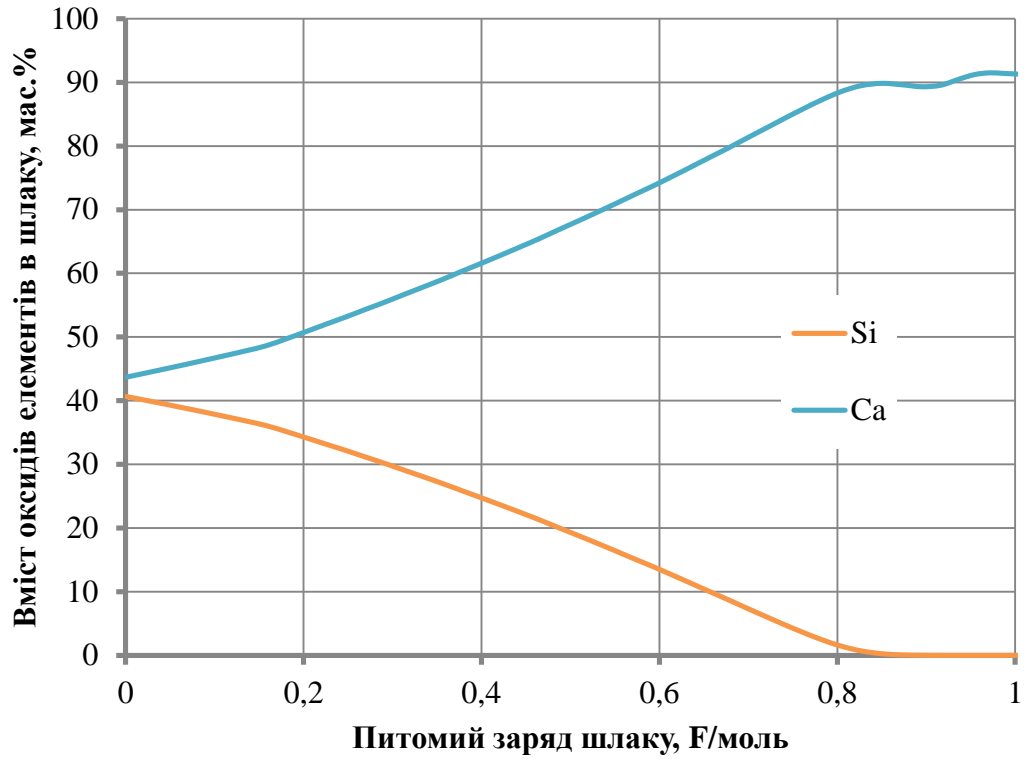


д)

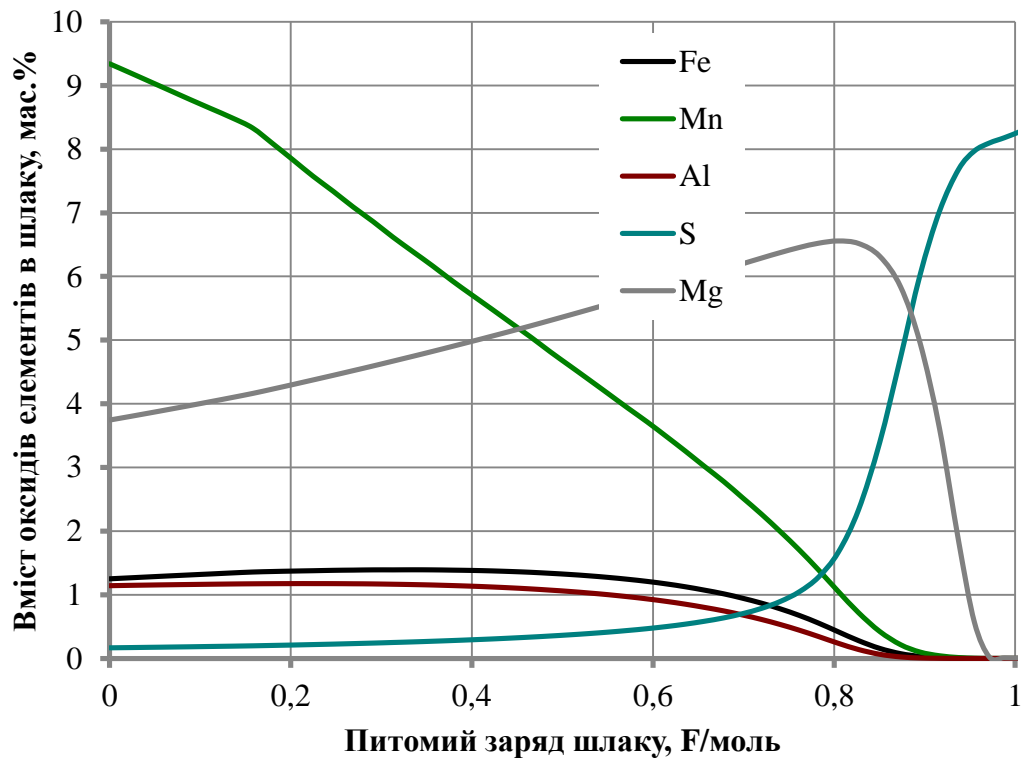


е)

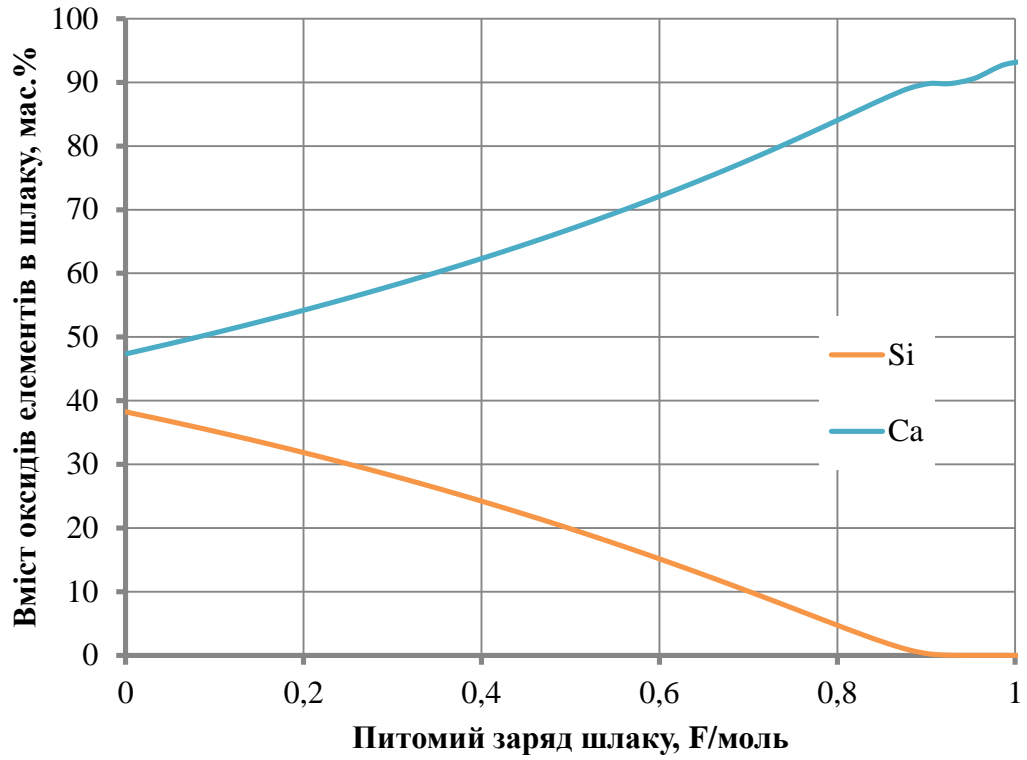
Рис 3.17 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 14MnCrSi4-3-2: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



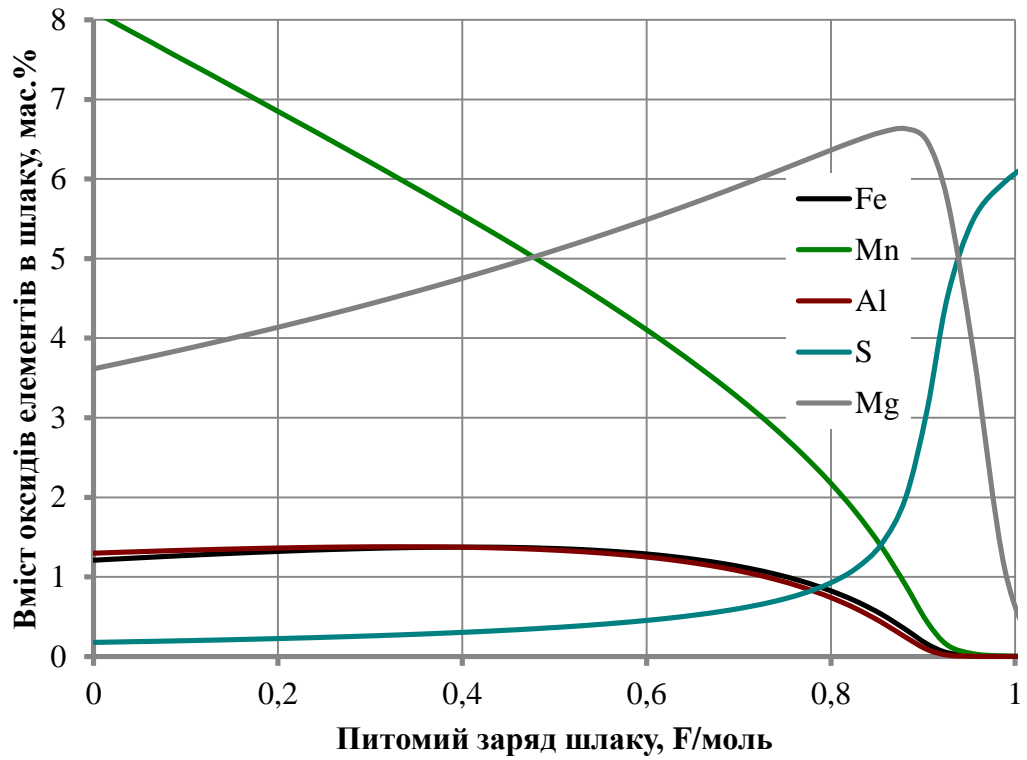
а)



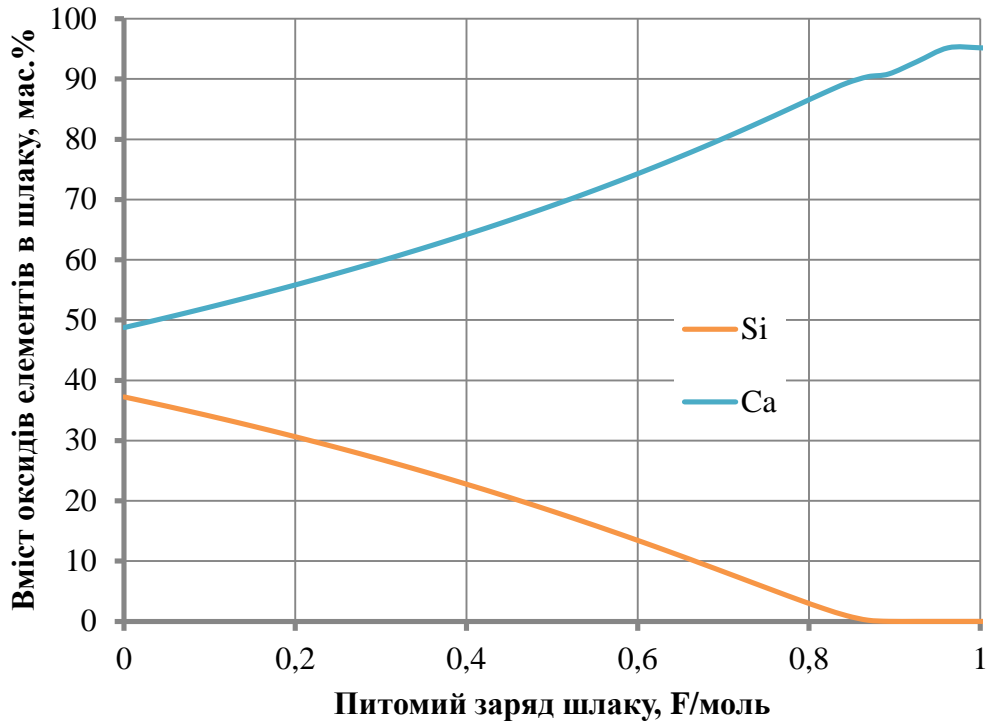
б)



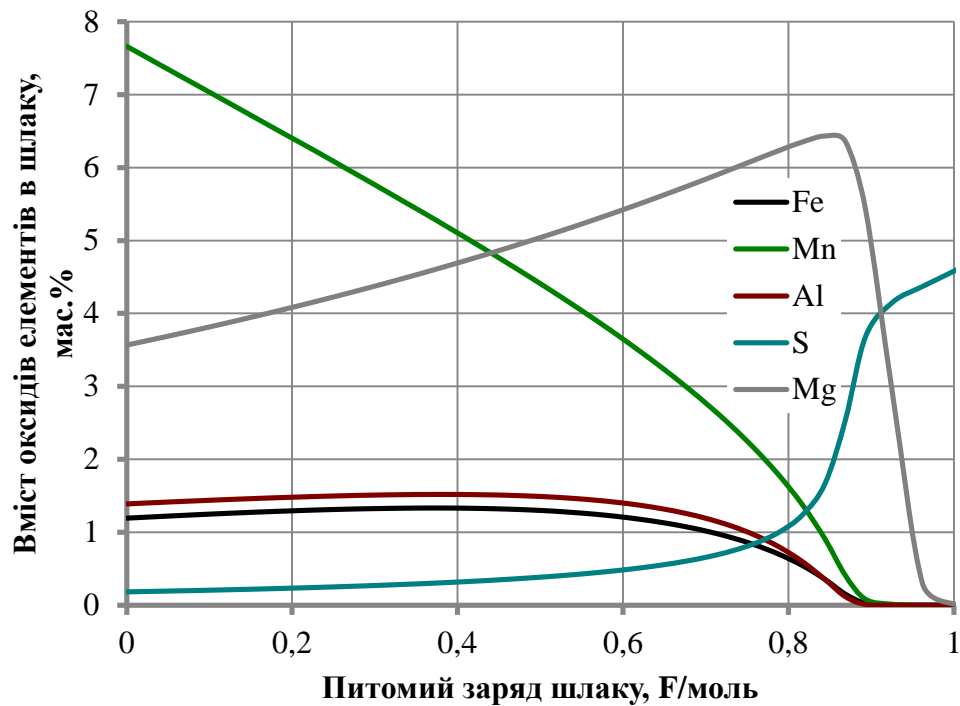
в)



г)

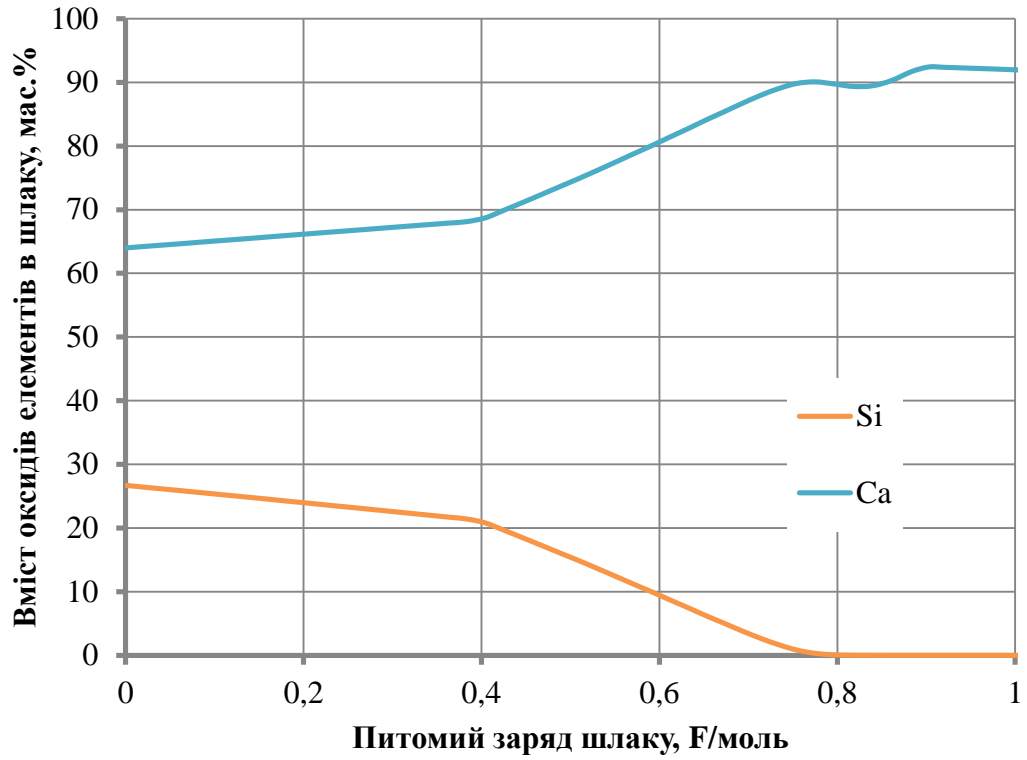


д)

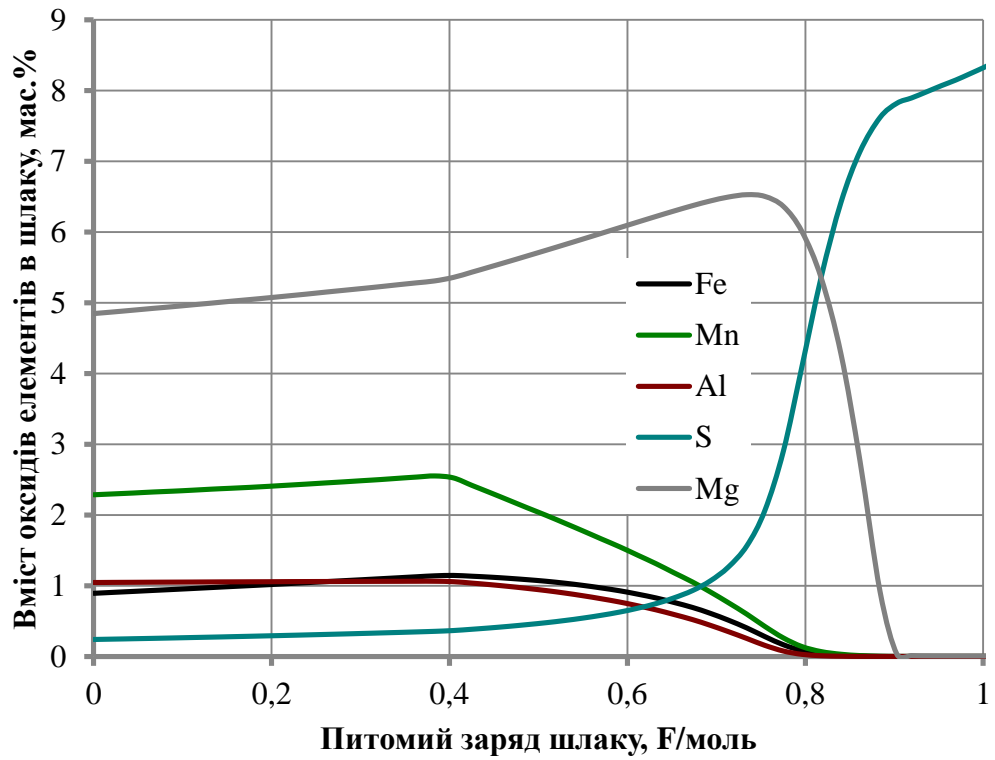


е)

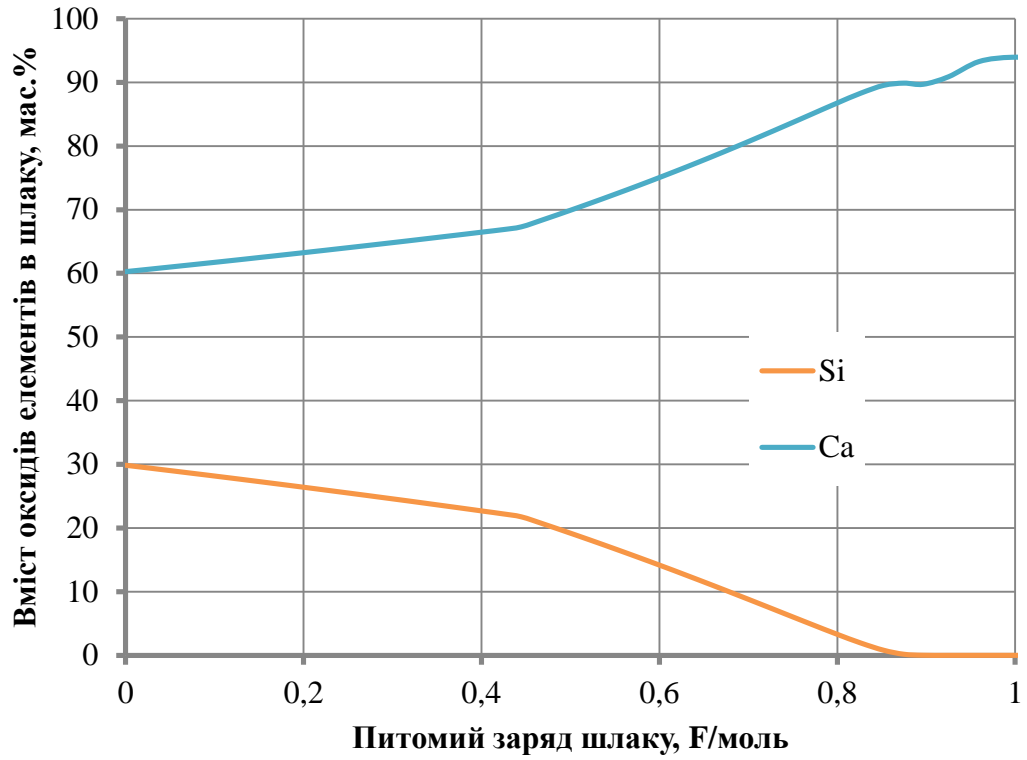
Рис. 3.18 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 9MnSi6-3: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



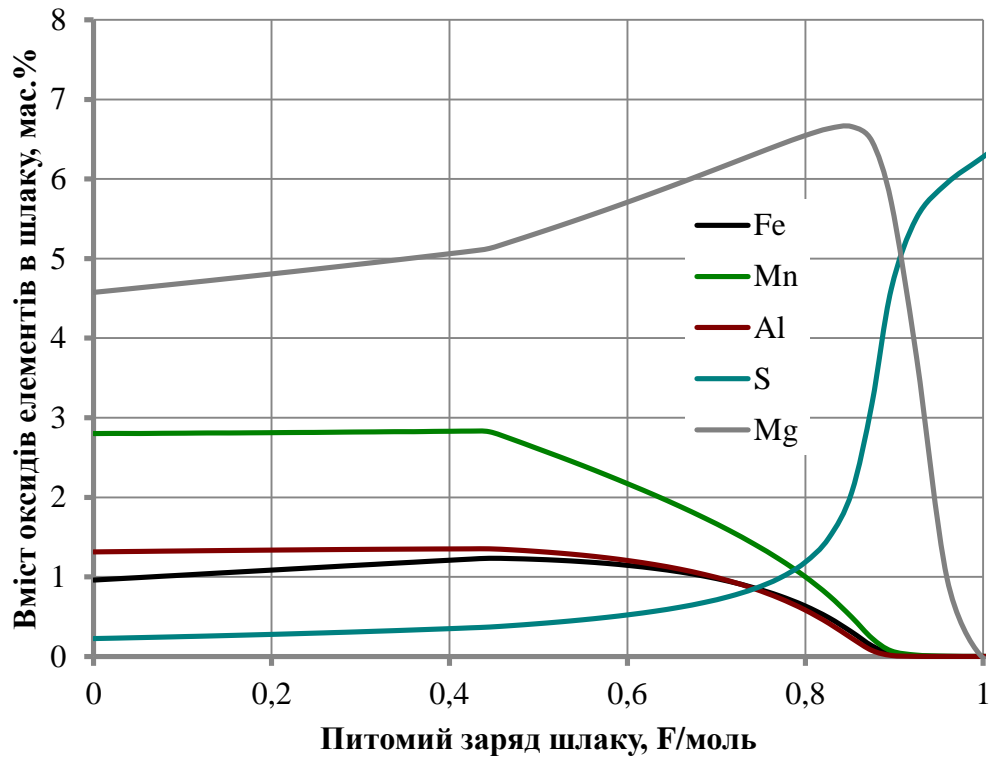
а)



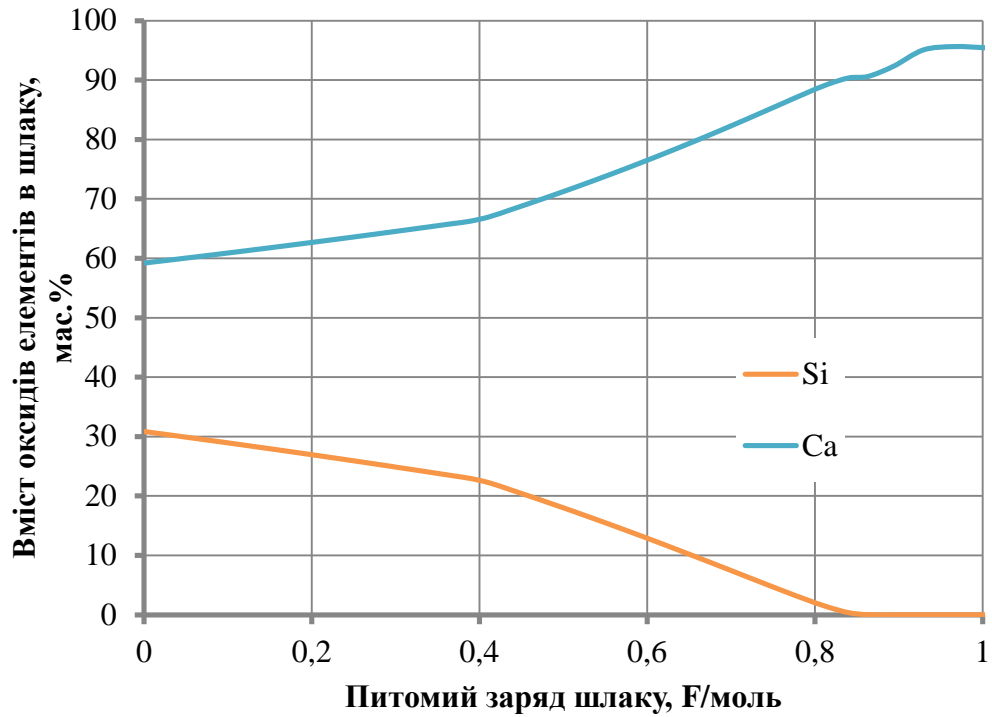
б)



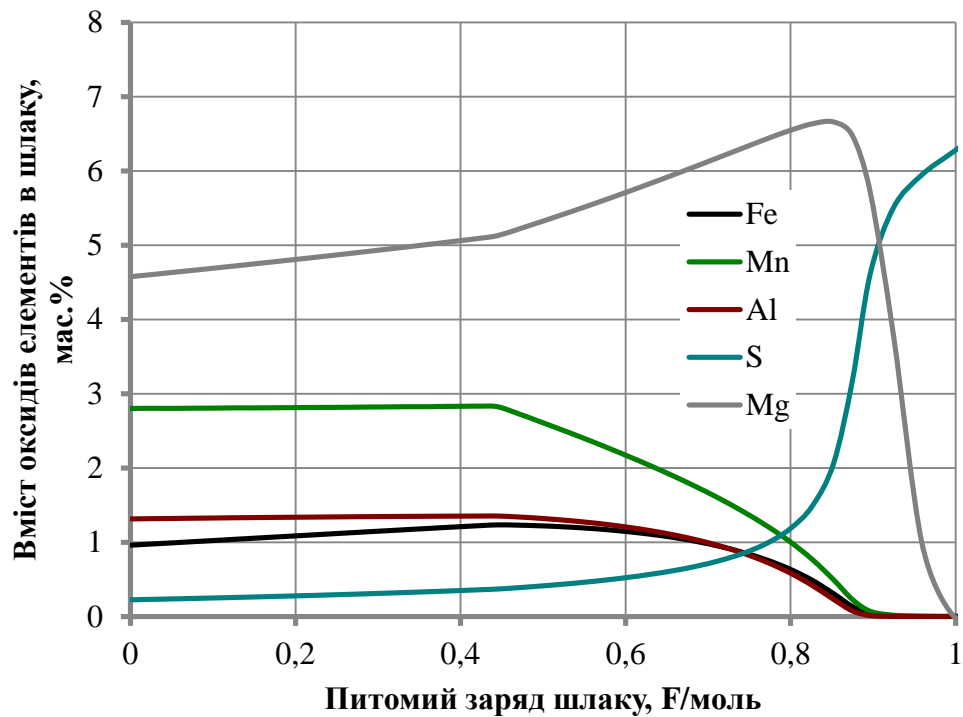
в)



г)

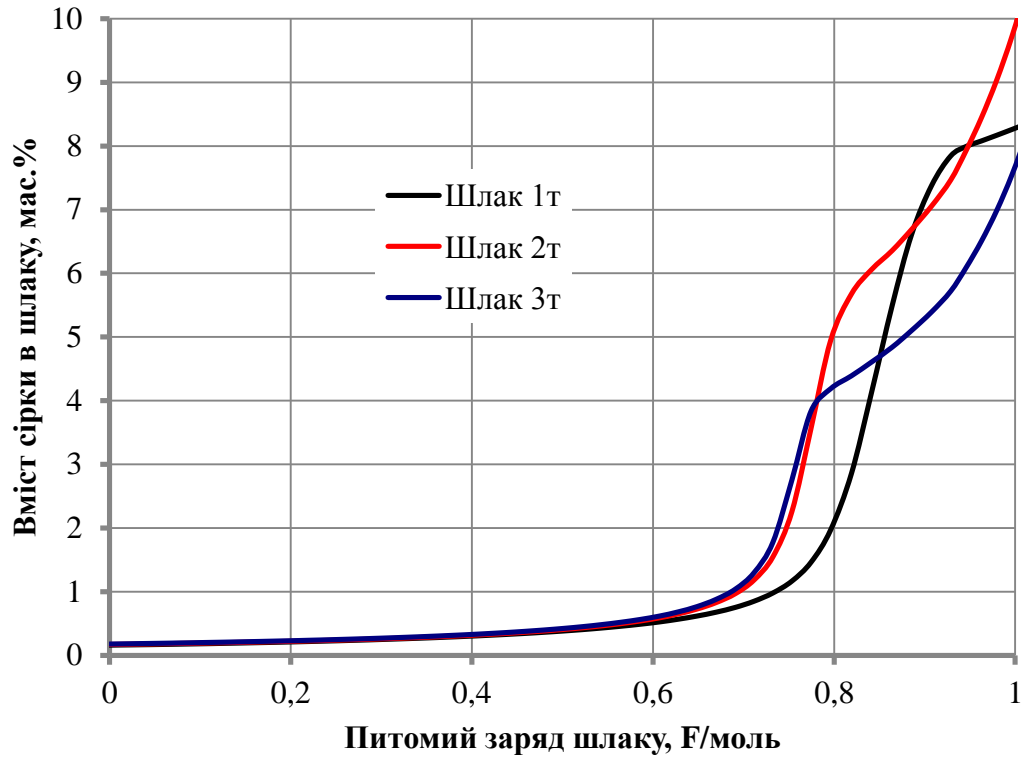


д)

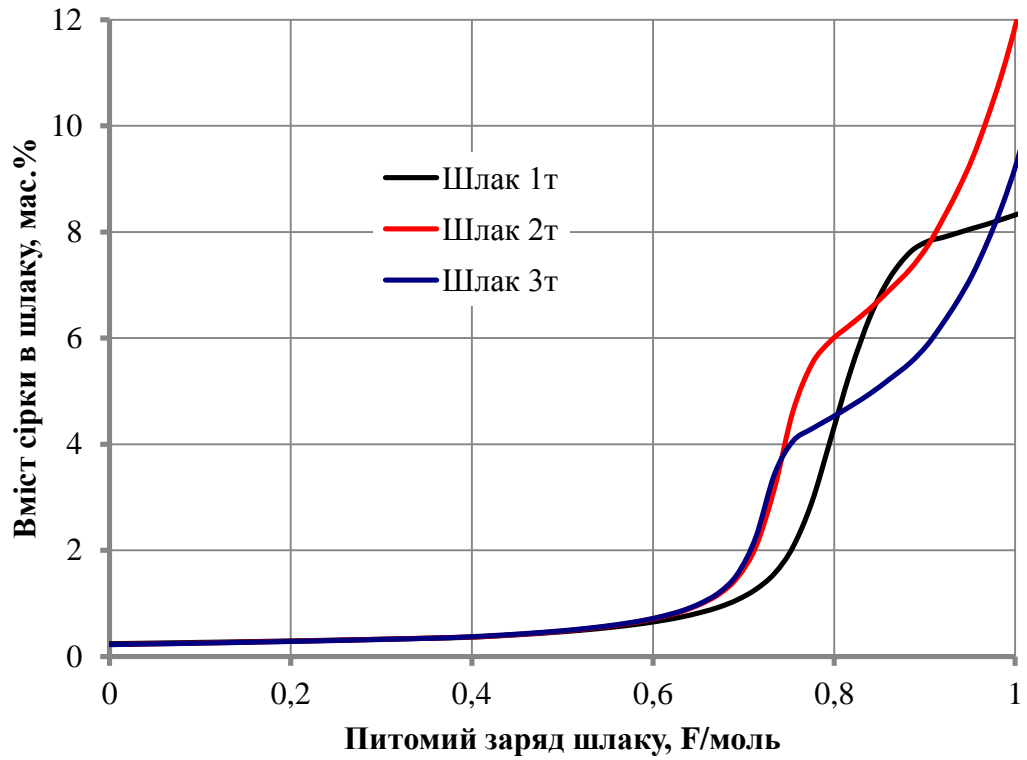


е)

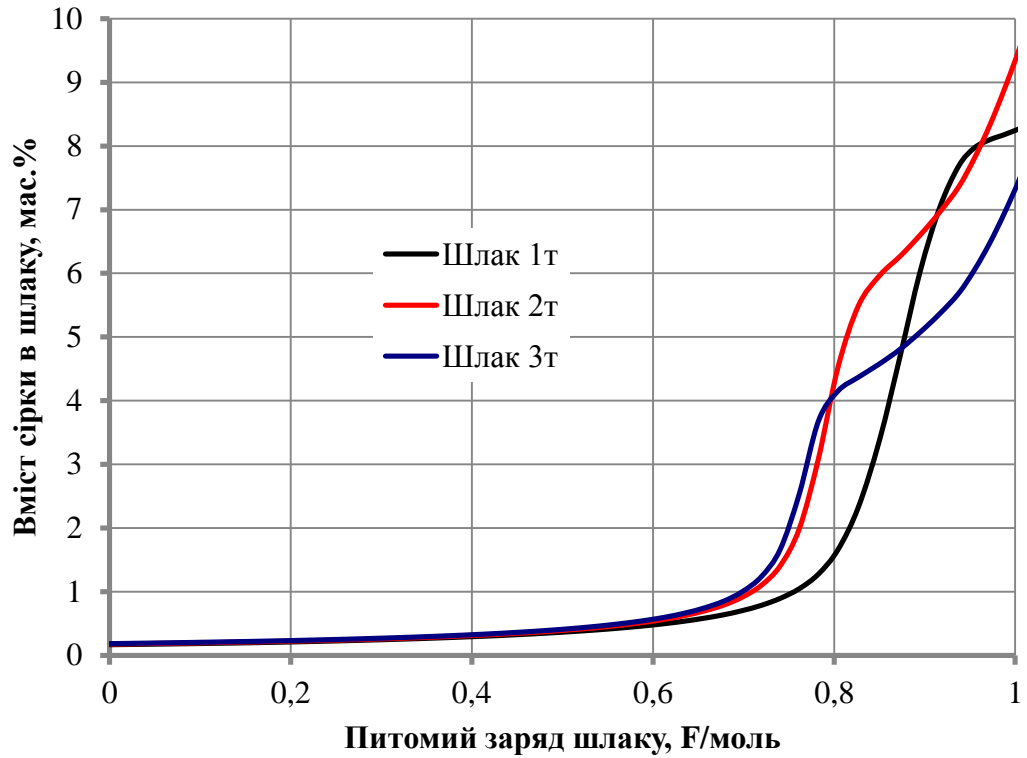
Рис. 3.19 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 30MnSi4-3: кремній, кальцій (а, в, д) ; сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



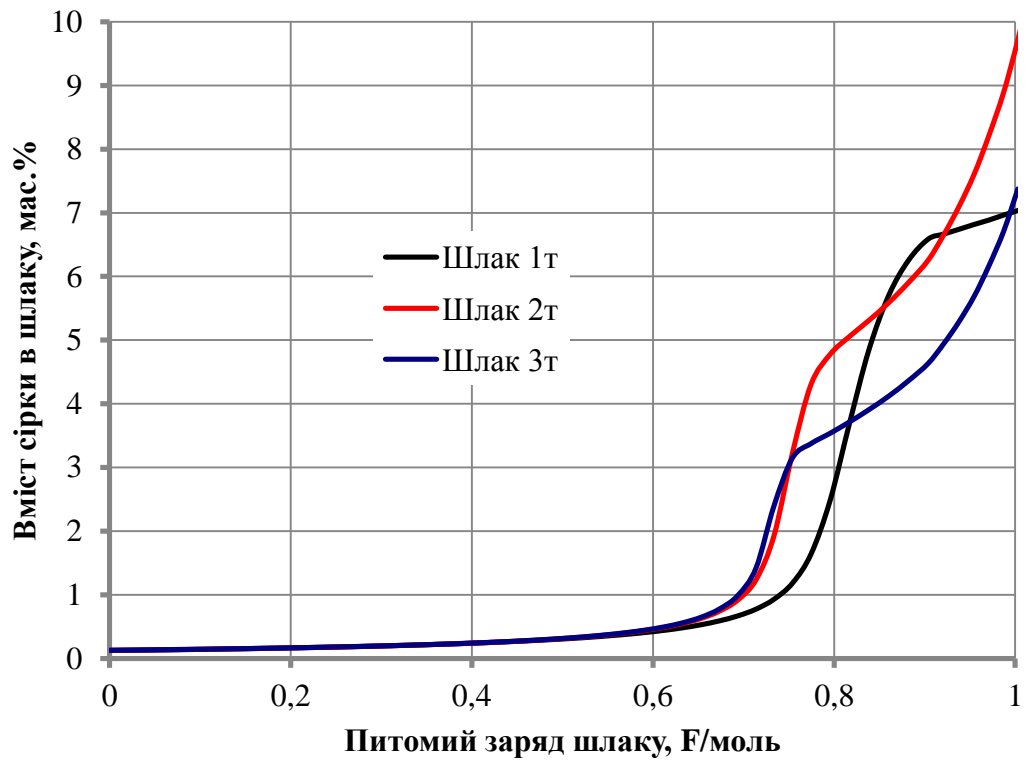
а)



б)



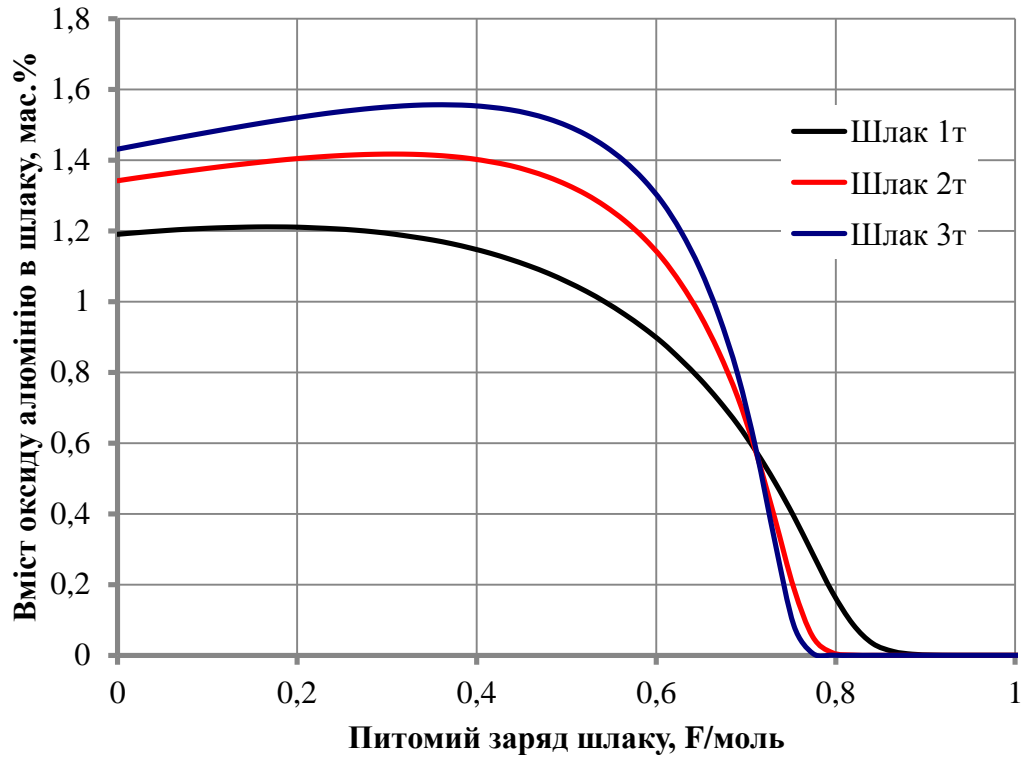
в)



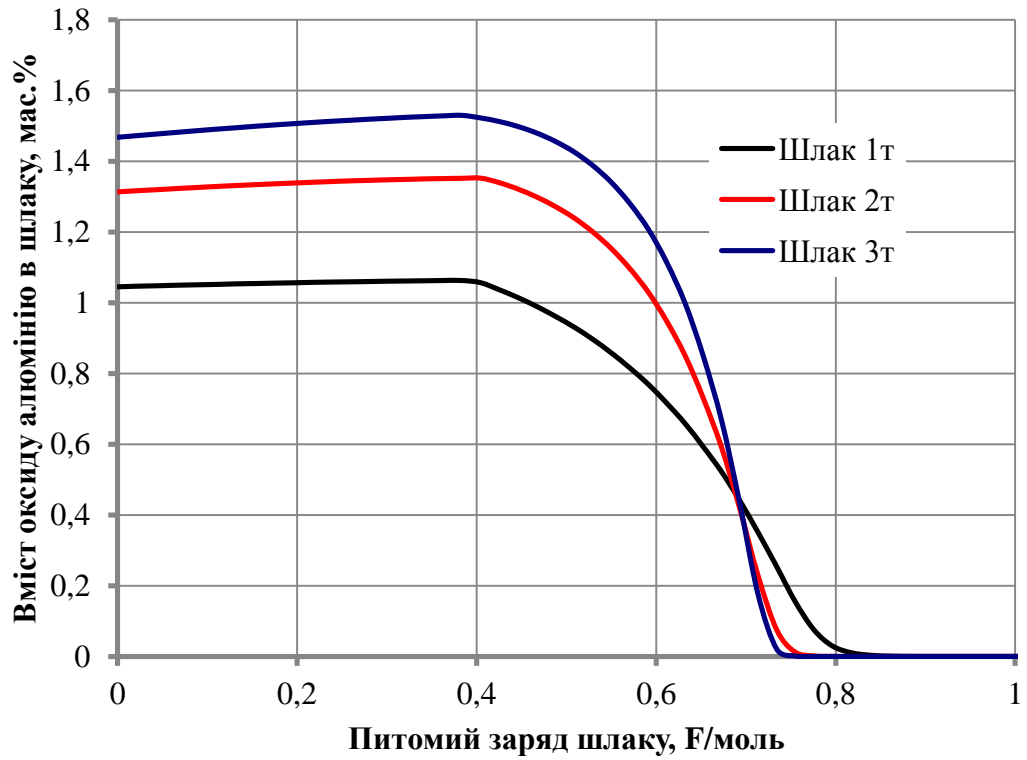
г)

Рис 3.20 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст сірки в шлаку:

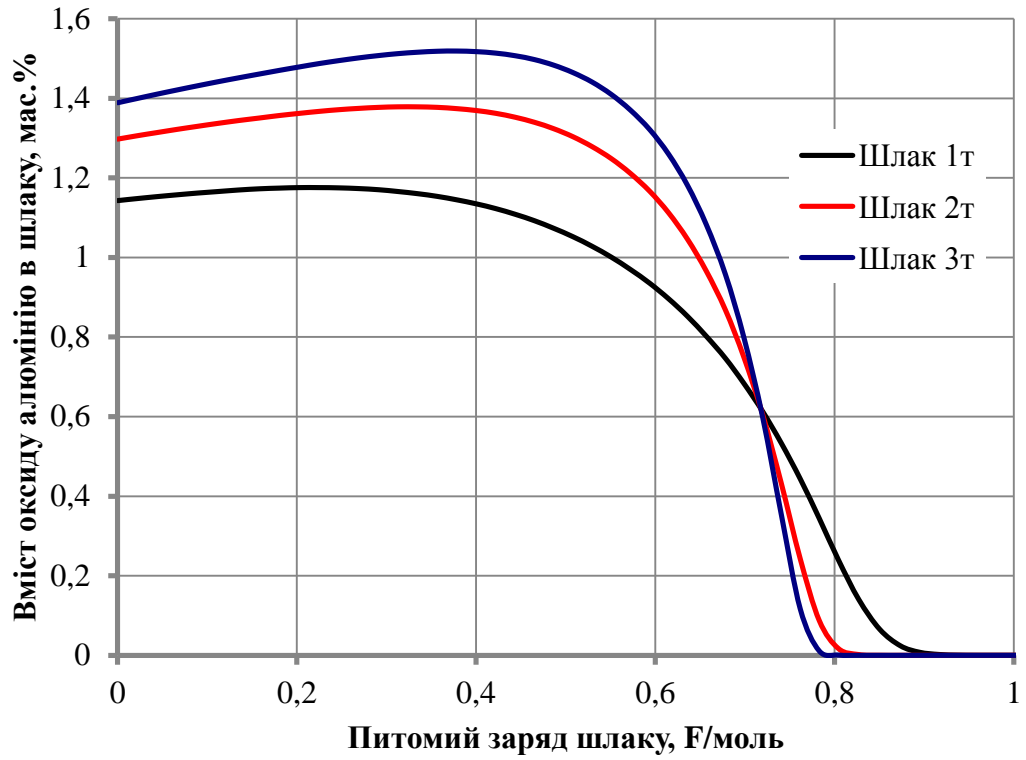
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2



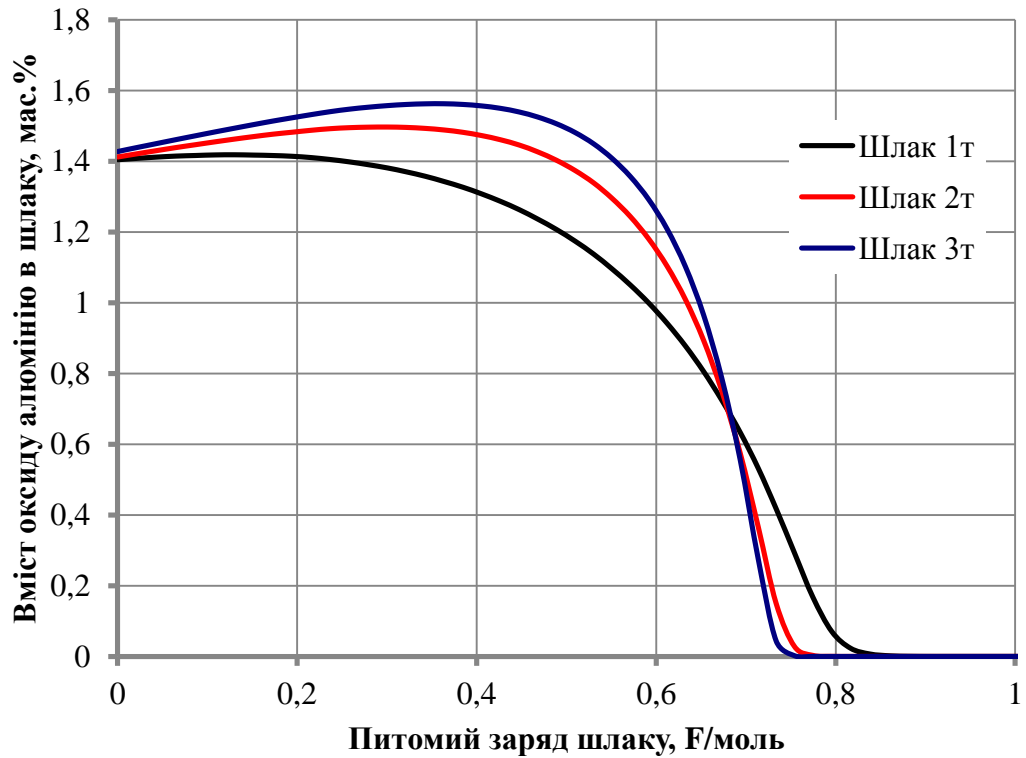
а)



б)



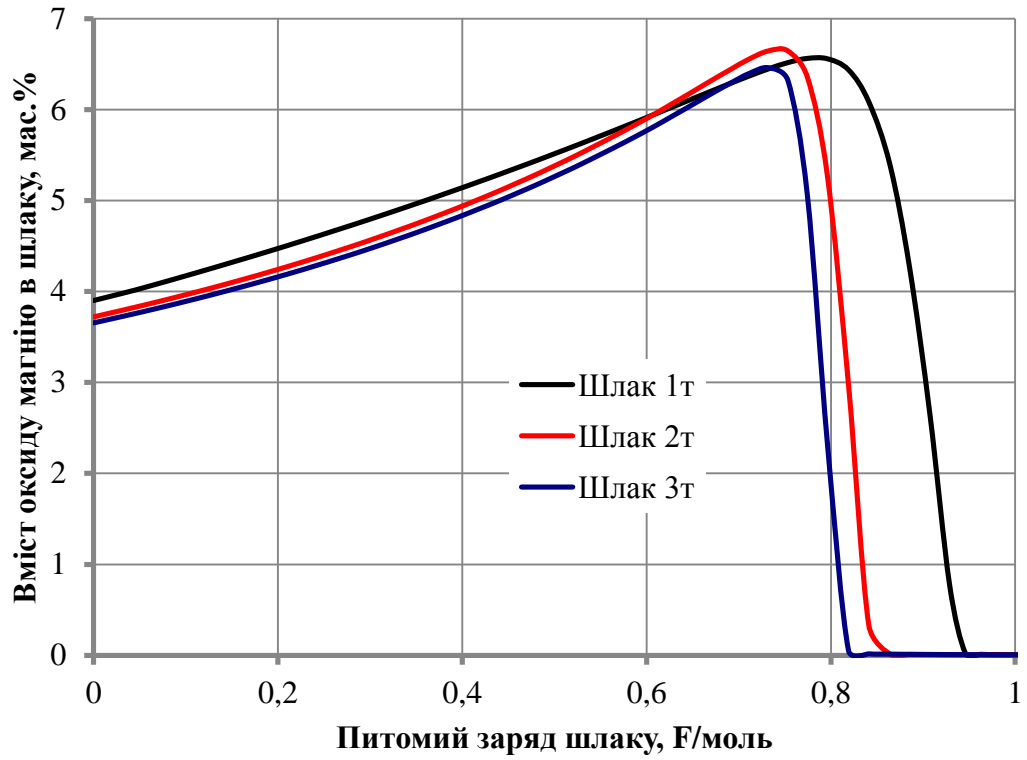
в)



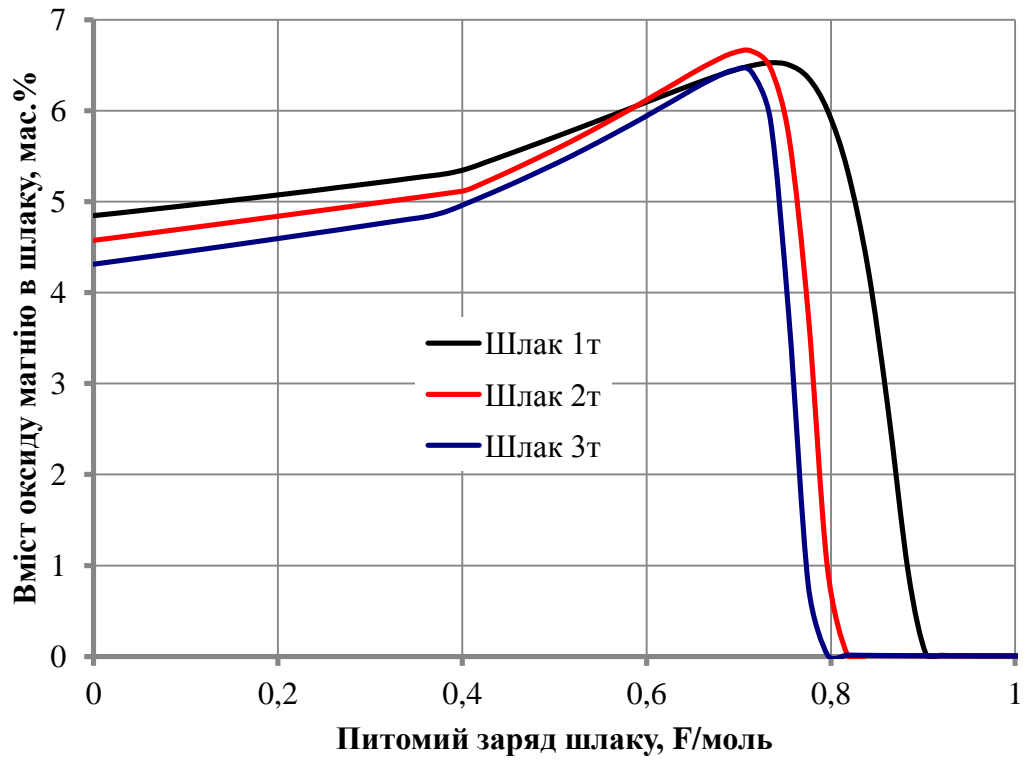
г)

Рис 3.21 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксиду алюмінію в шлаку:

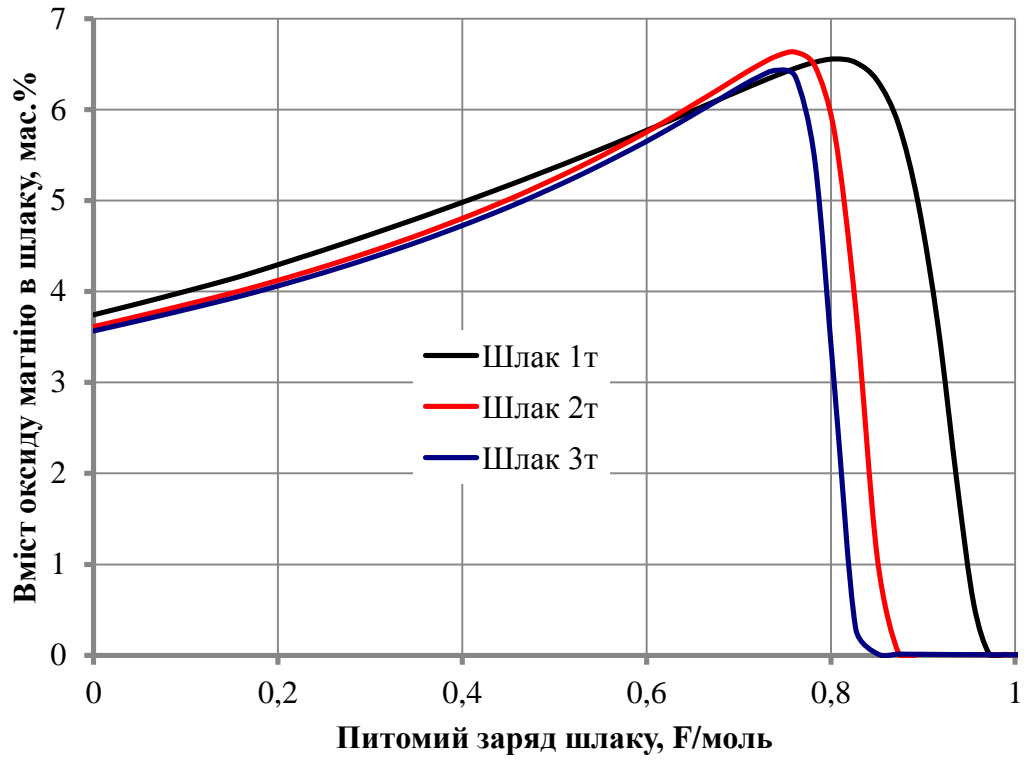
а) 12MnSi₄-3; б) 30MnSi₄-3; в) 9MnSi₆-3; г) 14MnCrSi₄-3-2



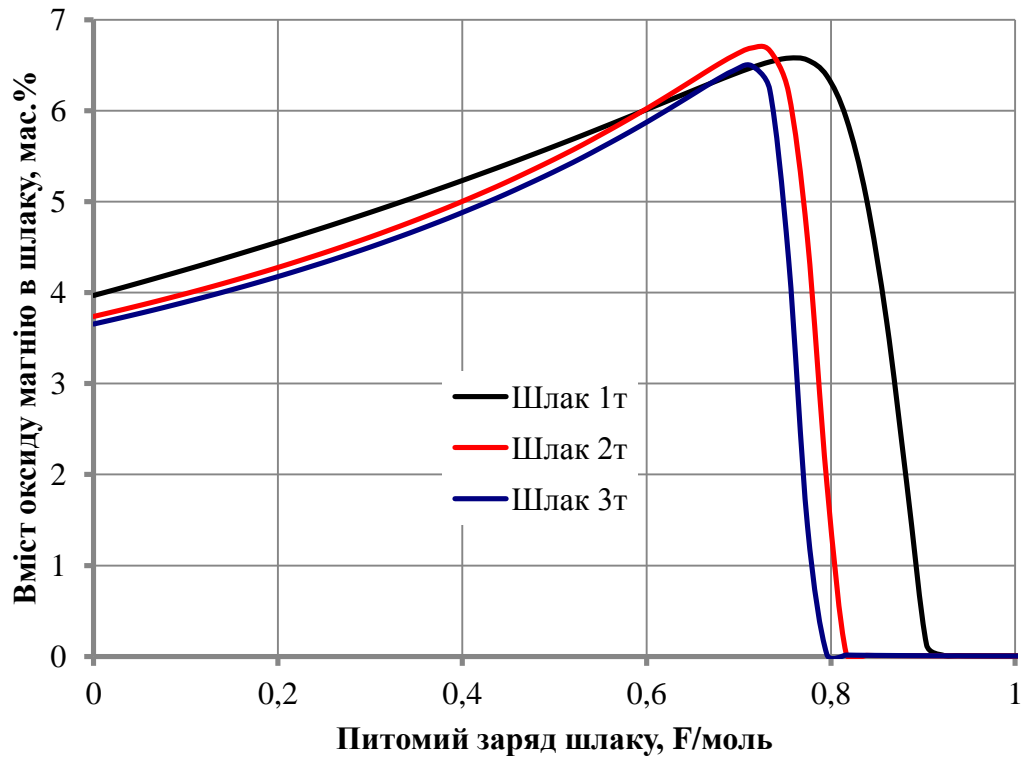
а)



б)



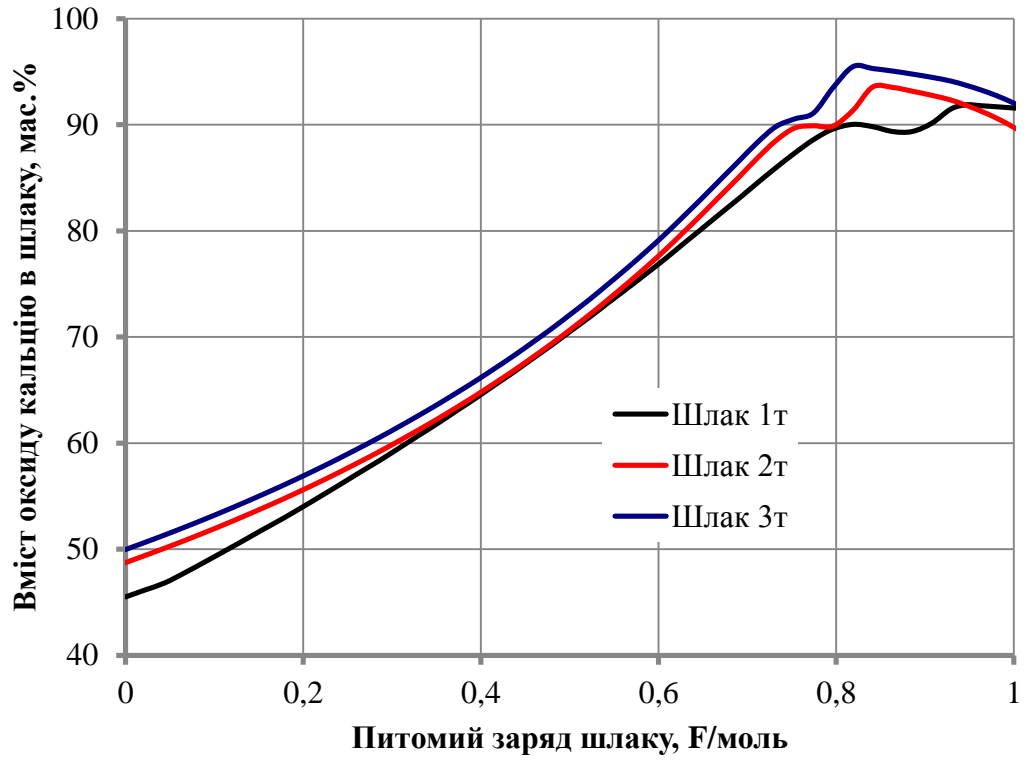
в)



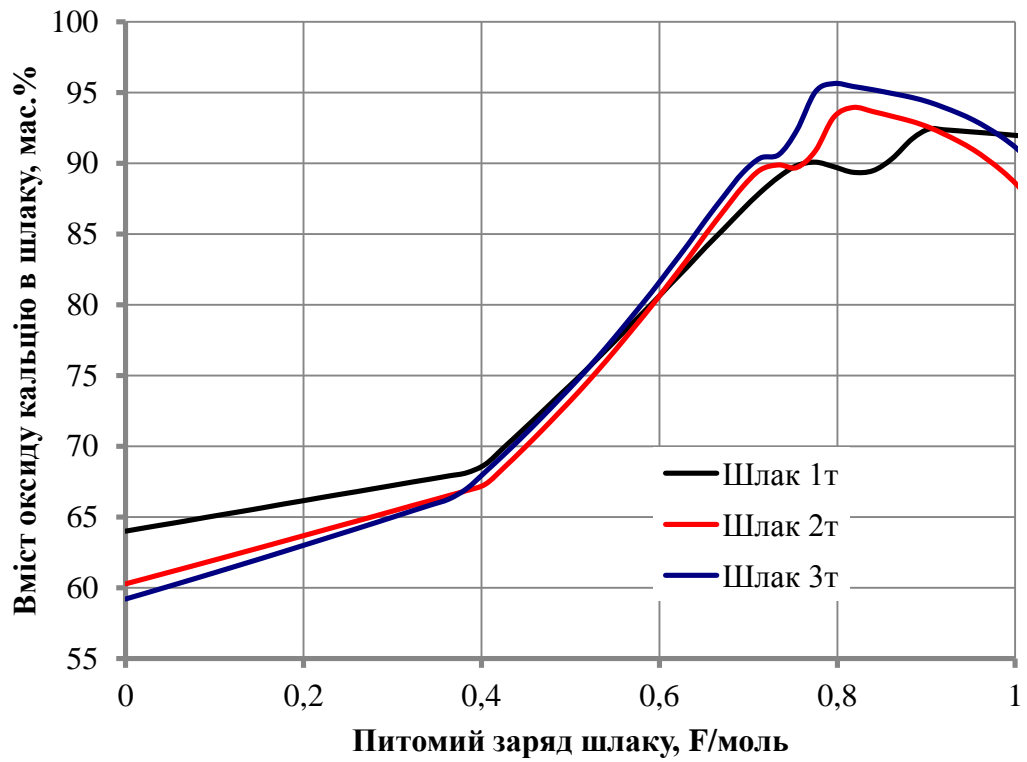
г)

Рис 3.22 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксиду магнію в шлаку:

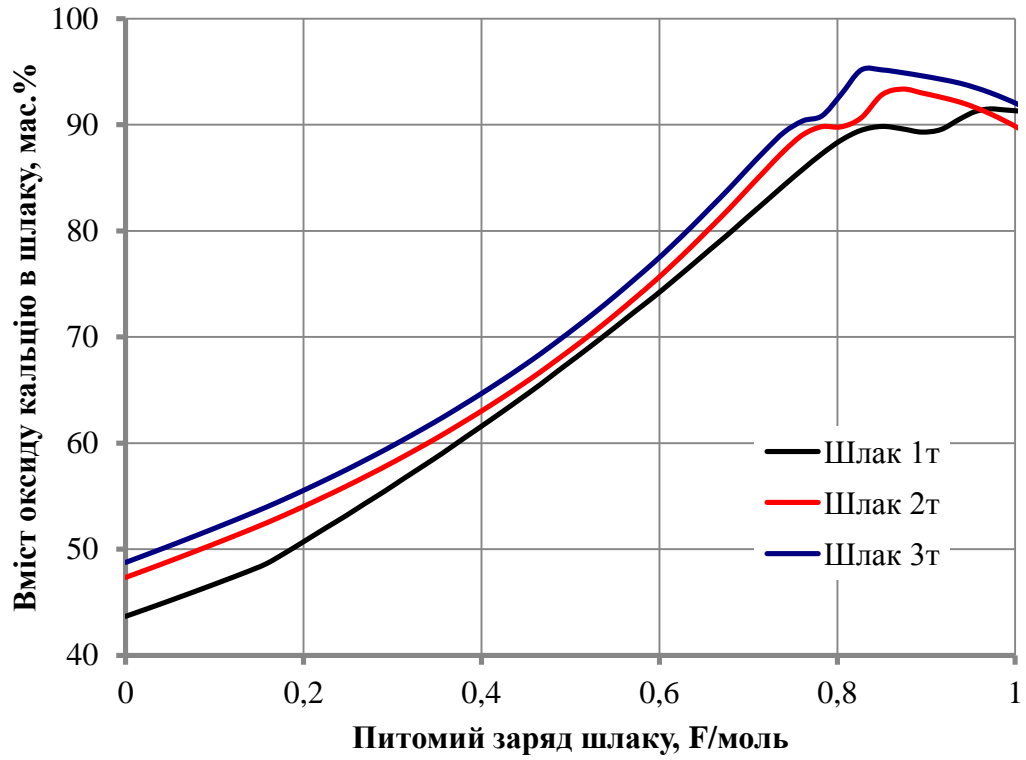
а) 12MnSi₄-3; б) 30MnSi₄-3; в) 9MnSi₆-3; г) 14MnCrSi₄-3-2



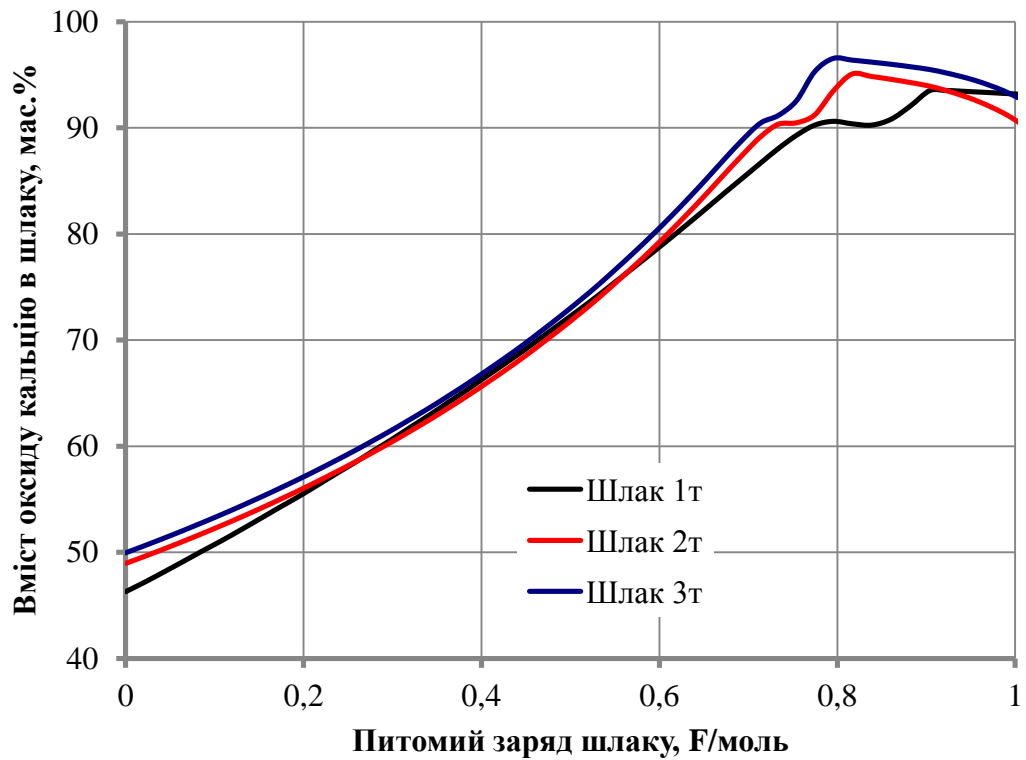
а)



б)



в)



г)

Рис 3.23 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксиду кальцію в шлаку:

а) 12MnSi₄-3; б) 30MnSi₄-3; в) 9MnSi₆-3; г) 14MnCrSi₄-3-2

Дані, представлені на рис 3.16–3.23 свідчать про те, що вміст сірки у шлаку при легуванні сталі усіх марок системно збільшується в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку. Слід зазначити, що за високого рівня кисню і сірки шлак, що не є електронейтральним, може стати нестабільним і відтак завадити подальшому протіканню процесу ВЕЛР.

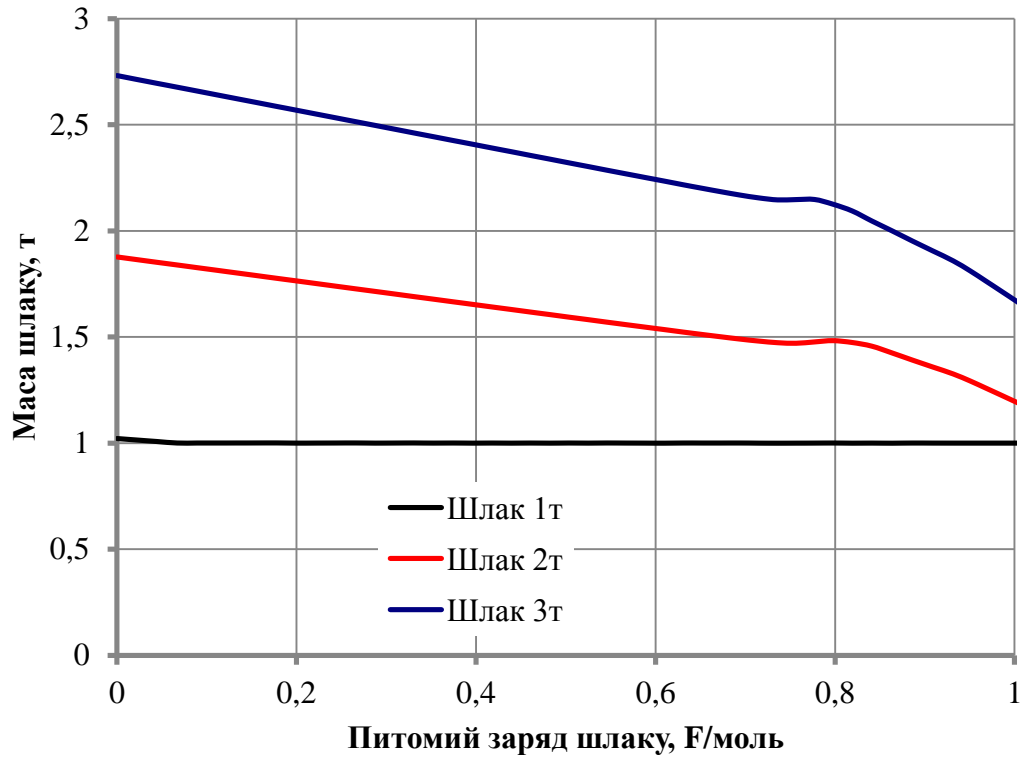
При підвищенні питомого заряду шлаку до рівня 0,85 F/моль вміст оксиду кальцію у шлаку підвищується з 50 до 90 мас.%, але це не означає, що його стає більше в абсолютних одиницях виміру, якщо не додавали вапно. Ріст відсотка вмісту оксиду кальцію зумовлений переходом елементів у метал. Надалі вміст оксиду кальцію залишається стабільним, у тому числі за рахунок додавання вапна для компенсації зменшення маси шлаку. При високому вмісті оксиду кальцію до складу шлаку необхідно додавати плавиковий шпат для розрідження.

Такі елементи, як кремній, марганець, залізо, алюміній при підвищенні питомого заряду шлаку до рівня $\geq 0,8$ F/моль практично повністю відновлюються і переходять до металу. До досягнення цього рівня їх вміст в шлаку поступово знижується.

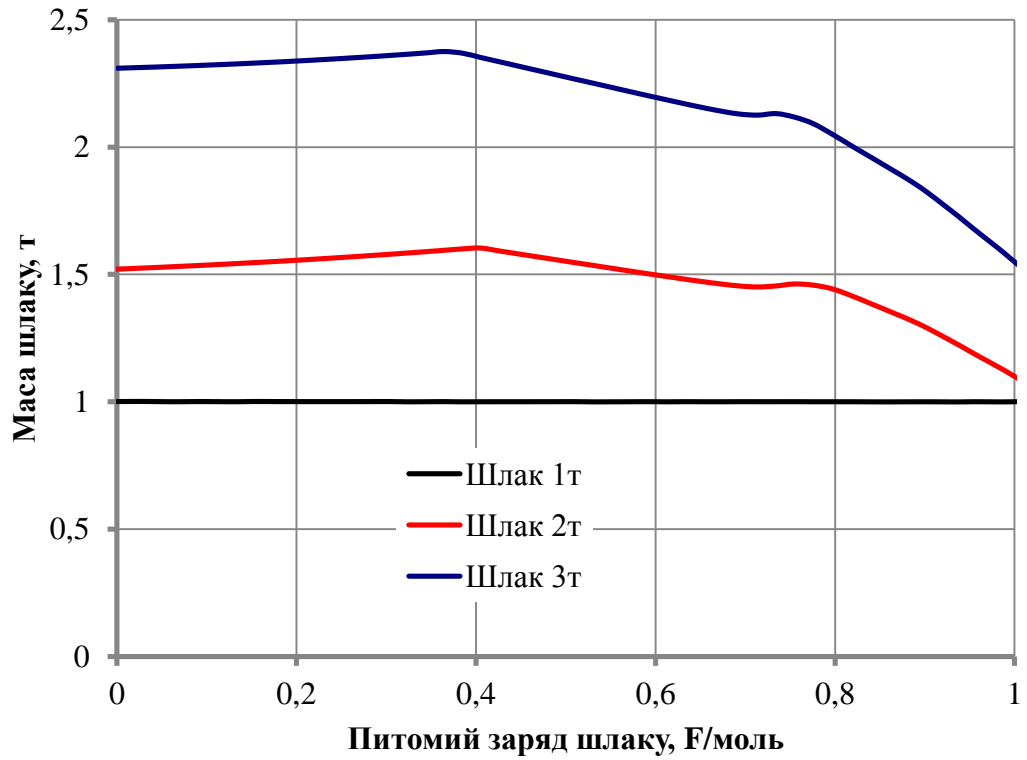
До 0,75 F/моль у шлаку зростає відсоток магнію за рахунок зниження вмісту елементів, що перейшли до металу в результаті відновлення. Надалі магній активно переходить до газової фази і частково в метал. Відтак його вміст у шлаку різко знижується. Кальцій також активно йде до газової фази і частково в метал при великому рівні питомого заряду шлаку.

3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку

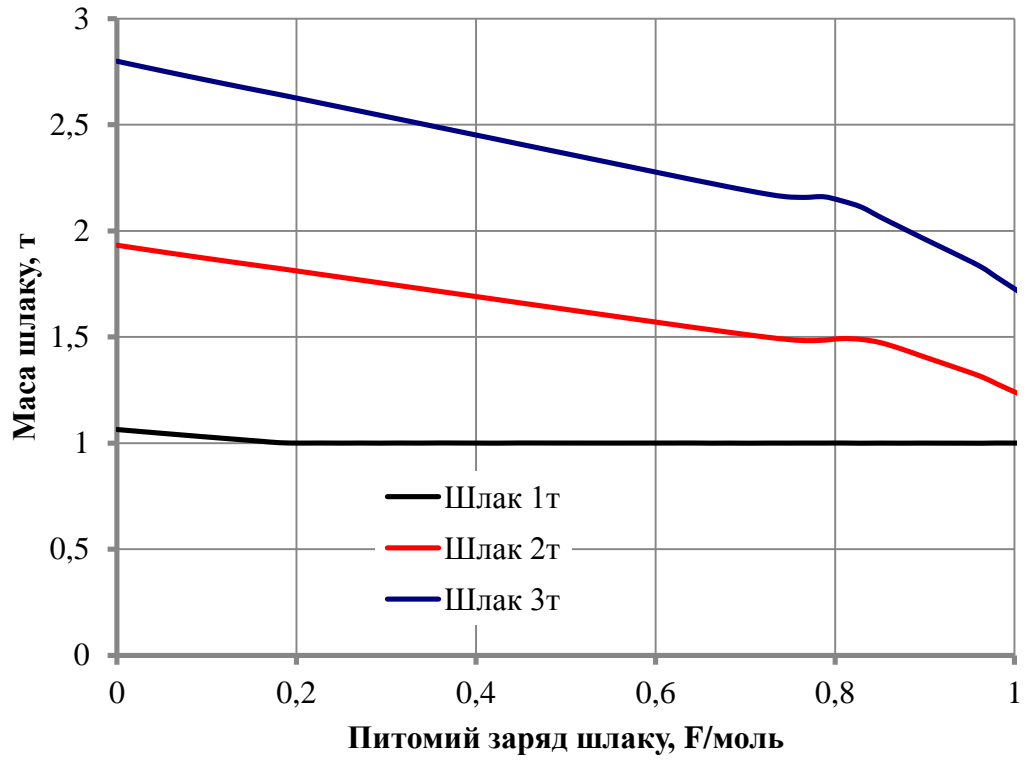
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на кінцеву масу шлаку. На рисунку 3.24 наведено відповідні результати розрахунків.



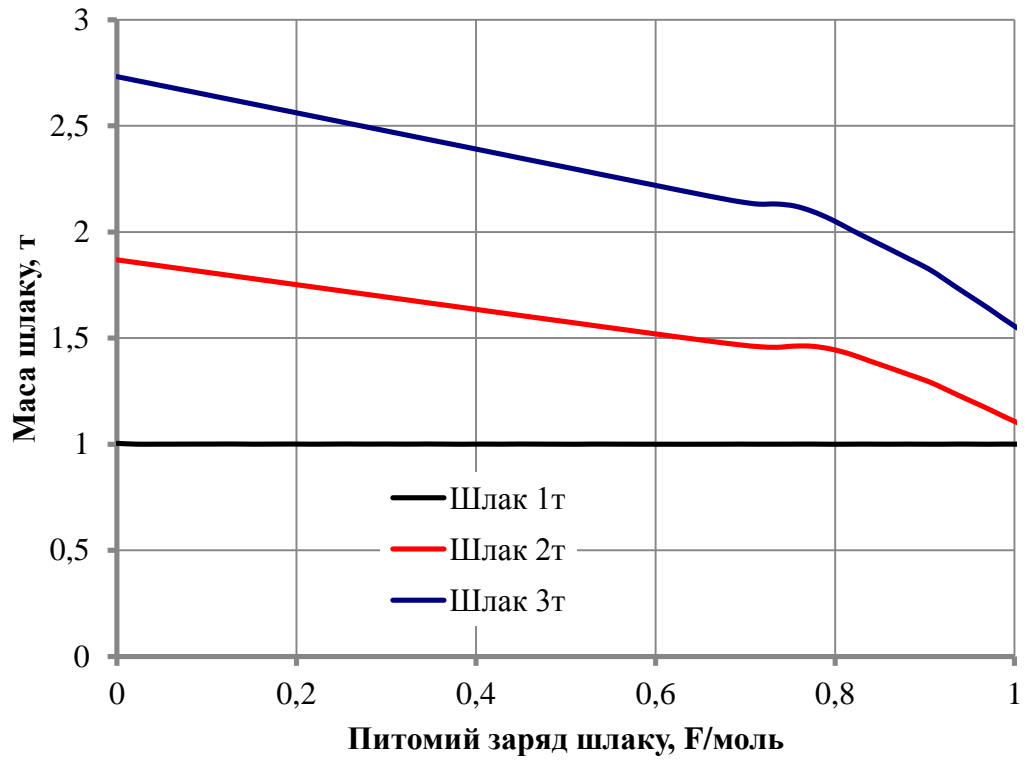
а)



б)



в)



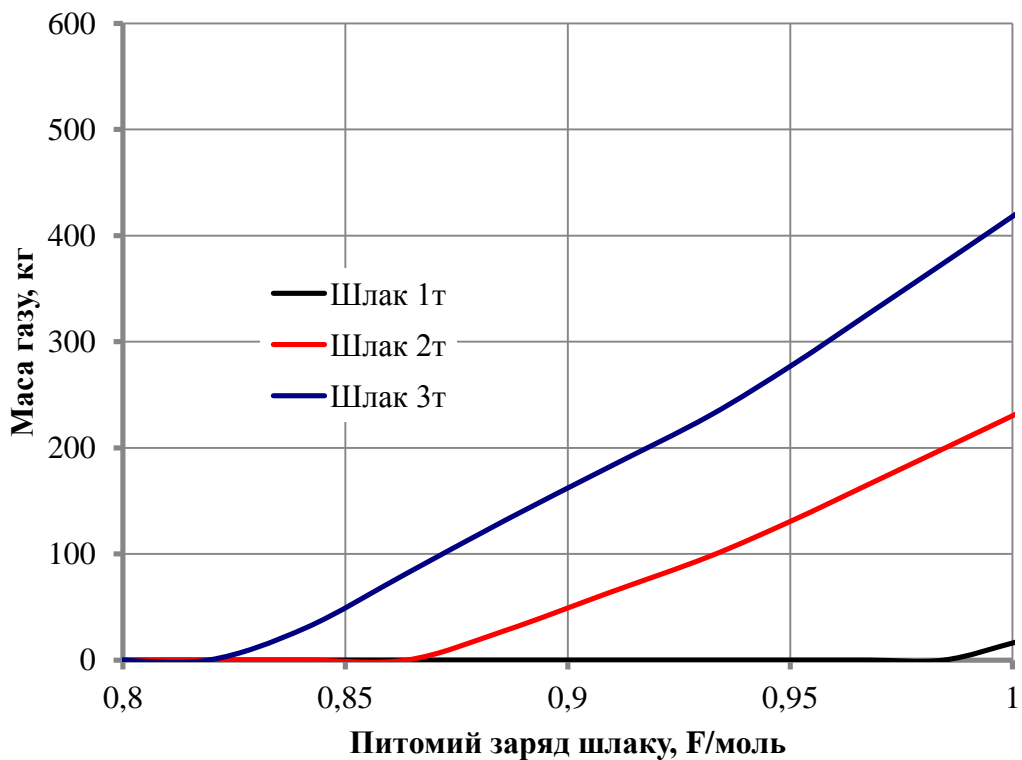
г)

Рис. 3.24 – Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку для:
 а) 12MnSi₄-3; б) 30MnSi₄-3; в) 9MnSi₆-3; г) 14MnCrSi₄-3-2

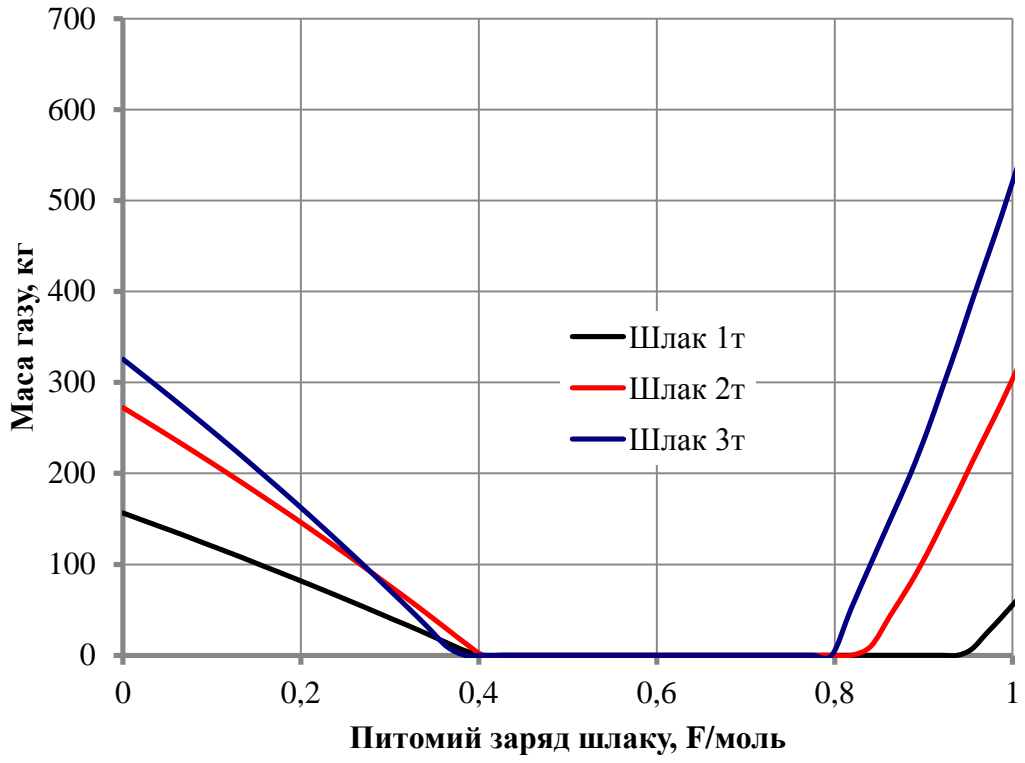
Дані, представлені на рис. 3.24 свідчать про те, що кінцева маса шлаку при легуванні сталі усіх марок системно знижується в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку за рахунок елементів, що відновилися і перейшли до металу. Виняток становить початкова маса шлаку 1 т, оскільки за умовами оптимізації легування в процесі ВЕЛР маса шлаку підтримується на рівні не менше 1 т шляхом додавання вапна.

3.2.5 Вплив питомого заряду шлаку на масу газової фази

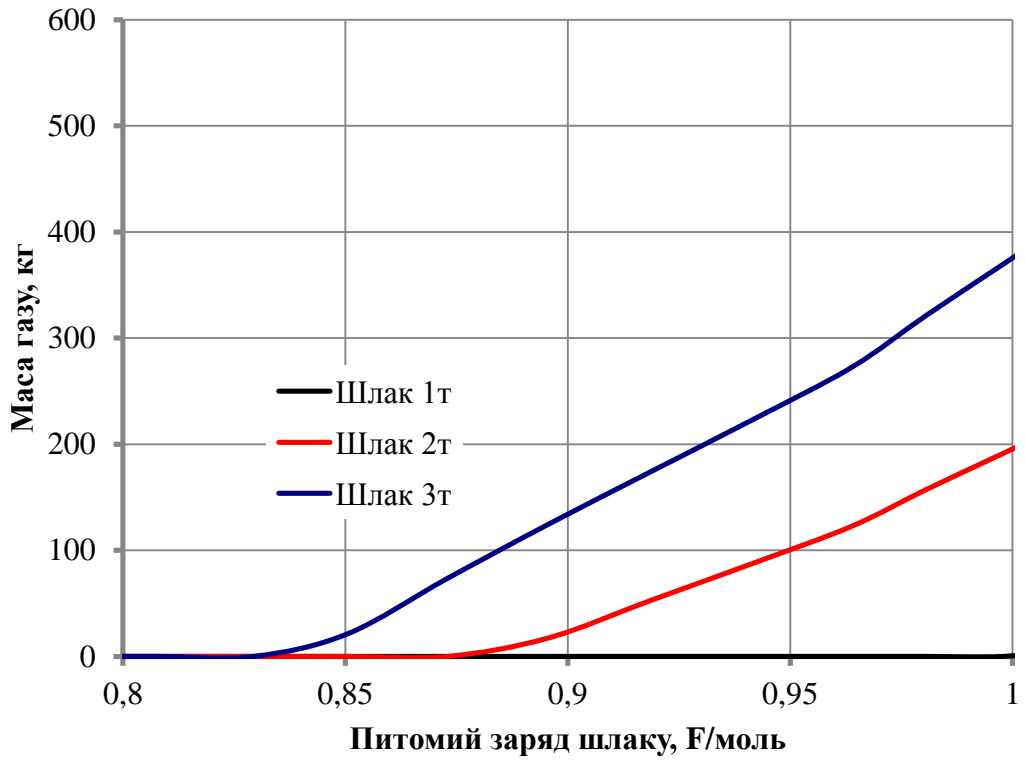
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на масу газової фази. На рисунку 3.25 наведено відповідні результати розрахунків.



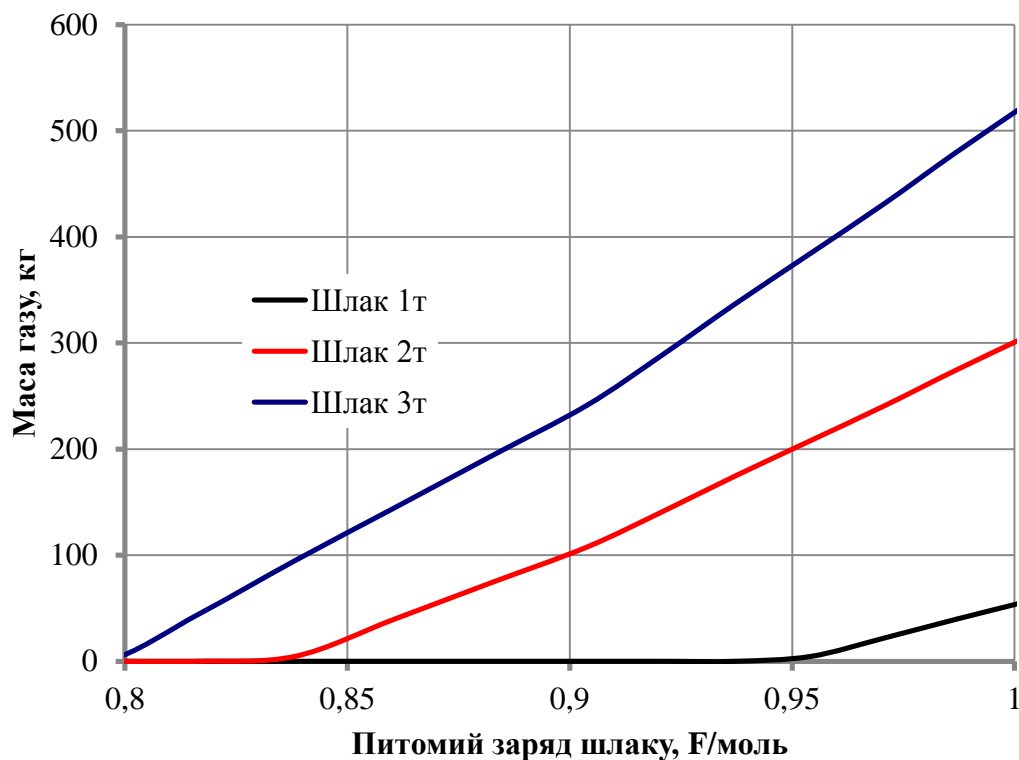
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.25 - Вплив питомого заряду шлаку на масу газової фази для:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2

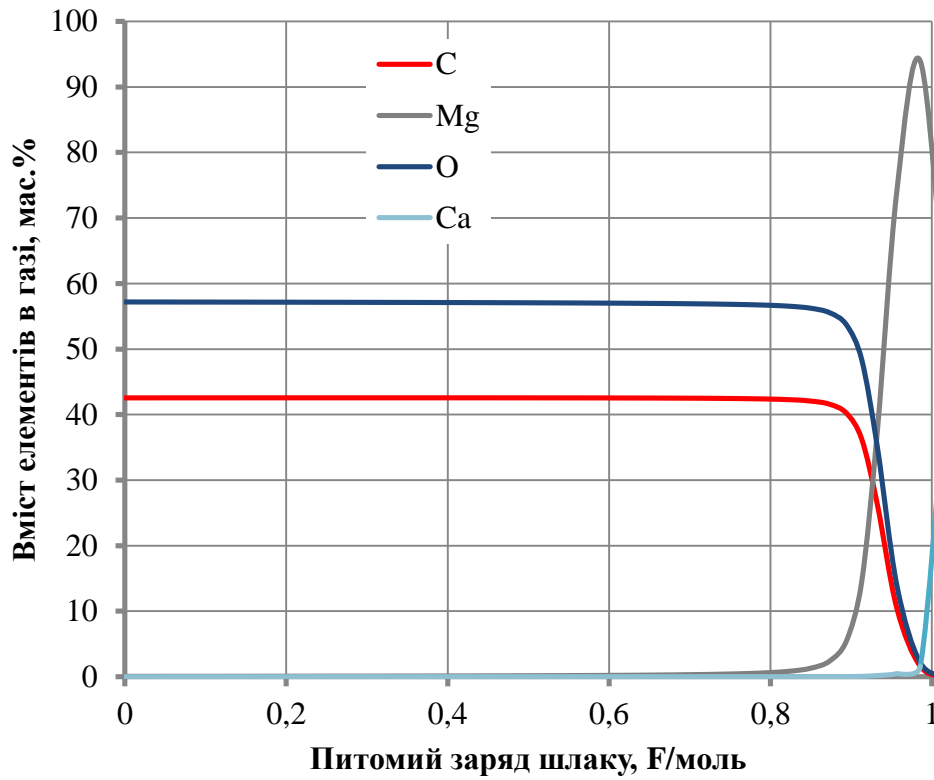
Дані, представлені на рис. 3.25 свідчать про те, що маса газової фази зростає при легуванні сталі усіх марок в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку до рівня 0,8 F/моль і вище. За цих умов відбувається випаровування із системи головним чином кальцію та магнію.

Виняток становить сталь 30MnSi4-3, при легуванні якої утворюється газова фаза навіть при відсутності позитивного заряду шлаку. В інтервалі питомого заряду шлаку 0,4..0,8 F/моль газоутворення у системі повністю пригнічується за рахунок розкислення металу.

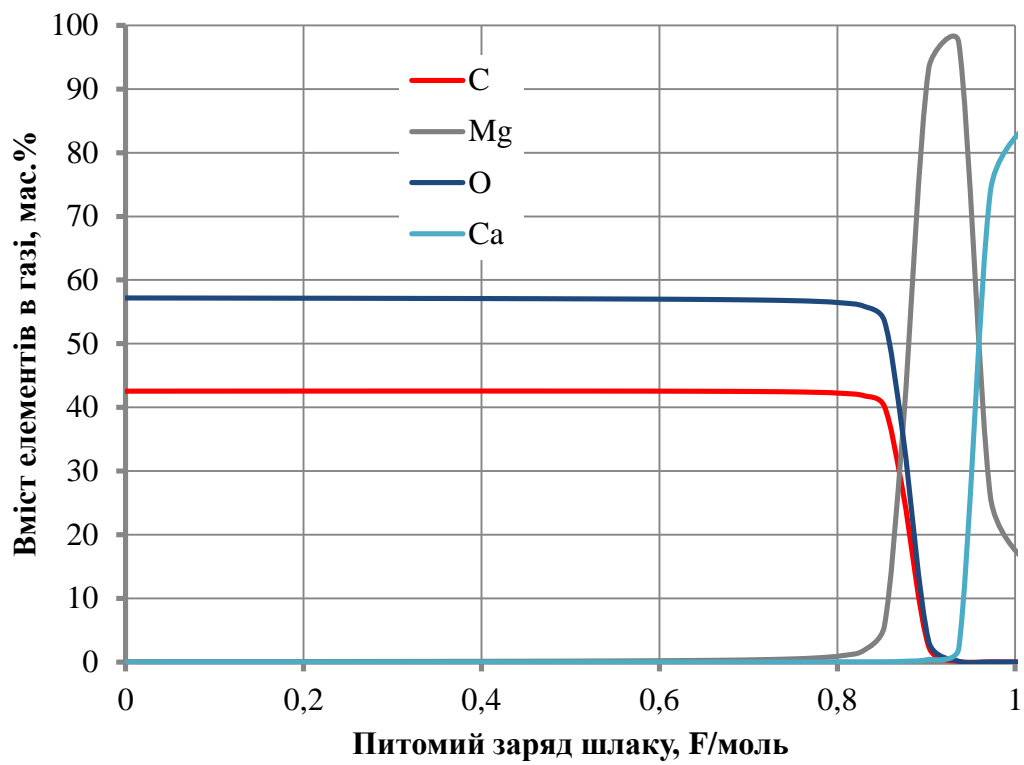
3.2.6 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газовій фазі

У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси

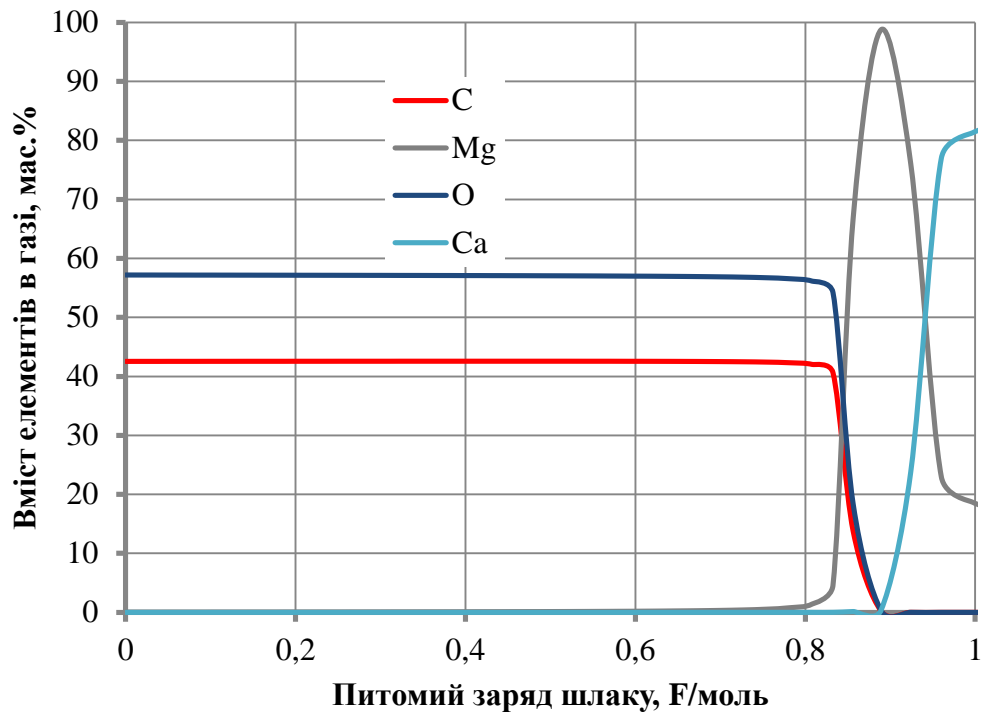
шлаку на хімічний склад газової фази за основними елементами. На рисунках 3.26–3.29 наведено відповідні результати розрахунків.



а)

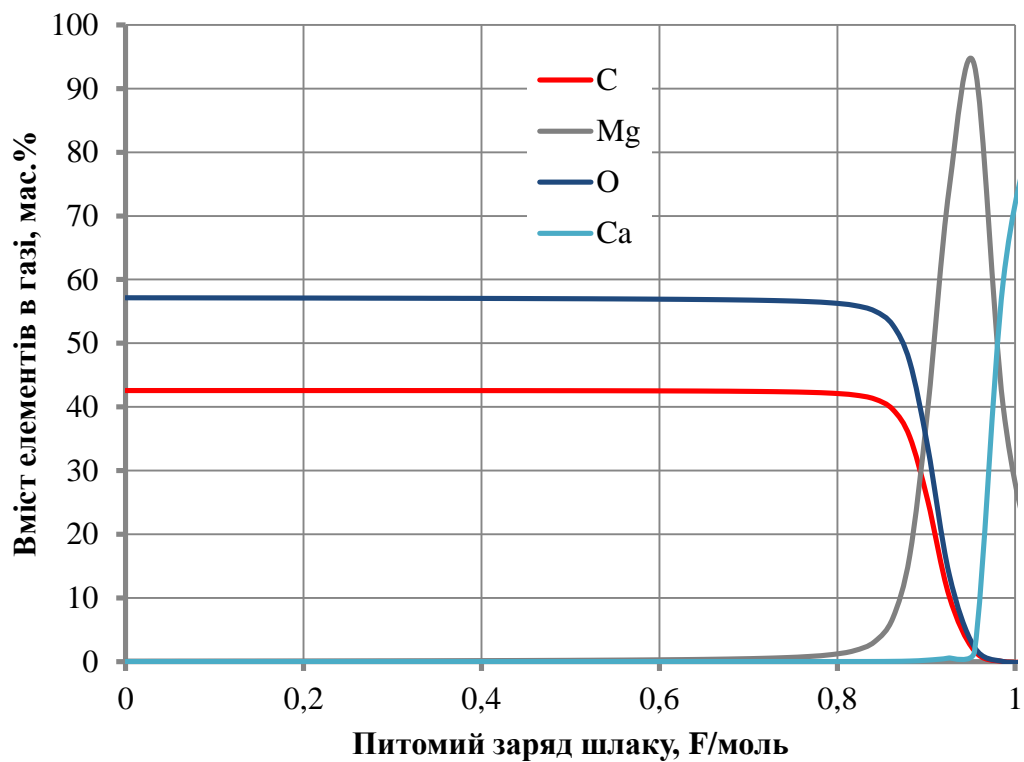


б)

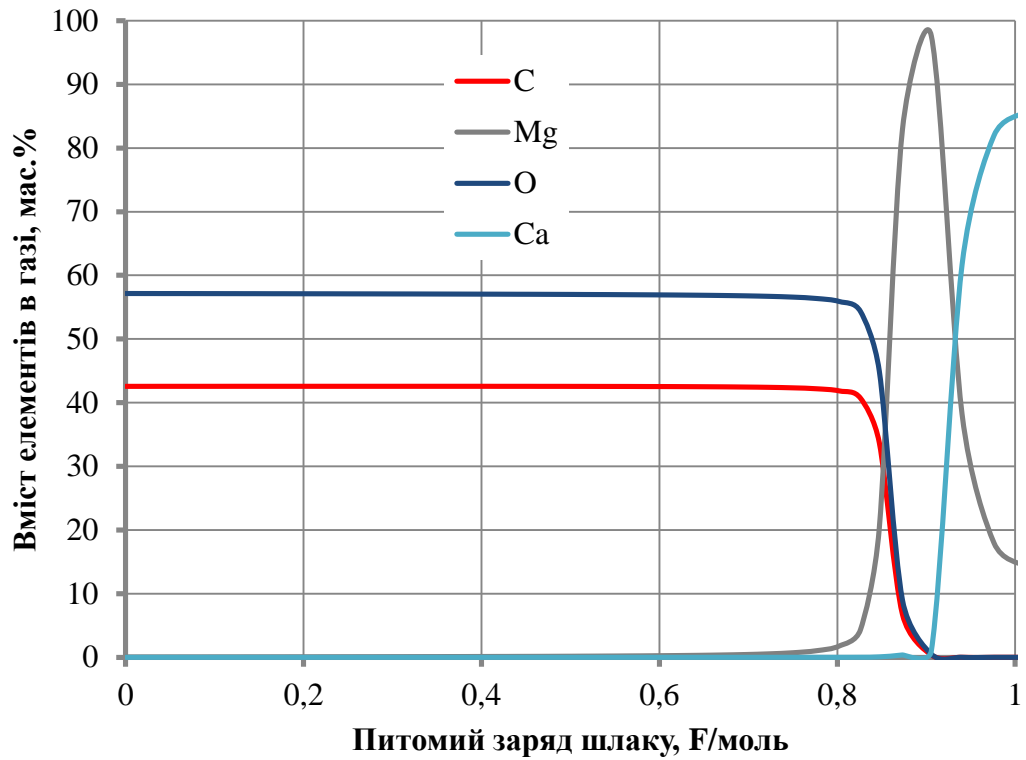


в)

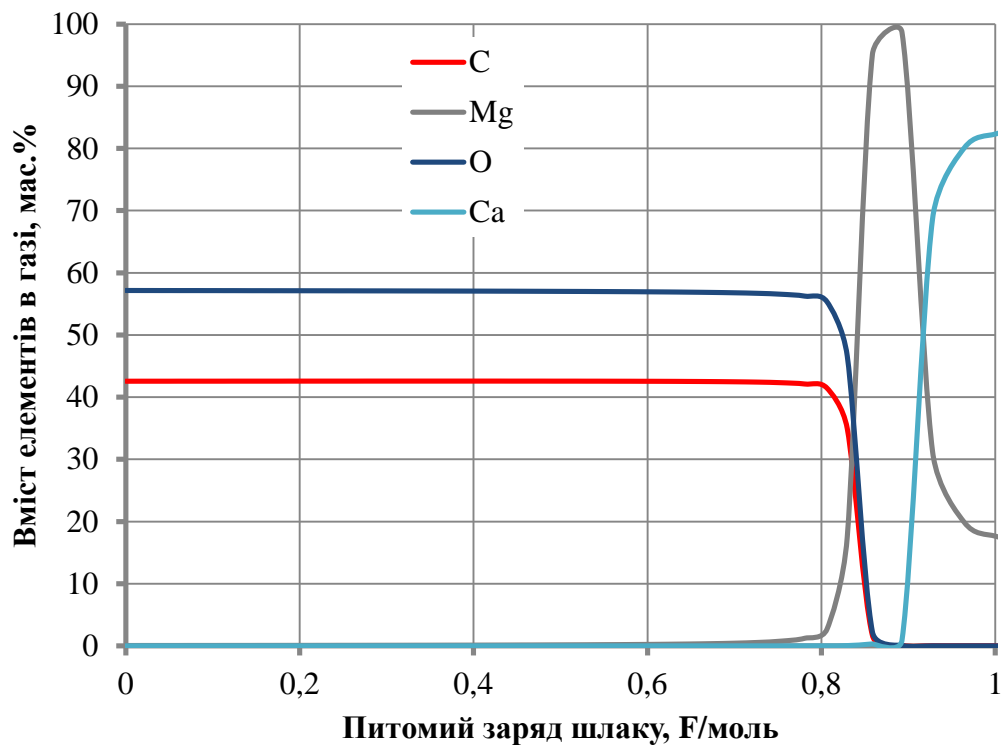
Рис 3.26 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 12MnSi4-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)



а)

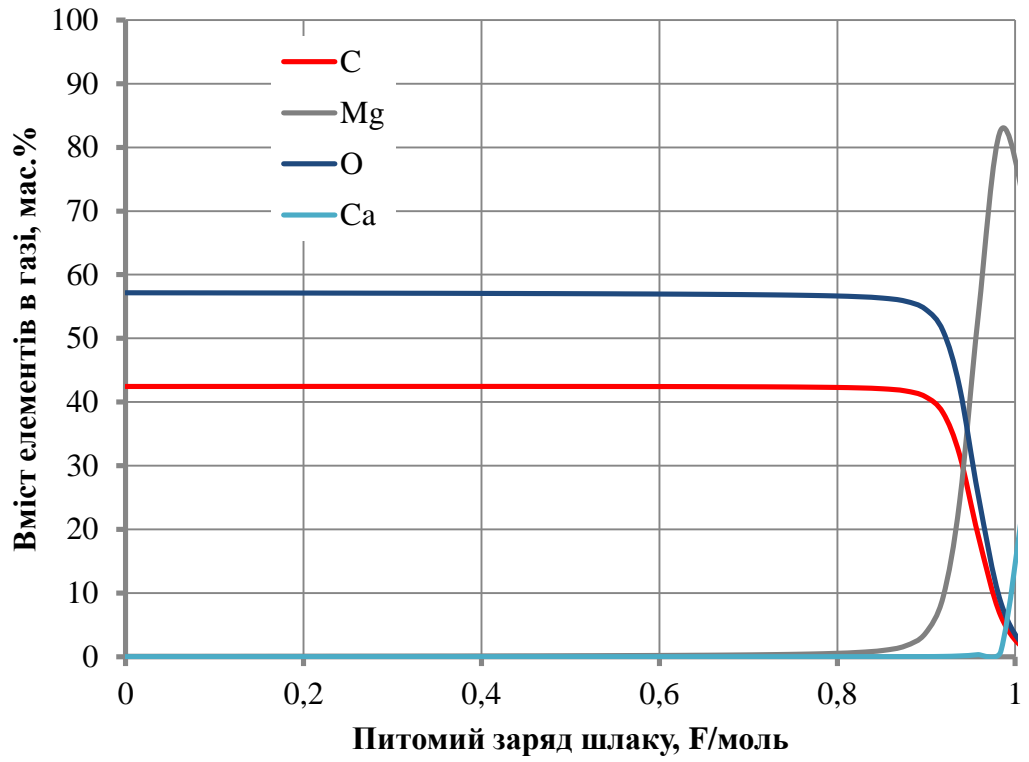


б)

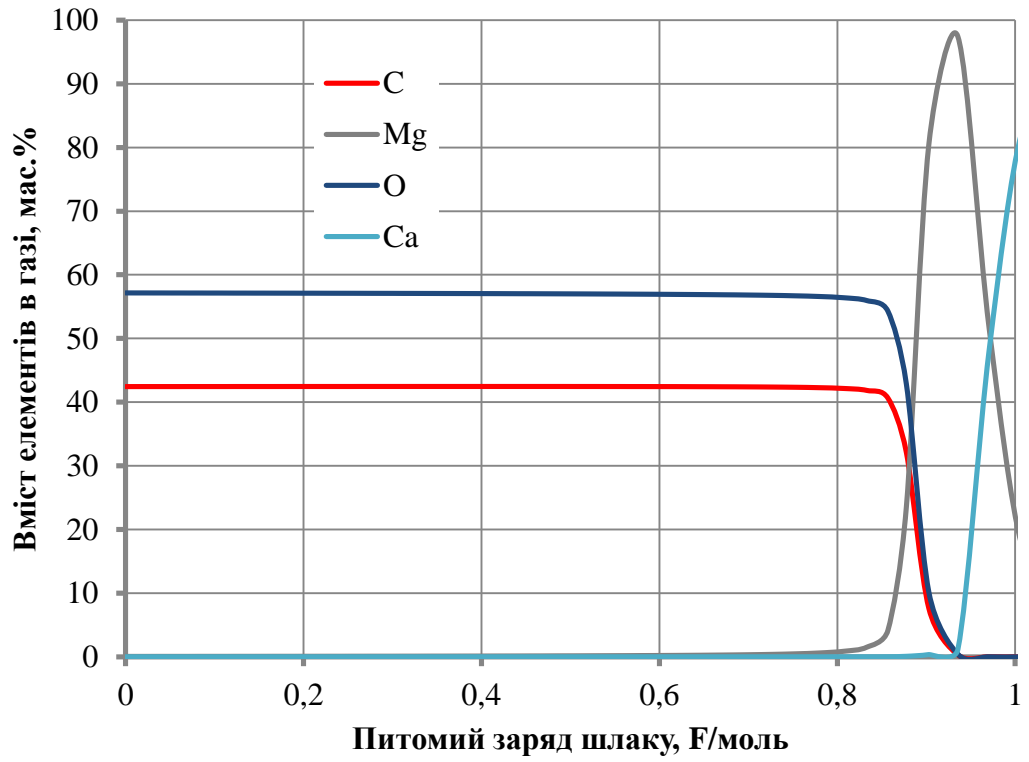


в)

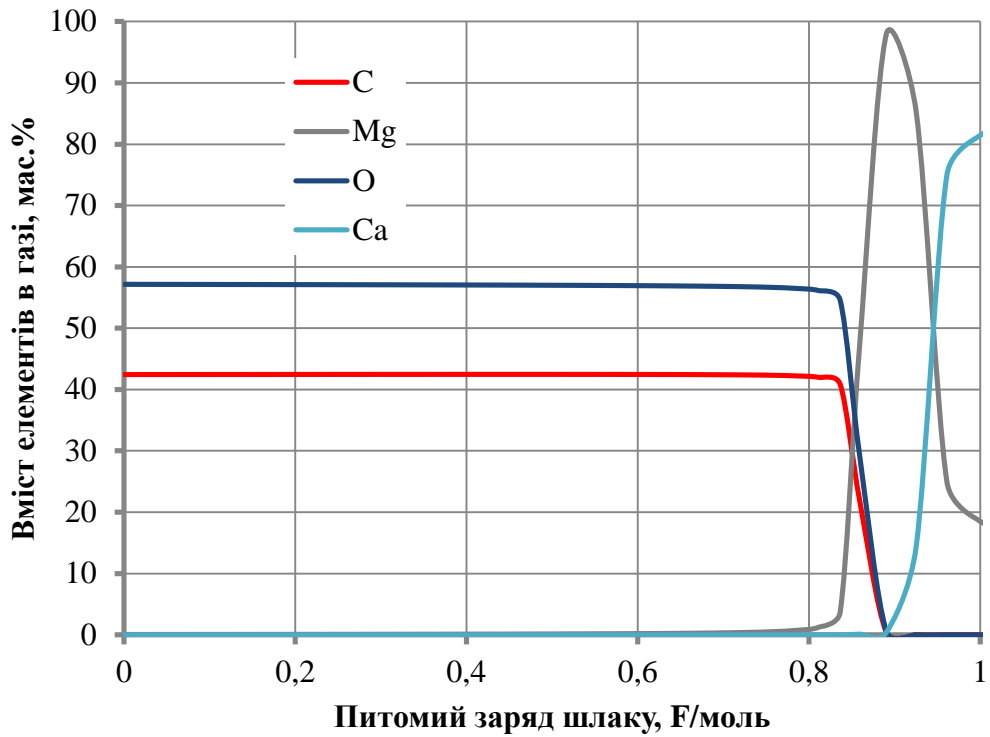
Рис 3.27 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 30MnSi4-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)



а)

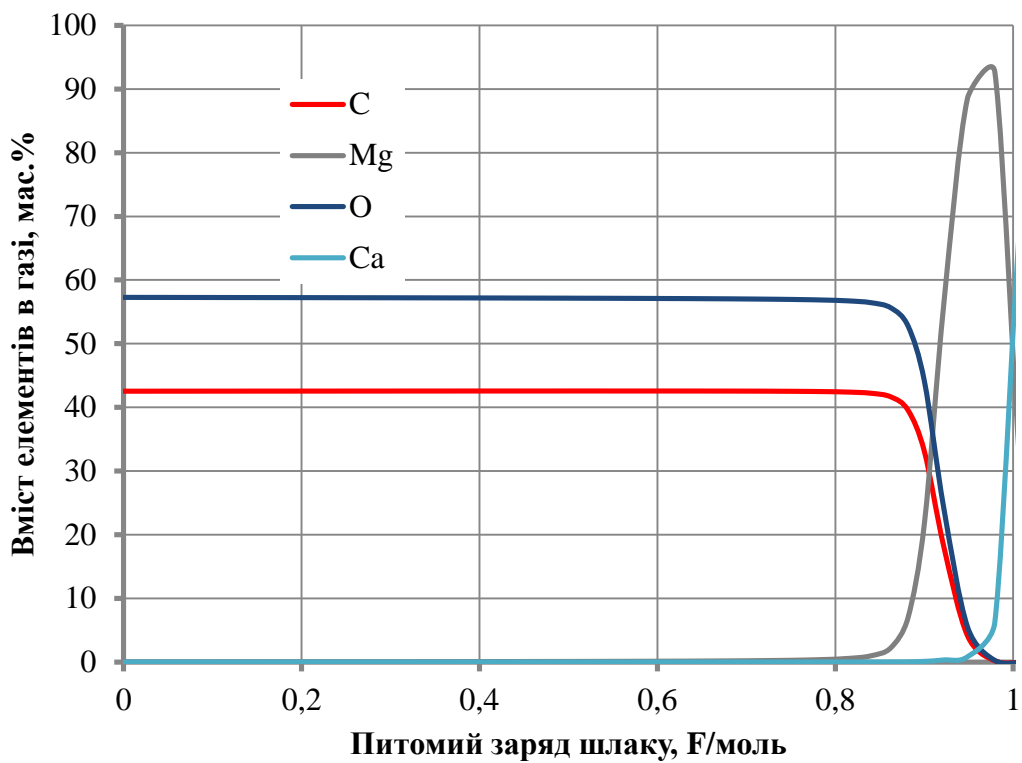


б)

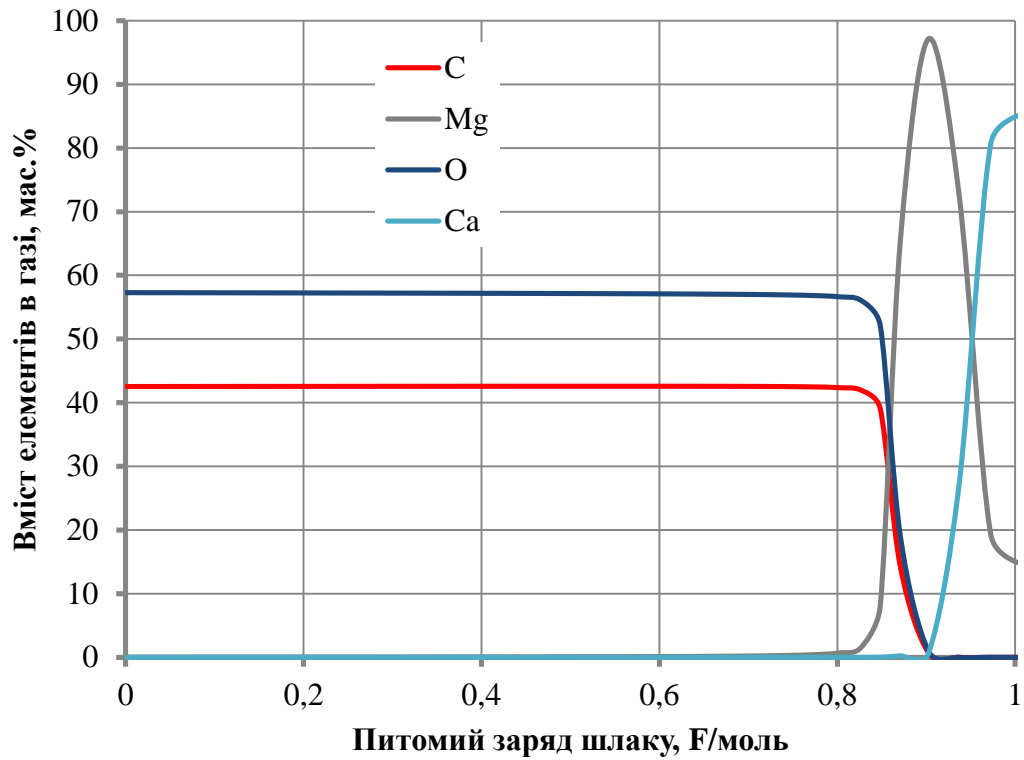


в)

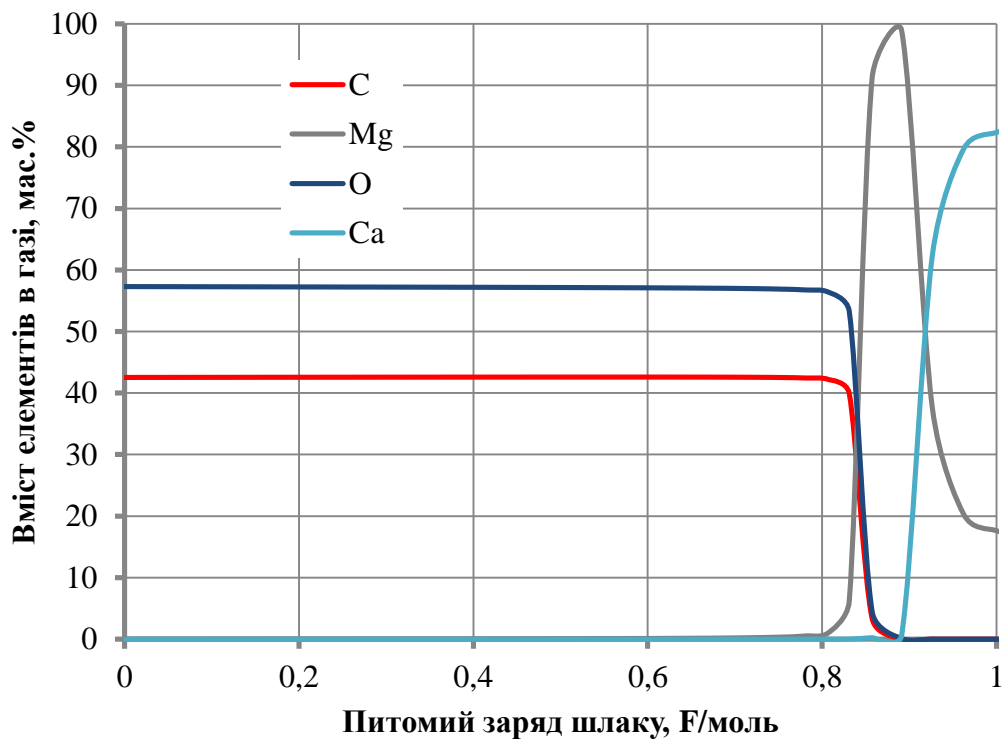
Рис 3.28 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 9MnSi6-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)



а)



б)



в)

Рис 3.29 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 14MnCrSi4-3-2 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)

Дані, представлені на рис. 3.26–3.29 свідчать про те, що склад газової фази при легуванні будь-якої сталі в процесі ВЕЛР залишається стабільним до питомого заряду шлаку $< 0,8$ F/моль. За цих умов газова фаза, якщо вона виділяється (у випадку сталі 30MnSi4-3), складається в основному з монооксиду вуглецю CO.

Склад газової фази суттєво змінюється при досягненні рівня питомого заряду шлаку $\geq 0,8$ F/моль. Цей процес супроводжується інтенсивним газоутворенням. Першими випаровуються пари магнію, які досягають максимальної концентрації при питомому заряду шлаку $\geq 0,9$ F/моль. Одночасно починає інтенсивно випаровуватись кальцій, максимум концентрації якого припадає на рівень питомого заряду шлаку $\geq 1,0$ F/моль.

3.2.7 Хімічний склад сталей

Таблиця 3.1 – Хімічний склад металу, шлаку та газу при легуванні сталі 12MnSi4-3

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 3.2 – Хімічний склад металу, шлаку та газу при легуванні сталі
14MnCrSi4-3-2

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 3.3 – Хімічний склад металу, шлаку та газу при легуванні сталі 30MnSi4-3

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 3.4 – Хімічний склад металу, шлаку та газу при легуванні сталі 9MnSi6-3

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	0,007 4	0,008 7	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

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Забезпечення техногенної безпеки на підприємствах

З метою збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі трудової діяльності, Закон України «Про охорону праці» передбачає створення на підприємстві одноіменної служби, що контролює виконання ряду заходів, спрямованих на підвищення рівня техніки безпеки на підприємстві, зокрема:

1. Затвердження положень з питань охорони праці;
2. Інструкції щодо виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на робочих місцях і будівельних майданчиках;
3. Навчання та перевірка знань з питань охорони праці;
4. Вступні інструктажі з питань охорони праці при прийнятті на роботу;
5. Організація проведення періодичного медичного огляду працівників;
6. Атестація робочих місць за умовами праці;
7. Забезпечення засобами індивідуального захисту;

В залежності від кількості працюючих на підприємстві, функції служби охорони праці може виконувати як окремий виробничий відділ так і особи за сумісництвом, які мають відповідну профільну підготовку.

Техногенна безпека – це відсутність ризику виникнення аварій та катастроф на потенційно небезпечних об'єктах, що можуть створити реальну загрозу їх виникнення.

Вимоги дотримання техногенної безпеки мають бути відповідні и нормам захисту територій і населення від надзвичайних ситуацій, охорони навколишнього середовища, забезпечення санітарно-епідеміологічного благополуччя,, пожежної, екологічної, та промислової безпеки, будівництва, охорони праці, та національним стандартам.

Загальні вимоги до організації техногенної безпеки, в установах, на підприємствах, на небезпечних територіях і організаціях регламентують «правила техногенної безпеки», затверджені наказом МВС від 05.11.2018 № 879.

Забезпечення техногенної безпеки на об'єктах здійснюється на випадок:

1. Наявності будівель і споруд із порушенням умов експлуатації;
2. Можливості впливу зовнішніх чинників — природних, соціальних, терористичних, тощо — на безпеку і діяльність об'єкта;
3. Наявності об'єктів із критичним станом виробничих фондів і порушенням умов експлуатації;
4. Виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок порушення умов експлуатації на небезпечних об'єктах, ядерних установках.

Щоб забезпечити техногенну безпеку, підприємства:

1. Виконують вимоги КЦЗ, правил техногенної безпеки, норм і стандартів щодо забезпечення техногенної безпеки, а також розпоряджень, приписів та постанов посадових осіб Державної служби України з надзвичайних ситуацій;
2. Розробляють організаційно-розпорядчі документи щодо забезпечення техногенної безпеки та постійно контролюють, чи їх дотримують;
3. Забезпечують працівників засобами колективного й засобами індивідуального захисту
4. Навчають працівників діям у надзвичайних ситуаціях;
5. Організують розроблення інженерно-технічних заходів цивільного захисту під час будівництва, реконструкції, технічного переоснащення на об'єктах, що входять до Переліку об'єктів, що належать суб'єктам господарювання, проектування яких здійснюється з урахуванням вимог

інженерно-технічних заходів цивільного захисту, затвердженого постановою КМУ від 09.01.2014 № 6;

6. Проводять навчання працівників порядку укриття в захисних спорудах цивільного захисту та навчання персоналу з обслуговування захисних споруд цивільного захисту їх утриманню відповідно до Вимог щодо утримання та експлуатації захисних споруд цивільного захисту, затверджених наказом МВС від 09.07.2018 № 579;

7. Проводять об'єктові тренування і навчання з питань цивільного захисту з урахуванням вимог техногенної безпеки.

Відповідно до “Порядку видачі дозволів на виконання робіт підвищеної небезпеки та на експлуатацію (застосування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки”, затвердженого постановою КМУ №1107 від 26.10.2011р, суб'єкти господарювання, діяльність яких пов'язана з виконанням робіт підвищеної небезпеки або експлуатацією устаткування , машин та механізмів, зобов'язані отримати дозвіл на виконання заявлених робіт та на експлуатацію в територіальному органі Держпраці за місцем державної реєстрації юридичної особи або фізичної особи - підприємця.

З метою визначення об'єктів підвищеної небезпеки серед потенційно-небезпечних, на підприємствах, у власності або користуванні яких є об'єкти, де можуть використовуватися або виготовляються, переробляються, зберігаються чи транспортуються небезпечні речовини, проводиться ідентифікація потенційно-небезпечного об'єкту.

У разі визначення потенційно-небезпечного об'єкта, за результатами проведення ідентифікації відповідно до Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки (Із змінами, внесеними згідно із Законом № 762-IV від 15.05.2003, ВВР, 2003, № 30, ст.247), як об'єкт підвищеної небезпеки, розробляється Декларація безпеки ОПН та План локалізації і ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) для кожного об'єкта підвищеної небезпеки, який вони експлуатують або планують експлуатувати.

4.2 Мікроклімат

Метеорологічні умови виробничого середовища визначаються поєднанням ряду чинників: температурою, відносною вологістю і рухливістю повітря, рівнями теплового випромінювання.

Несприятливі метеорологічні і кліматичні умови можуть викликати серйозні патологічні зміни в організмі, а також спричиняти захворювання.

Для забезпечення нормальної роботи в різні періоди року на робочих місцях встановлюються пристрої для опалення і вентиляції.

В літній період в цехах для очищення виробничого повітря і подачі чистого використовується система аерації, до складу якої входять аераційні ліхтарі.

В холодний період року у приміщеннях з постійним або тривалим перебуванням обслуговуючого персоналу встановлюються системи опалення, батареї. Ворота повинні обладнуватись повітряними і тепловими завісами з механічним приводом.

Температура повітря у цеху в теплий період року не повинна перевищувати в середньому на 5°C температуру зовнішнього повітря і бути не більше 28°C

Низька та висока відносна вологість повітря негативно впливає на здоров'я людини. Вологість повинна складати 75%, а швидкість повітря 0,5м/сек.

4.3 Склад повітря робочої зони

Гранично допустима концентрація згідно ГОСТ 12.1005-88 «Загальні вимоги до повітря робочої зони».

Таблиця 4.1. – Склад повітря робочої зони

Інгредієнт	Фактичне, мг/м ³	ГДК, мг/м ³
Пил (з домішкою діоксида кремнія)	3.8	4.0

Ангідрид сірчаний	2.66	10
Азоту оксиди	1.79	5
Оксид вуглецю	3.3	20

Склад повітря з більшості показників відповідає ГДК за ГОСТ 12.1005-88.

Для видалення забрудненого повітря пропонується застосовувати загально обмінну витяжну вентиляцію.

4.4 Виробниче освітлення

В цехах зазвичай передбачене штучне і природне освітлення. Природне сонячне світло може проникати скрізь світлові отвори.

Вибір джерела світла залежить від характеру роботи, умов середовища, розмірів приміщення. Лампи розжарювання застосовують в тих приміщеннях, де проводяться відносно грубі роботи (нормована освітленість до 50 лк), а також для місцевого освітлення. Для загального освітлення по цехах зазвичай застосовуються газорозрядні лампи, які мають бути оснащені захисними плафонами.

Природне освітлення цеху проводиться через вікна в стінах і світлові ліхтарі в даху будівлі. Коефіцієнт природної освітленості має дорівнювати 3.

На деяких робочих місцях, може існувати тільки штучне освітлення.

У разі відмови у дії робочого освітлення, для безперебійної роботи цеху, а також для безперешкодного виходу назовні в разі аварії в цехах має бути встановлено аварійне освітлення, яке підключене до незалежного джерела електроенергії.

Контроль за станом освітленості проводять за допомогою приладів – люксометрів.

4.5 Виробничий шум

Надмірний шум надає шкідливий вплив на здоров'є, сприяє виникненню травматизму і знижує продуктивність праці. Робота в умовах підвищеного шуму в перебігу всього дня викликає стомлення слухових органів. Тривала дія шуму, що перевищує допустимі норми, приводить до втрати слуху. Шум високих тонів негативно впливає на органи керування рівновагою людини в просторі. Норма шуму складає 80дБ.

Для зменшення рівнів шуму пропонується застосування засобів індивідуального захисту у вигляді антифонів і спеціальних комбінованих рукавичок з бавовняної тканини і гуми.

4.6 Виробничі вібрації

Класифікацію, гігієнічні норми вібрації, вимоги до вібраційних характеристик виробничого устаткування, включаючи і транспортні засоби, визначає ГОСТ 12.1.012-90 «Вібраційна безпека».

При частоті більше 16-20 Гц вібрація супроводиться шумом. Людина починає відчувати вібрацію при коливальній швидкості рівної 1×10^{-4} м/с, а при швидкості 1 м/с виникають больові відчуття.

Тривала дія вібрації великої частоти викликає вібраційну хворобу, вражаючу нервово-м'язову і серцеву-судинну системи людини і веде до пошкодження суглобів. При цьому може бути повна втрата працездатності. Для вимірювання вібрації в цехах використовують віброшули, що відносяться до приладів неелектричного типу.

Для захисту від вібрації і шуму пропонується:

- замінити виробничі процеси, що викликають шум і вібрації іншими менш шумними процесами;
- влаштувати спеціальні фундаменти, незалежні від конструкції будівель і що мають значну масу і акустичні шви;
- застосувати ізолюючі прокладки і амортизатори;
- застосувати звукоізолюючі кожухи для закривання особливо гучного устаткування;

- застосувати звукоізолюючі і звукопоглинальні матеріали;
- використовувати індивідуальні засоби захисту від шуму і вібрації, а також проведення заходів гігієнічного характеру;

4.7 Виробничі випромінювання

У цехах гарячої прокатки мають місце значні теплові випромінювання. За картою умов праці при санітарній нормі 140 Вт/м^2 на ділянці пресу – 245 Вт/м^2 .

Для попередження осліплювання працівників потрібно застосувати окуляри з кольоровим склом (світлофільтрами).

Для зменшення тепловипромінювання в цехах максимально знижують температуру джерел променистого тепла.

Для захисту працівників від тепловипромінювання, поряд із зменшенням інтенсивності випромінювання встановлюють між джерелами тепловипромінювання і працівниками екрани або завіси, що затримують інфрачервону радіацію, випромінювання.

При вживання порожнистих екранів з циркулюючою водою або при безперервному змочуванні водою простих екранів, виконаних з листової сталі, теплове випромінювання затримується повністю. Якщо по характеру виробництва потрібно вести спостереження за процесами, то екрани виконують з прозорих матеріалів або густої металевої сітки.

Водяні завіси у вигляді суцільної пелени води, а також водоструминної або водоповітряної завіси дозволяють зменшити дію тепловипромінювання на робочих місцях на 60-85%, причому видимість крізь завіси істотно не погіршується. Водяні завіси слід використовувати в робочих вікнах камерних печей та печей з вихідним подом або в місцях манкіровки гарячого металу.

4.8 Технічні рішення системи запобігання пожежі.

Правовою основою діяльності в галузі пожежної безпеки є Конституція, Закон України «Про пожежну безпеку».

Згідно ДСТУ 2272-93 пожежна безпека об'єкту забезпечується системою запобігання пожежі, системою пожежного захисту і заходами організаційного характеру. За всіх умов має бути забезпечена пожежна безпека об'єкту і безпека людей.

Для запобігання пожежі і вибуху в цехах необхідно дотримуватись правил пожежної безпеки. До основних умов запобігання пожежі відносяться запобігання утворенню горючого середовища і появи джерел запалення.

Джерелами горючого середовища можуть бути випарювання мастила при порушенні герметичності мастилопроводів, а також газова небезпека з боку методичних печей.

Основні небезпеки пожеж від електричних пристроїв виникають при займанні ізоляції дротів і короткому замиканні. Основною причиною займання ізоляції є перегрівання дротів. Для запобігання загорянню ізоляції і короткого замикання дротів потрібно застосовувати плавкі запобіжники або спеціальні автомати, що відключають мережу при перевантаженні.

У цехах мають бути пожежні гідранти, ящики з піском, пожежні рукави, стенди обладнані інструментом для пожежогасіння, відра, робочі місця забезпечені вогнегасником.

До організаційних заходів щодо забезпечення пожежної безпеки відносяться: пожежна охорона об'єкту спеціальними формуваннями, розробка і здійснення правил і норм пожежної безпеки, правил дотримання протипожежного режиму і встановлених заходів щодо ліквідації виниклої пожежі; навчання працівників заходам пожежної безпеки.

Пожежний захист забезпечується застосуванням негорючих або важкогорючих речовин, обмеженням кількості горючих речовин і ізоляцією горючої середовища. Також застосуванням ефективних засобів пожежогасіння, організацією безперешкодної евакуації людей, використанням засобів колективного і індивідуального захисту, застосуванням засобів сигналізації і організацією пожежної охорони.

4.9 Технічні рішення системи протипожежного захисту.

При проектуванні промислових підприємств мають бути забезпечені необхідні вимоги пожежної безпеки. До цих вимог відносяться: раціональне розміщення будівель і споруд на території підприємства з урахуванням вибухової, вибухопожежної і пожежної небезпеки технологічних процесів окремих цехів, а також з врахуванням створення оптимальних умов для запобігання поширенню і ліквідації пожеж, наявність доріг, що забезпечують безперешкодний під'їзд пожежних підрозділів у разі виникнення пожежі, раціональне розташування комунікацій з урахуванням вимог пожежної безпеки.

Протипожежні перешкоди влаштовують для запобігання поширенню пожежі. До них відносяться перекриття, що не згорають, і протипожежні стіни. Протипожежні розриви між будівлями і спорудами визначаються залежно від ступеня вогнестійкості будівель і категорії вибухопожежонебезпечності виробництва.

При виникненні аварійних ситуацій в тому числі пожежі персонал керується ПЛАС (план ліквідації аварійних ситуацій).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. При підвищенні питомого заряду шлаку вміст алюмінію в металі зростає залежно від 0,01-0,02 до 0,02-0,03% для сталі 12MnSi4-3 і 9MnSi6-3, до 0,03-0,04% для сталі 14MnCrSi4-3-2 і до 0,052-0,062% для сталі 30MnSi4-3 (без оптимізації, з додаванням вторинного алюмінію). При збільшенні маси шлаку вміст алюмінію також 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. Така поведінка алюмінію є зразком суттєвого підвищення засвоєння високоактивних легуючих елементів в процесі ВЕЛР.

За умови оптимізації легуючих матеріалів вторинний алюміній не потрібен, а вміст алюмінію повільно зростає з рівня 0,003% до досягнення питомого заряду шлаку 0,9 F/моль і сягає максимального рівня 0,015-0,017%. Втім більшу концентрацію алюмінію в сталі можна отримати, збільшуючи вміст оксиду алюмінію в шлаку.

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 та масі шлаку рівноважний вміст кремнію у сталі коливається у межах 0,68..0,82% у сталях 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2 і 30ХГС та у 1,075-1,2% у сталі 9MnSi6-3.

5. Марганець засвоюється у металі ефективніше при збільшенні маси шлаку та при достатньому питомому заряді шлаку.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патон Б.Є., Медовар Б.І., Латаш Ю.В. Електрошлаковий переплав металів та перспективи його розвитку. Вісн. АН УРСР. 1969. № 3. С. 86-91.
2. Українська радянська енциклопедія: близько 12 т.гол. ред. Бажан М. П.; редкол.: Антонов О. К. та ін. 2-ге видгяд. Київ : Головна редакція УРЕ, 1974-1985.
3. Енциклопедія сучасної України/ред. кільк.: Дзюба І. М. та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001-2022.
4. Патон Б. Є., Медовар Б. І., Бойко Г. А. Електрошлакове лиття. Київ : Наук. думка, 1981. 192 с.
5. Пономаренко А.Г. Питання термодинаміки фаз змінного складу мають колективну електронну систему. ЖФГ, 1974. Т.48. № 7. С. 668-674; №8. С. 950-958.
6. Харченко О.В., Пономаренко А.Г. Експериментальні основи термодинамічної моделі колективізованих електронів. Зб. наукових праць ДонНТУ Серія: Металургія. Вип. 66. 2003. С.17-24.
7. Храпко С.А. Термодинаміка та кінетика взаємодії фаз при позапечній обробці / Металургійна та гірничорудна промисловість. 2002. №10. З. 121-123.
8. Харченко О.В. Пономаренко О.Г., Корзун О.Л. Термодинамічна модель багатокomпонентної конденсованої фази // Металургійна та гірничорудна промисловість. 2004. № 8. С.135-139.
9. Синяков Р.В., Гуляєв М.П., Мартинов Р.М. та ін. Промислове освоєння системи управління позапечною обробкою сталі (піч-ківш-вакууматор) ДІББЗ на БМЗ. Метал та лиття України. 2005. №3-4. С. 98-100.
10. Харченко О.В. Термодинамічний моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу // Метал та лиття України. 2005. №6. З. 13-17.

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

12. Харченко О.В. Синяков Р.В. Лічконенко Н.В. Застосування методу хімічних потенціалів Гіббса у чорній металургії. *Зб. Наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2017. Вип. 2 (38). З. 20-25.

13. Харченко О.В. Синяков Р.В. Термодинамічна модель багатокомпонентної рідкої шлакової фази. *Зб. Наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2016. Вип. 2. (36). З. 16-22.

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

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

16. Харченко О.В., Кириченко О.Г., Білоконь Ю.А. та ін. Термодинаміка та кінетика процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу. *Наукові праці ЗДІА. Металургія* 2015. Вип. 1 (33). С. 9-13.

17. Харченко О.В., Лічконенко Н.В. Вторинне електротермічне легування та рафінування металу за участю газової фази. *Металургія*. 2016. Вип. 1. (35). С. 9-13.

18. Харченко О.В., Синяков Р.В. Вторинне електротермічне легування та рафінування сталі. *Зб. Наукових праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра»*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 11.04.2017. Київ. З. 1208-1218.

19. Патент України №132087. МПК. С21С 7/06 (2016.01) u201809172. Спосіб позапічної обробки сталі / Харченко О.В., Синяков Р.В., Воденніков С.О., Лічконенко Н.В.; заявл. 06.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №3.5с.

20. Камкіна Л.В., Баркалов В.С., Масленко С.М., Щеглова І.С. Хімічна термодинаміка Дніпропетровськ: НМетАУ, 2003. 75 с.

21. Харченко О.В., Сковородко О.Ю. Термодинаміка та кінетика процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу. Зб. Наукових праць ЗДІА. Металургія 2016 Віп. 1. (35) З. 1 – 6.

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

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

24. Храпко С. А., Іноземцева Є. Н., Харченко О. В. Термодинамічна модель системи метал-шлак-газ та інтегрована система "Оракул": використання для прогностичних розрахунків та управління у складі АСУТП та розробки сталеплавильних процесів. // У кн. "Тези доповідей конф. "Моделювання фізико-хімічних систем та технологічних процесів у металургії". - Новокузнецьк. - 1991. - С. 222-223

25. Пономаренко А. Г. Питання термодинаміки фаз змінного складу, що мають колективну електронну систему // ЖФГ, 1974, Т.48 № 7, С. 1668-1674; № 8, З. 1950-1958.

26. Харченко А. В., Пономаренко А. Г. Експериментальні основи термодинамічної моделі колективізованих електронів // Зб. праць ДонНТУ. – 2003. – С. 17-24.

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

28. Харченко О. В. Термодинамічний моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу // Метал та лиття України. – 2005. – №6. – С. 13-17. 12

299. Харченко О. В., Пономаренко О. Г. Про кінетику міжфазного масо-перенесення в металургійних агрегатах // Метал та лиття України. – 2002. – №12. – С. 41-42.

30. Харченко О. В. Оптимізація позапічної обробки та легування сталі на основі вирішення зворотного завдання термодинамічного аналізу // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2004. – №8. – С. 115-120.

31. Харченко О. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах управління плавкою та позапечною обробкою сталі // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2002. – №10. – С. 131-137.

32. Синяков Р. В., Гуляєв М. П., Мартинов Р. Н., Харченко О. В. та ін. Промислове освоєння системи управління позапічною обробкою сталі (підквіш – вакууматор) . – 2005. – №3-4. – С. 98-100.