МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти _____другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему____Застосування технології ВЕЛР для економії феросплавів та глибокого рафінування низьколегованої сталі_____
_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1364-мчм*

Зайцев О.С. _____
(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 _Григор'єв С. М._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 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_____2025 року

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

Зайцев Олександр Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Застосування технології ВЕЛР для економії феросплавів та глибокого рафінування низьколегованої сталі*

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 "27"_02_ 2025 року № 319-с.

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *01.12.2025*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Визначити закономірності та оптимальні режими електрохімічного легування і рафінування 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)
Презентаційний матеріал на 12 слайдах

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Літературний огляд	*Харченко О.В., доцент*		
Розрахунково-дослідницька частина	*Харченко О.В., доцент*		
Індивідуальне завдання	*Харченко О.В., доцент*		
Охорона праці та техногенна безпека	*Харченко О.В., доцент*		
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*		

7. Дата видачі завдання *07.05.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*	*30.06.2025*	
2	*Реферат*	*30.06.2025*	
3	*Літературний огляд*	*30.06.2025*	
4	*Розрахунково-дослідницька частина*	*19.11.2025*	
5	*Індивідуальне завдання*	*26.11.2025*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*30.11.2025*	
7	*Висновки*	*30.11.2025*	

Студент _____ *О.С. Зайцев*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 112 с., 3 табл., 35 рис., 26 джерел.

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

В роботі наведено результати досліджень нового способу позапічної обробки стали, заснованого на зміщенні рівноваги в системі «метал-шлак-газ» під дією позитивного електричного заряду, прикладеного до рідкого шлаку – вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР).

У розділі «Теоретичні відомості» розглянуті основи легування сталі, вплив легуючих елементів на властивості сталі, основи розкислення сталі, теоретичні основи вторинного електротермічного легування та рафінування.

У розділі «Аналіз практичного досвіду застосування технології ВЕЛР» розглянуті основні параметри ВЕЛР для технологічних операцій розкислення, легування і десульфурації рідкої сталі; наведено схему промислової установки ВЕЛР.

У розділі «Дослідження електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР» виконано дослідження впливу питомого заряду шлаку на вміст домішок і легуючих елементів в процесі вторинного електротермічного легування та рафінування низьколегованих сталей 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3. Показано, що технологія ВЕЛР дозволяє використовувати металургійні шлаки замість дефіцитних і коштовних матеріалів, що, в свою чергу, сприяє отриманню конкурентоспроможної сталі з мінімальними витратами.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуто характеристики потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника підприємства, інженерну розробку захисту від небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та заходи з поліпшення умов праці, електичної та пожежної безпеки.

ABSTRACT

Master's qualification work: 112 p., 3 tables, 35 figures, 26 sources.

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

Diploma work contains research results into a new method of LF steel processing based on the shift of equilibrium in the “metal-slag-gas” system under the action of a positive electric charge applied to liquid slag – secondary electrothermal alloying and refining (SETAR).

The section “Theoretical information” discusses the basics of steel alloying, the influence of alloying elements on the properties of steel, the basics of steel deoxidation, and the theoretical basics of secondary electrothermal alloying and refining.

The section “Analysis of practical experience in the application of SETAR technology” discusses the main parameters of SETAR for technological operations of deoxidation, alloying, and desulfurization of liquid steel; diagram of an industrial SETAR installation is provided.

In the section "Study of electrochemical alloying and refining of steel in the SETAR process", a study of the influence of the specific charge of slag on the content of impurities and alloying elements in the process of secondary electrothermal alloying and refining of low-alloy steels 12MnSi4-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 was carried out. It was shown that the SETAR technology allows the use of metallurgical slags instead of scarce and expensive materials, which, in turn, contributes to the production of competitive steel with minimal costs.

In the section "Occupational health and safety" the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting the employee of the enterprise, engineering development of protection against dangerous and harmful factors of the production environment and measures to improve working conditions, electrical and fire safety are considered.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ 10
1.1 Загальна характеристика легування та рафінування сталі в установках ківш-піч 10
1.2 Теоретичні передумови розробки технології ВЕЛР 15
1.3 Крива електричної нейтральності 16
1.4 Теоретичні основи ВЕЛР 18
1.5 Вибір питомої величини заряду шлаку 19
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 22
2.4 Кінетика відновлення елементів в процесі ВЕЛР 28
2.5 Висновки 31
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР 33
3.1 Програмний комплекс «Excalibur» в дослідженні електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР 33
3.2 Обчислювальний експеримент 34
3.2.1 Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість 34
3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі 47
3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку 71
3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку 91
3.2.5 Вплив питомого заряду шлаку на масу газової фази 94
3.2.6 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газовій фазі 96
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 104
4.1 Забезпечення техногенної безпеки на підприємствах 104

4.2 Мікроклімат 107
4.3 Склад повітря робочої зони 107
4.4 Виробниче освітлення 108
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 109
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 110

ВСТУП

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

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

Предмет дослідження: вплив питомого заряду шлаку на засвоєння елементів зі шлаку у метал та десульфурацію і розкислення сталі.

Методи дослідження: Термодинамічний аналіз системи «метал-шлак-газ», 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 апробація 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 коштовних матеріалів, що підвищують вартість сталі.

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

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, включених до кваліфікаційної магістерської роботи, були опубліковані в Матеріалах Міжнародній науково-технічній конференції «Матеріалознавство та сучасні технології» 25-26 вересня 2025р., м. Харків, Україна; Збірнику наукових

праць студентів, здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених «Молода Наука – 2025», т.5, с. 317-318 [25]; Матеріалах II Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М.Потебні ЗНУ "Інженерні інновації та розбудова національної економіки", 15–16 травня 2025 року, м. Запоріжжя, Україна, с. 457-458 [26].

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг роботи становить 112 сторінок, 3 таблиці, 35 рисунків, 26 джерел посилання.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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

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

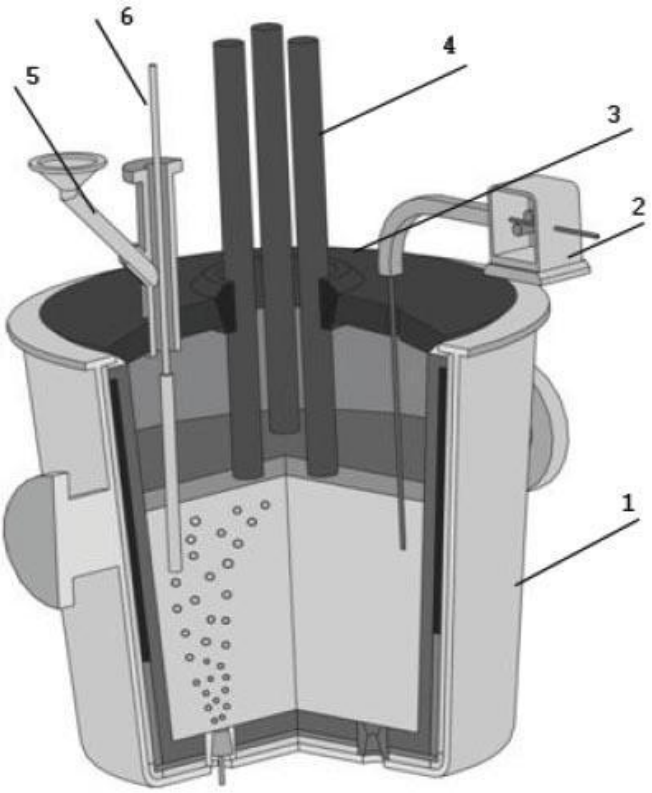
Процес рафінування в сталерозливному ковші з використанням підігріву металу електричною дугою отримало широке поширення при позапічній обробці сталі, розробленої у 1971 році фірмою Daido Steel (Японія). Установка, де реалізується цей процес, отримала назву «Агрегат ківш-піч» (АКП).

Агрегат ківш-піч використовується в комплексі з плавильними агрегатами, в яких виплавляється напівпродукт. В якості таких агрегатів використовуються мартенівські печі, дугові та кисневі конвертери, в яких проводяться розплавлення феросплавів з малим вигаром і металобрухту та проводиться окисний період. По можливості виключаючи попадання в нього пічного шлаку метал зливають у стальківш. До та під час випуску металу в ківш віддаються розкислювачі, шлакоутворюючі 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 дозують матеріали за вагою). Нагрів металу на АКП здійснюється також, як і в дугових печах (ДСП), але потужність трансформаторів установок ківш-піч значно менше, ніж використовується на дугових печах і становить 100-160 кВА/т. Це пояснюється відсутністю такої енерговитратної стадії, як розплавлення брухту, а тепло витрачається тільки на розплавлення додаваних матеріалів і

підтримання температури металу. Крім того, 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 того, продування металу сприяє виведенню неметалевих включень і шкідливих газів з металу. Вдування газу здійснюється через пористі пробки, від однієї до трьох штук на великотонажному ковші. Також можливе електромагнітне перемішування металу .



1 - сталерозливний ківш; 2 - трайб-апарат; 3 - склепіння агрегату ківш-піч; 4 - графітовані електроди; 5 - вирва подачі сипучих, 6 - аварійна фурма.

Рисунок 1.1 – Загальна схема установки 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/кВтг, а витрати електричної енергії – 0,3-0,6 кВтг/т/град. Більше того, на практиці переконливо доведено високу конкурентоспроможність агрегатів ківш-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°С за хвилину.

Сучасний агрегат ківш-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 таке інше [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. Легуючі елементи вводять у різних кількостях і поєднаннях в основному у вигляді спеціальних сплавів (феросплавів) [2].

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. 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 з метою поліпшення їх властивостей. При виробництві виливків необхідно очистити метали і сплави від небажаних газів, що містяться в них, шкідливих елементів, неметалевих включень. Очищають розплави матеріалів шлаками, що вдуваються у вигляді порошків, продуванням аргоном, застосовують електрошлаковий і електронно-променевий переплави. Найбільше застосування набуло рафінування металу шлаком.

Питання можливості використання установок ківш-піч 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 [3] було показано, що коефіцієнт розподілу сірки (S)/[S] змінювався більш ніж у два рази при зміні полярності прикладеної до електродів напруги. Однак відсутність адекватних фізико-хімічних моделей багатокомпонентних систем «метал-шлак-газ»» не дозволяло ефективно управляти цим процесом і залишало лише емпіричні можливості для розробки окремих технологічних процесів, 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 О. Г. Пономаренка [4] вперше було введено електрохімічну поправку, або електронний вклад у логарифм активності шлаку у вигляді доданку $\mu\nu_i$, (ν_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» та «окислювально-відновним потенціалом» системи «метал-шлак» [5]. У роботі [6] стверджувалося, що μ є нічим іншим, як невизначеним множником Лагранжа при розв'язання задачі мінімізації енергії Гіббса системи «метал-шлак» за додаткової умови електронейтральності шлакової фази. У роботі [7] 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 $\mu\nu_i$ 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: Білоруському 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 фаз [7] 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.

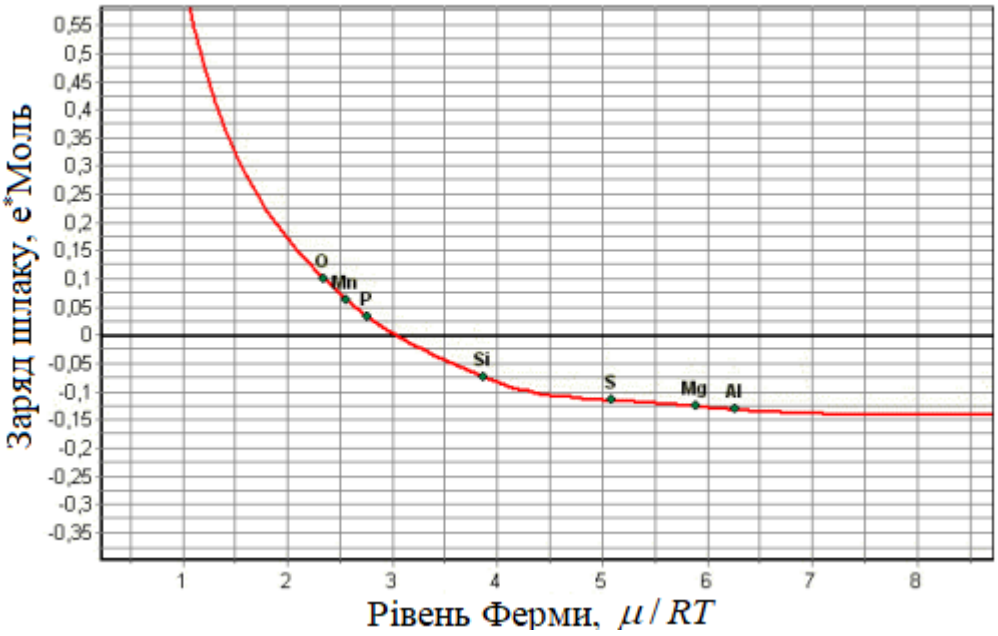


Рисунок 1.2 – Фрагмент кривої електронейтральності

У координатах «Заряд шлаку, е*Ммоль – «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 Збільшення 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 [11, 12] 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 [13-18]. Було показано, що використання методу ВЕЛР для легування низьколегованої сталі в модернізованих установках ківш-піч 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 десульфурації 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 [14] 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.

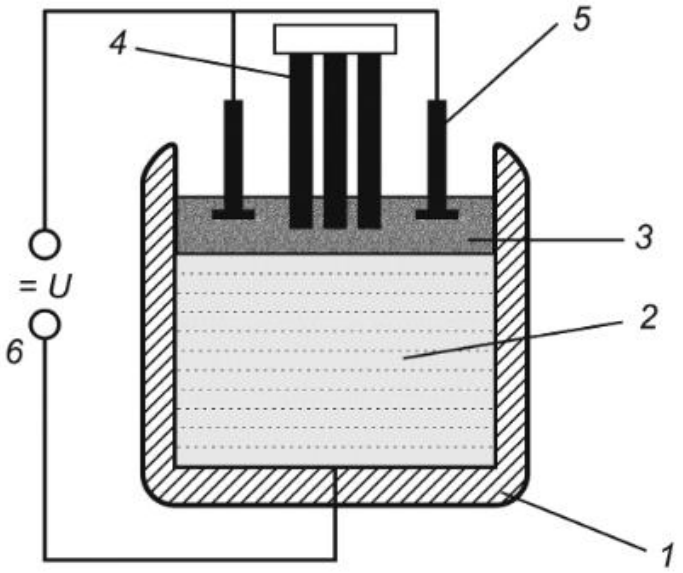
1.5 Вибір питомої величини заряду шлаку

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 [13, 18]. На рідкий шлак 3 через графітовані електроди спеціальної форми 5 подається постійне напруга від джерела 6. Передбачається, що метал в печі-ковші постійно перемішується шляхом продувки інертним газом.



1 – кожух установ- ки ківш-піч; 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 [19].

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 металлу	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	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 10\%(MnO)$ $(SiO_2),(Cr_2O_3)$ $\geq 5\%(Al_2O_3)$	$\Delta[Mn] = 0{,}15,...0{,}30\%$ $\Delta[Si] = 0{,}10,...0{,}50\%$ $\Delta[Cr] = 0{,}15,...0{,}30\%$ $\Delta[Al] = 0{,}01...0{,}10\%$
Легування Ca, Mg	0,8…1,2	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 20\%(CaO)$ $\geq 5\%(MgO)$	$0{,}035....0{,}35\%(Ca)$ $0{,}020....0{,}030\%(Mg)$

Термодинамічний моделювання ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність даного процесу і добре узгоджується з отриманими раніше результатами експериментальних

досліджень. У залежно 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 стали 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% SiO_2 10% MnO, 45% CaO, 3% MgO, 1,5% Al_2O_3, 0,3% S і 0,2% P_2O_5; 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 за температури 1600 ^{o}C.

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.

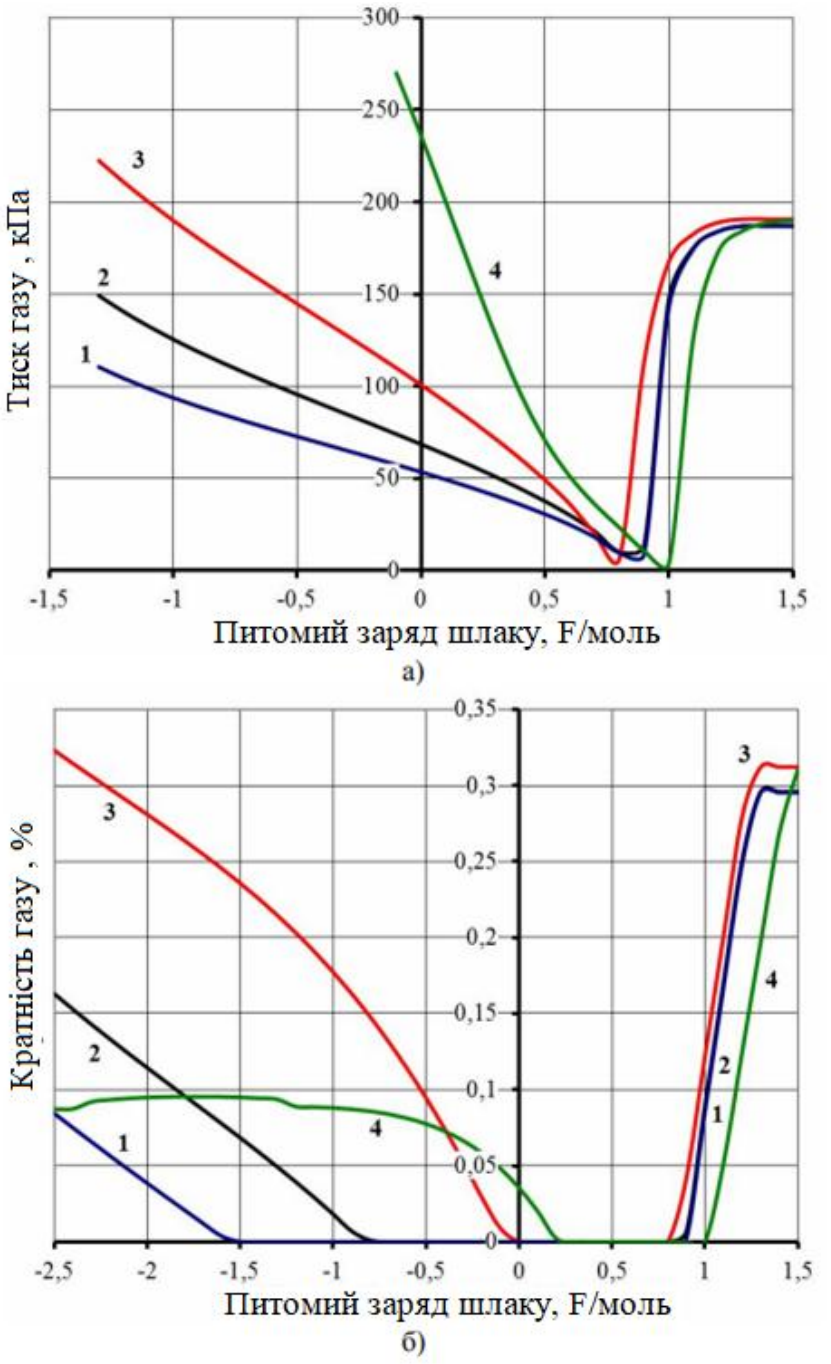


Рисунок 2.2 - Вплив питомого заряду шлаку на тиск (а) та кратність (б) газової фази: 1 - 9MnSi6-3, 2 - 12MnSi4-3, 3 - 30MnSi4-3, 4 - напівпродукт

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 CO в лівій гілки кожної кривої і парціальний тиск парів Ca 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 CO 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 шлаків.

Очевидно, що відносно високий парціальний тиск парів кальцію не дозволяє отримати високий його вміст сталі при звичайному атмосферному тиску, так що 0,04% Ca 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 CaO 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 зміст 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 неэлектронейтральной 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 стали 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.

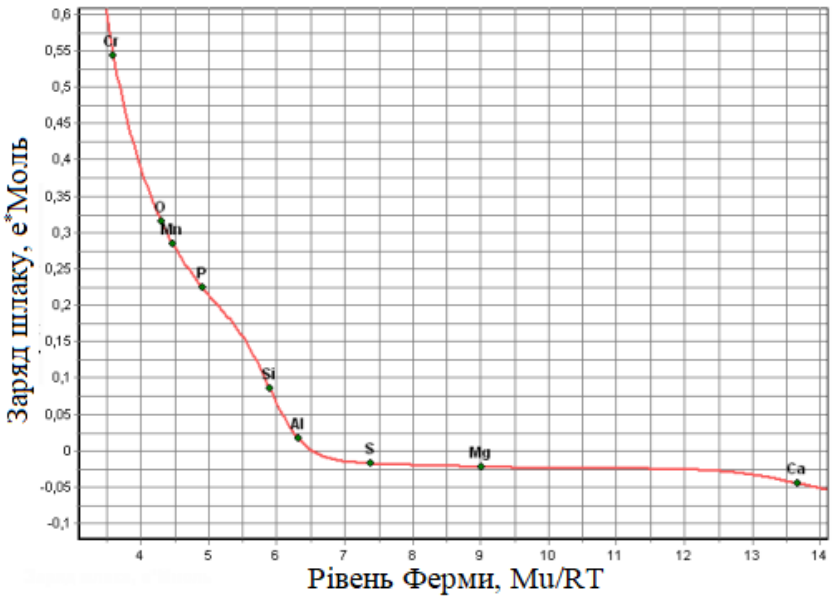


Рисунок 2.3 - Фрагмент кривої електронейтральності при доданому заряді до шлаку 0,05 од. Фарадея при ВЕЛР сталі 14MnCrSi4-3-2

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

Система рівнянь, що описують термодинамічну рівновагу в системі «метал-шлак» в умовах ВЕЛР, відрізняється від традиційної, описаної, наприклад, у роботі [10], тим, що рівняння електронейтральності у правій частині містить заряд шлаку Q, виражений в одиницях постійної Фарадея (F):

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

де $n_{(i)}, v_i$ – відповідно число молей і валентність i-го елемента в шлаку; k – число хімічних елементів, що складають 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 :

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

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

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

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 десульфурація металу та монотонне зниження в ньому вмісту сірки. Вміст кисню у металі знижується до рівноважного значення 0,007% без помітних особливостей.

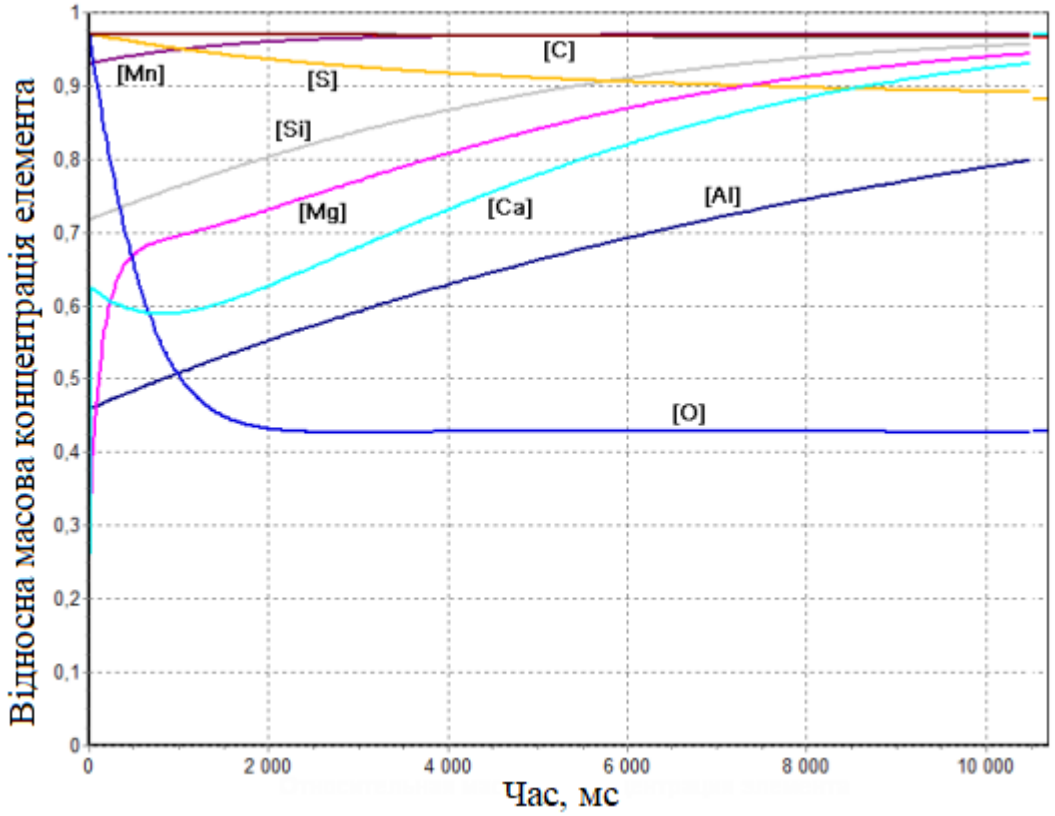
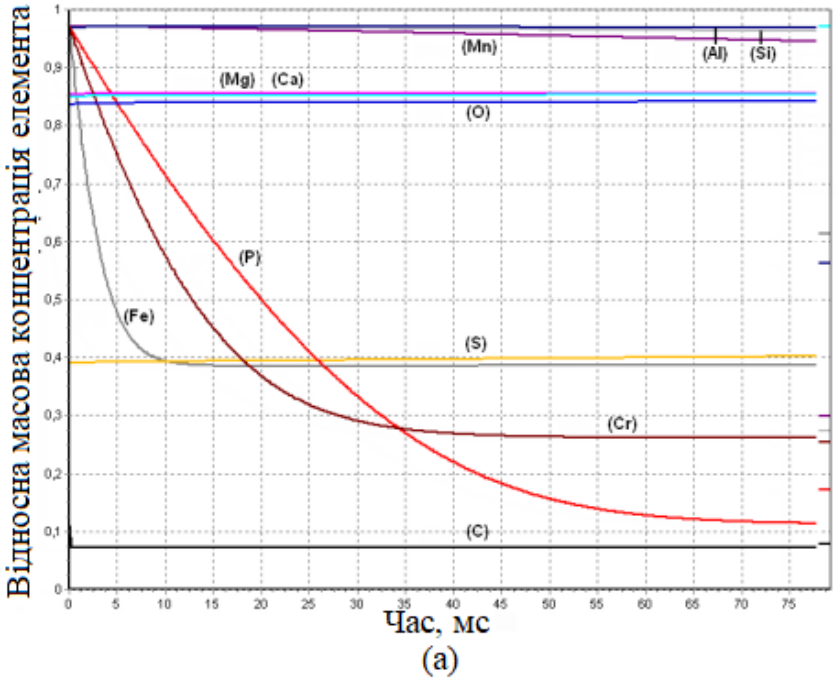
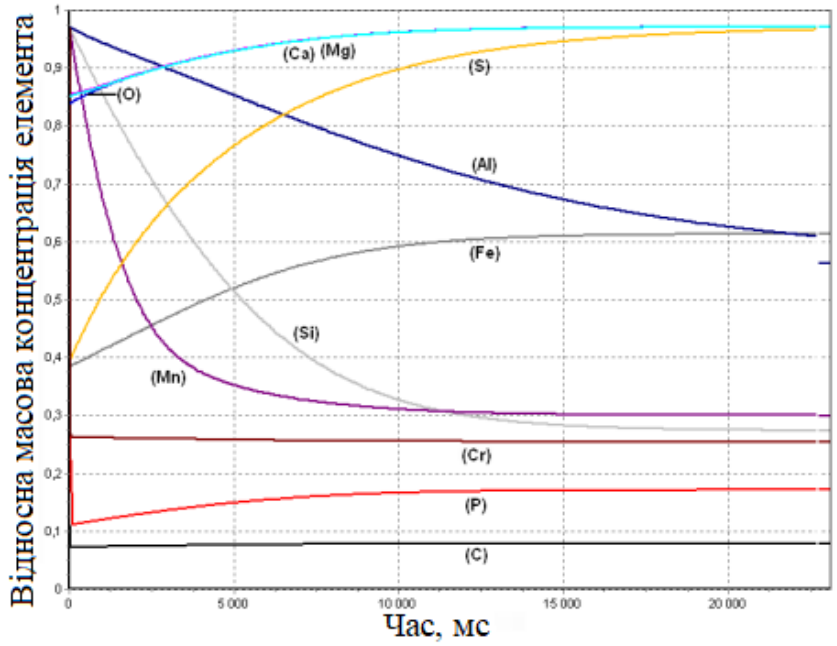


Рисунок 2.4 - Траєкторії руху до рівноваги концентрації елементів у металі в процесі ВЕЛР стали 14MnCrSi4-3-2

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 (сталь 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 випливає 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 стали 14MnCrSi4-3-2

М/Ш	Вміст хімічних елементів в металі та шлаку, масс.%										
	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 проєктувати 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 утворенню 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 стали 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 полярності електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може застосовуватися як власне для розкислення-легування та десульфурації, так і для окислювального рафінування та зневуглецювання 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.

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

При виконанні обчислювально-експериментального моделювання процесу ВЕЛР був використаний спеціалізований багатофункціональний навчально-дослідницький програмний комплекс «Excalibur» [20], який є розвитком програмних комплексів «Форвард» [21] і «Оракул» [22]. В ПК «Excalibur» реалізовані облік кінетичного запізнювання [23] і метод фазових операторів [24]. Головна форма ПК «Excalibur» показана на рис. 3.1.

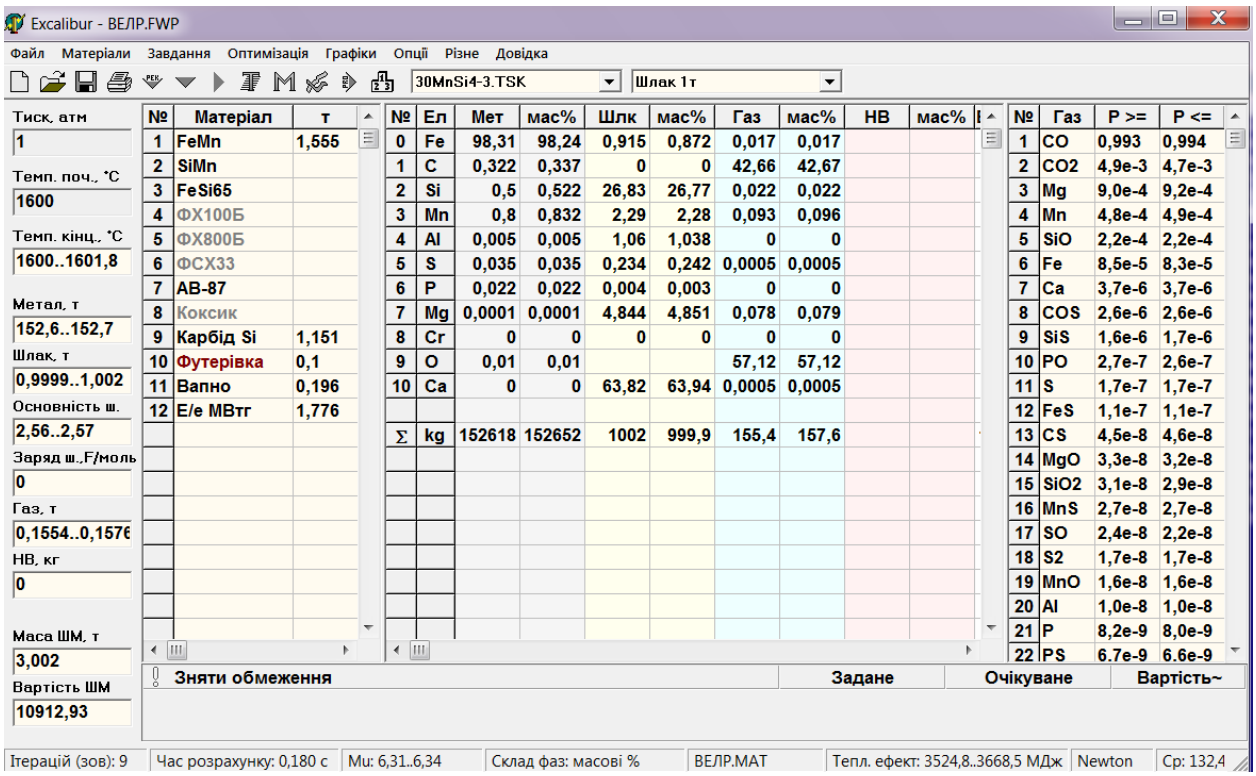
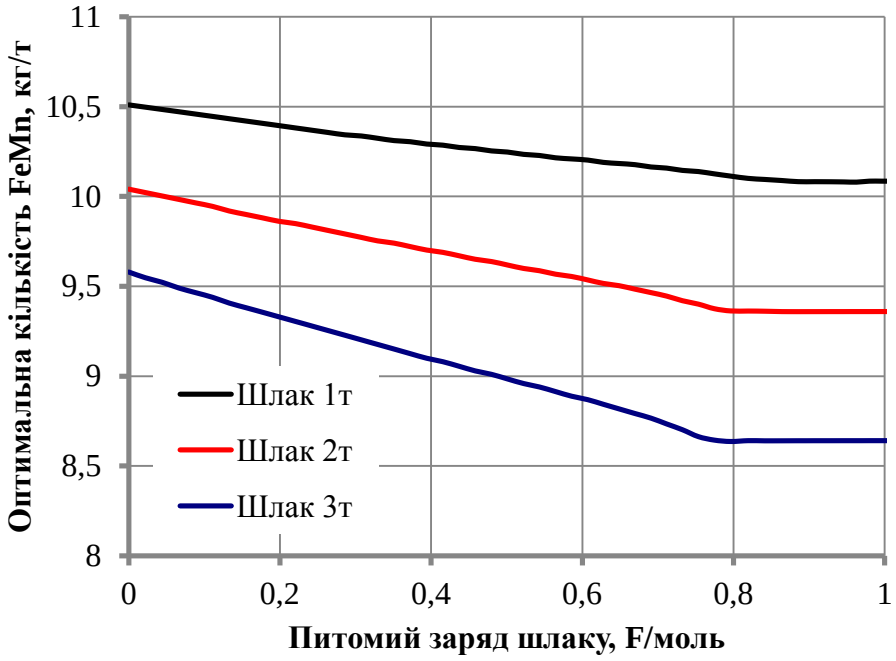


Рис. 3.1 – Загальний вигляд головної форми ПК «Excalibur»

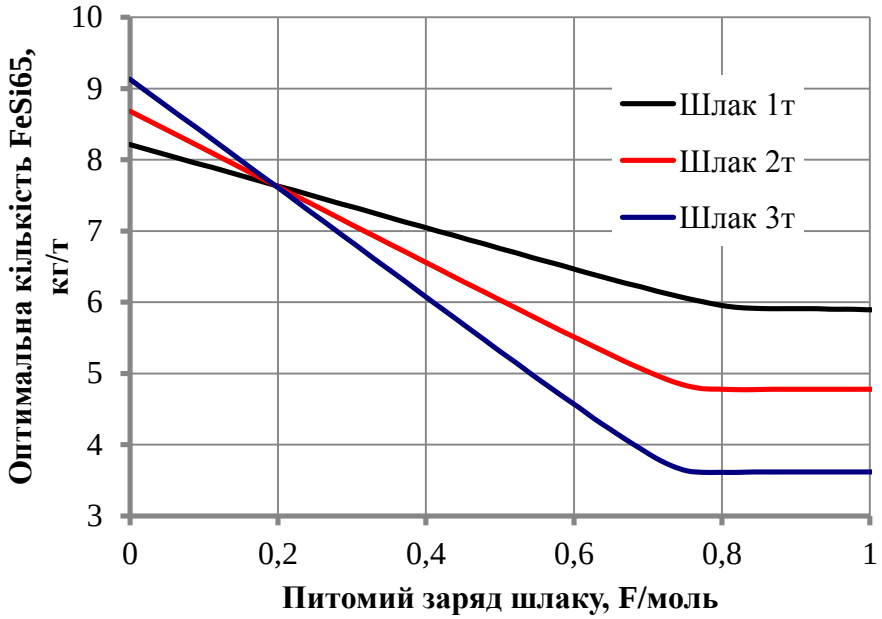
3.2 Обчислювальний експеримент

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

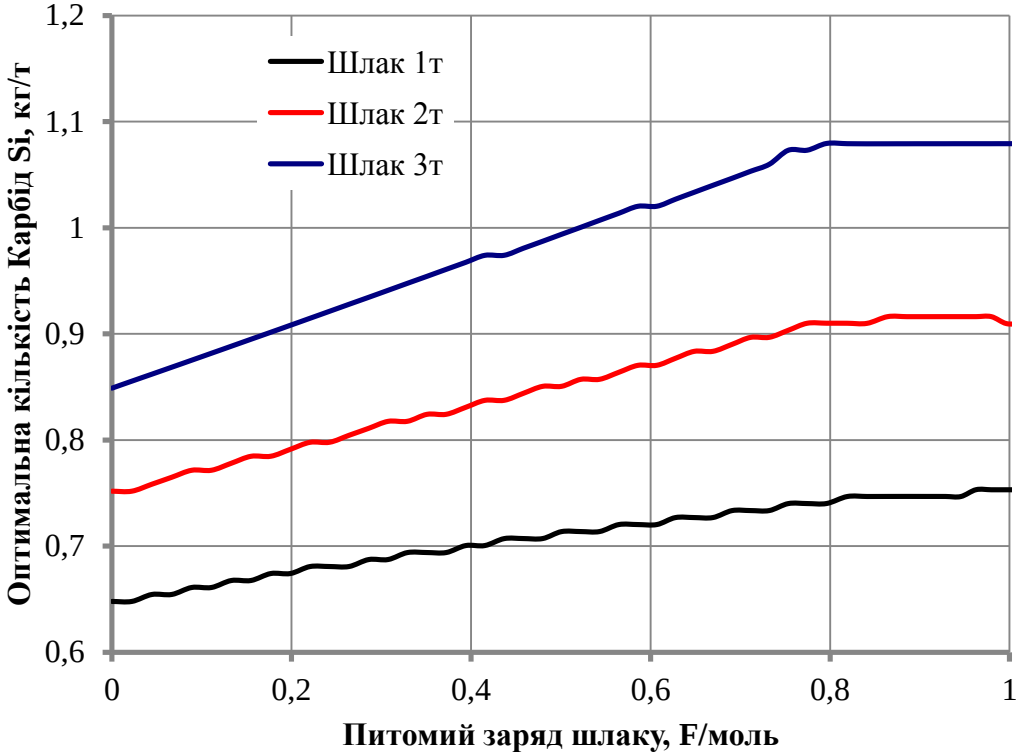
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 9MnSi6-3, 14MnCrSi4-3-2, 30MnSi4-3. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів ті їх загальну вартість. На рис 3.3 – 3.6 наведено результати розрахунків.



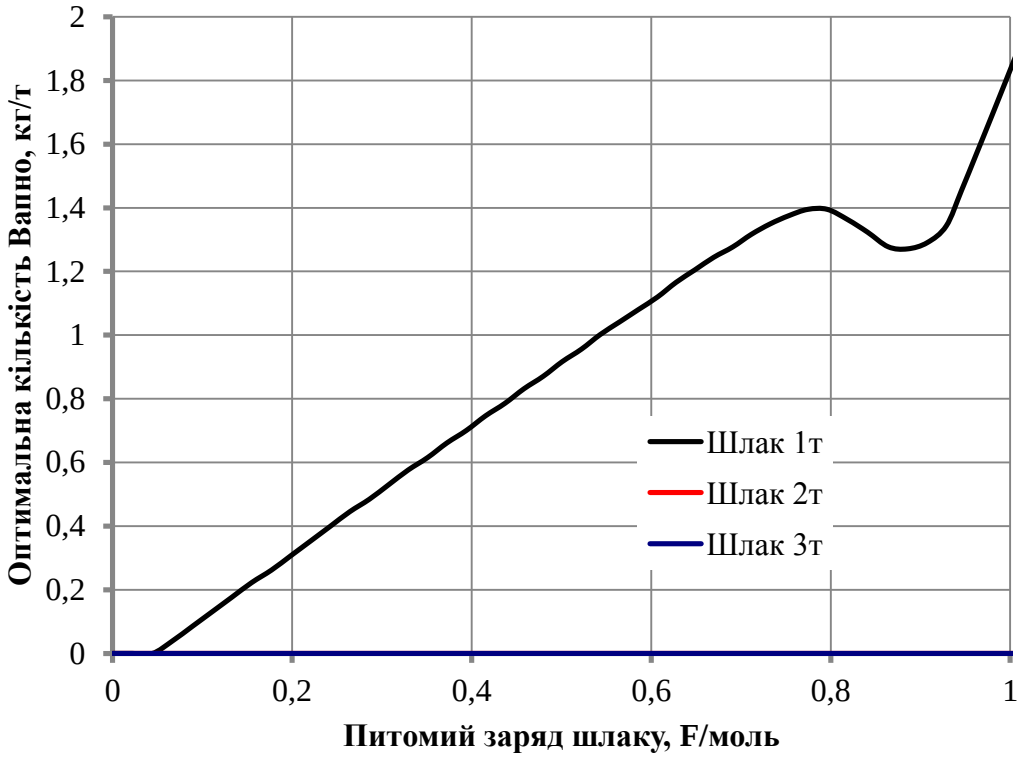
а)



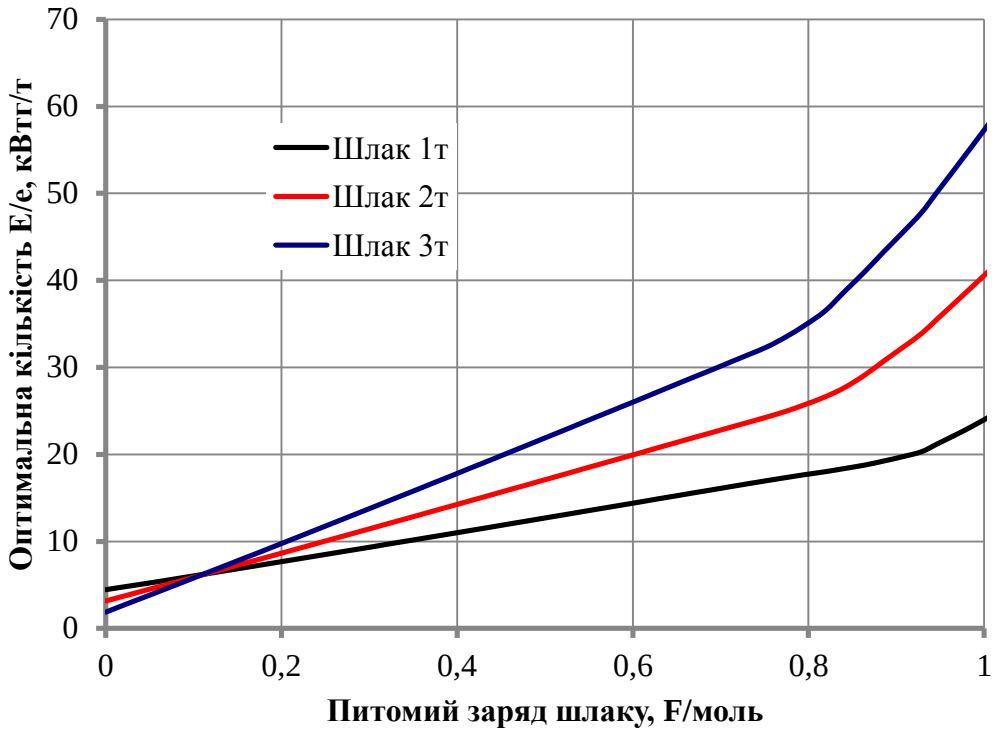
б)


Оптимальна кількість Карбід Si, кг/т
1,2
1,1
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

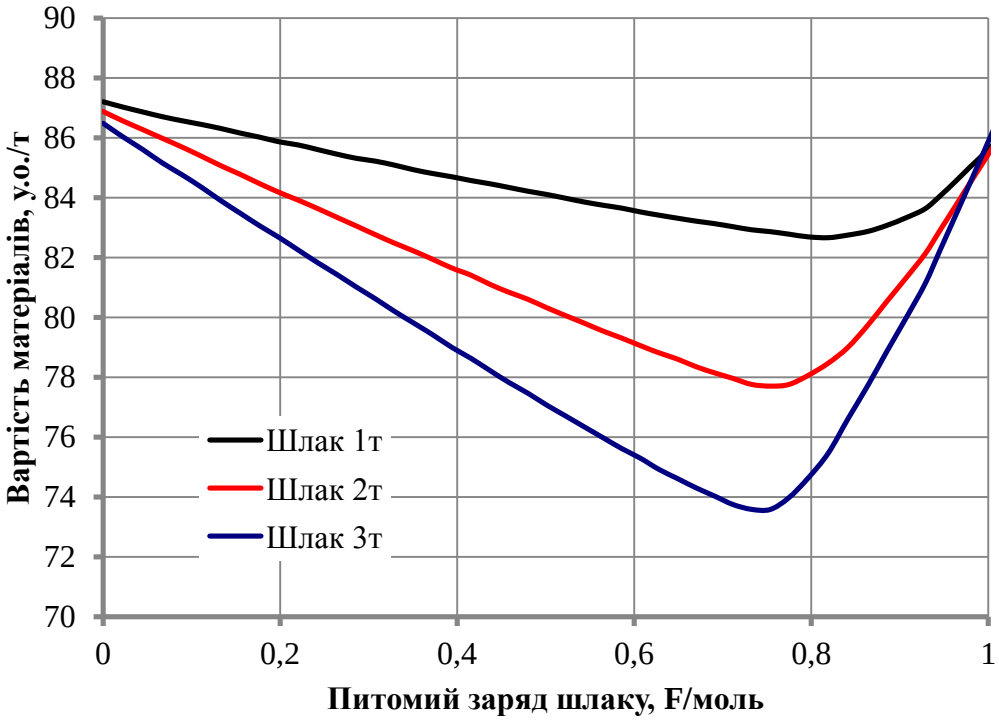
в)


Оптимальна кількість Вапно, кг/т
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

г)

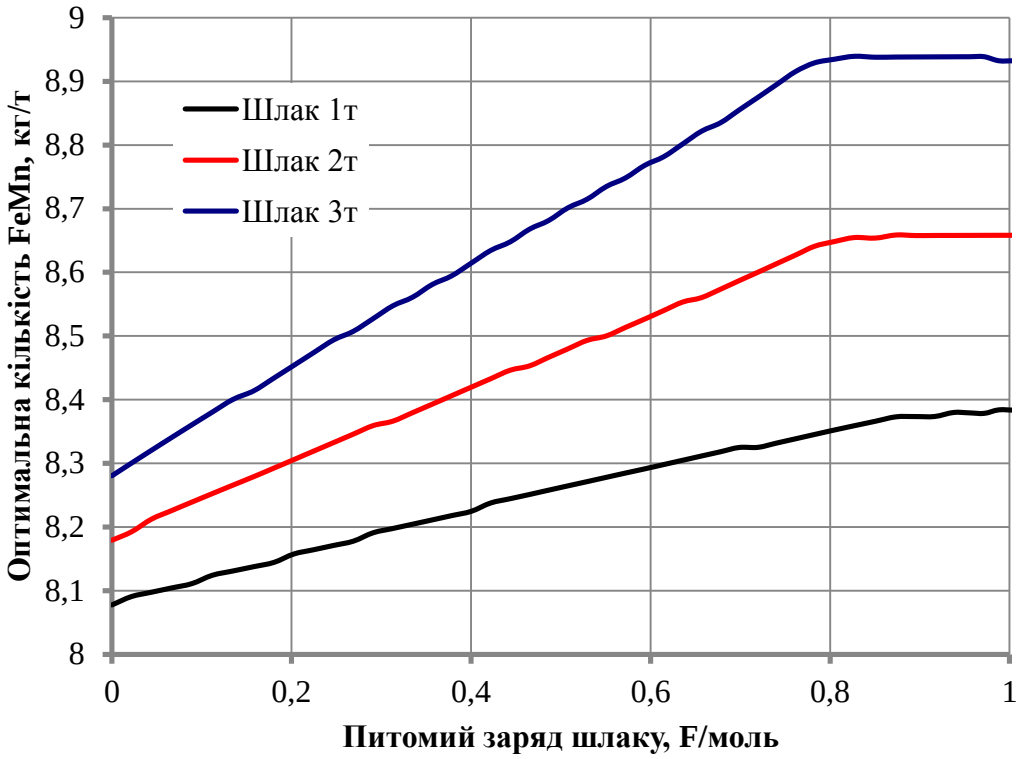


д)

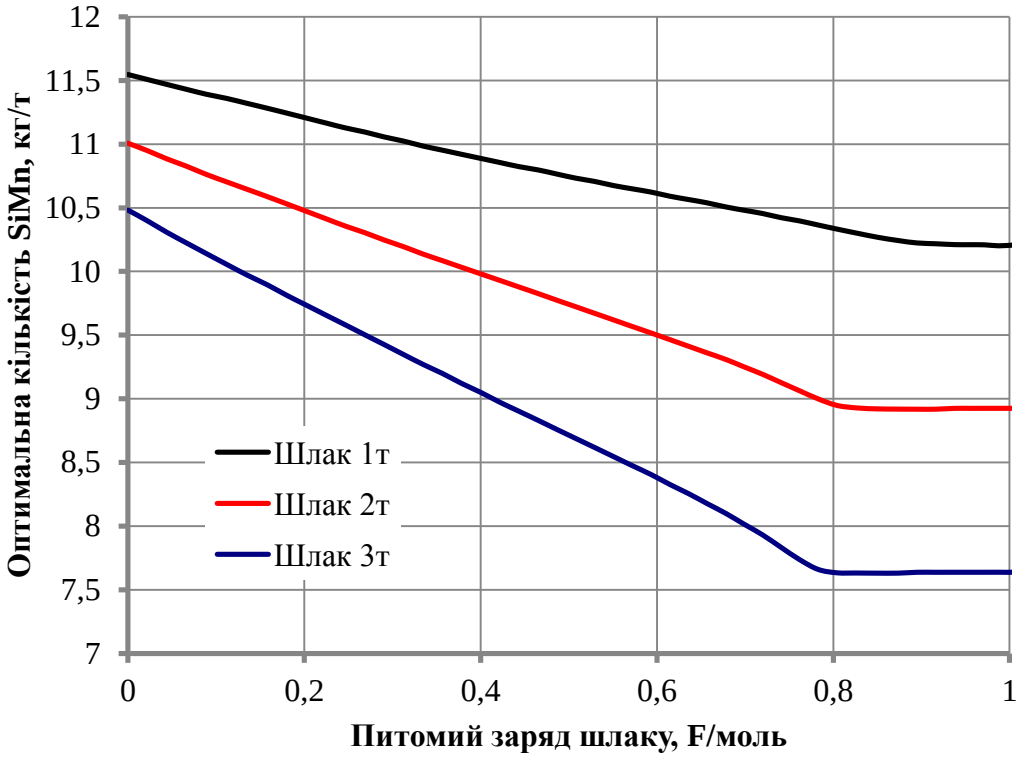


е)

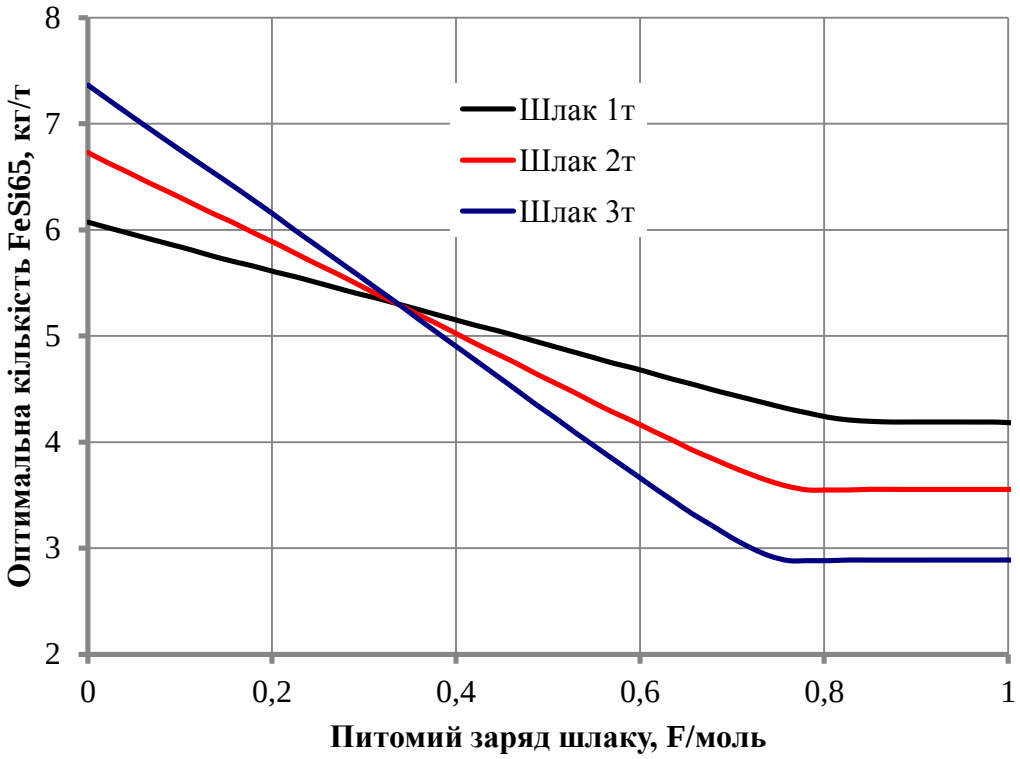
Рис.3.3 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 12MnSi4-3:
а) FeMn; б) FeSi65; в) карбід Si; г) вапно; д) електроенергія; е) вартість матеріалів


Оптимальна кількість FeMn, кг/т
9
8,9
8,8
8,7
8,6
8,5
8,4
8,3
8,2
8,1
8
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

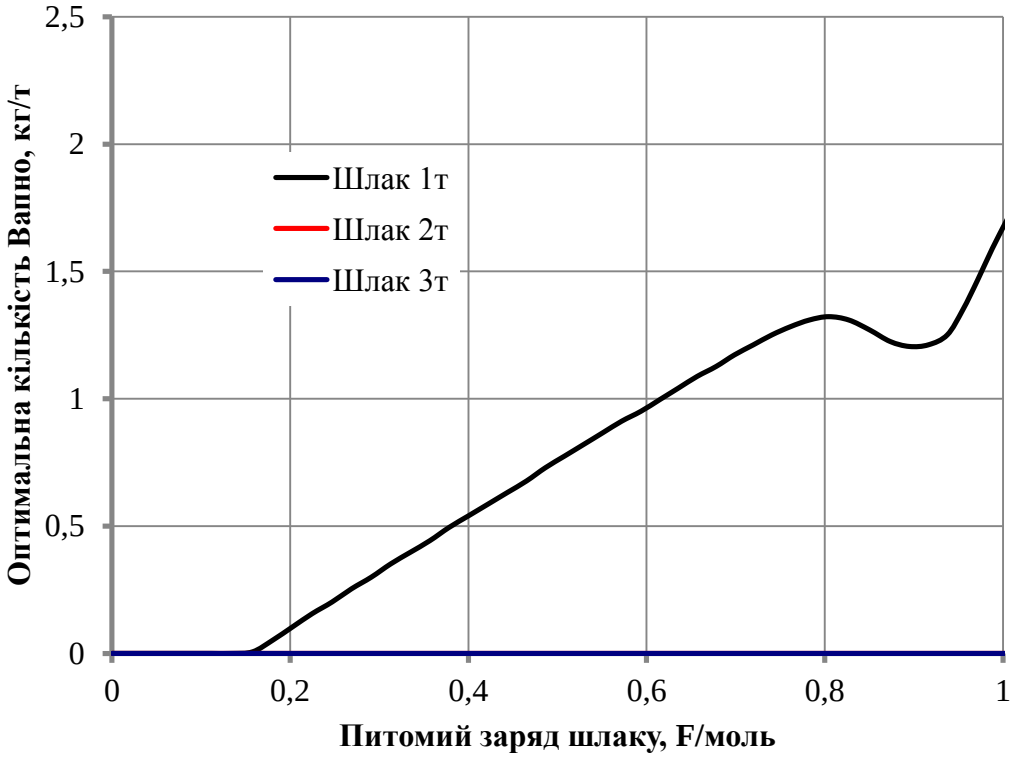
а)


Оптимальна кількість SiMn, кг/т
12
11,5
11
10,5
10
9,5
9
8,5
8
7,5
7
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

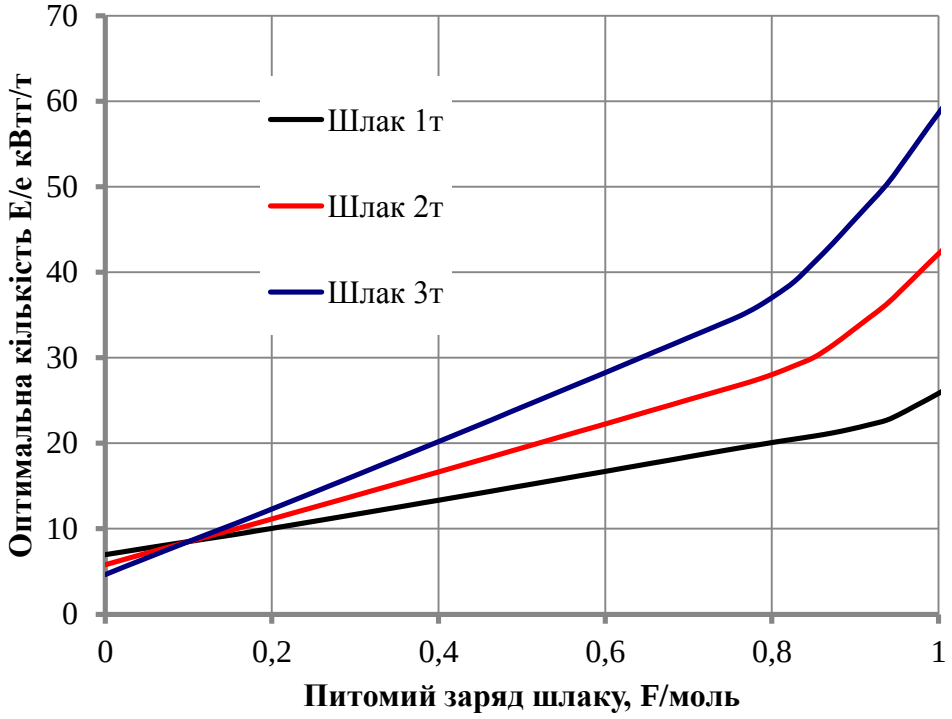
б)


Оптимальна кількість FeSi65, кг/т
8
7
6
5
4
3
2
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

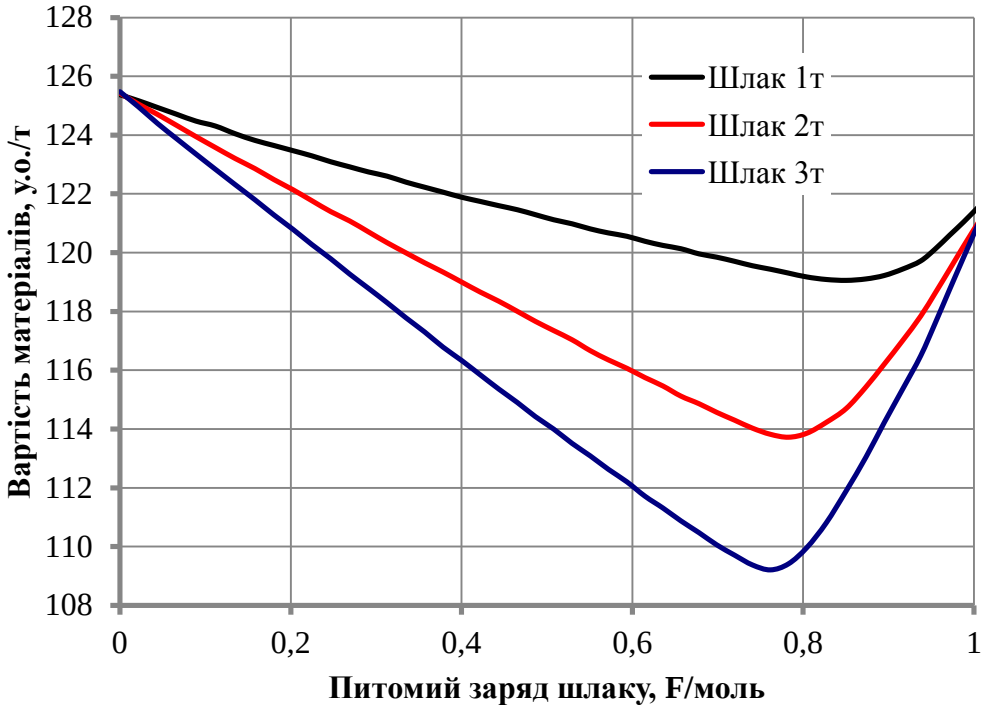
в)


Оптимальна кількість Вапно, кг/т
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

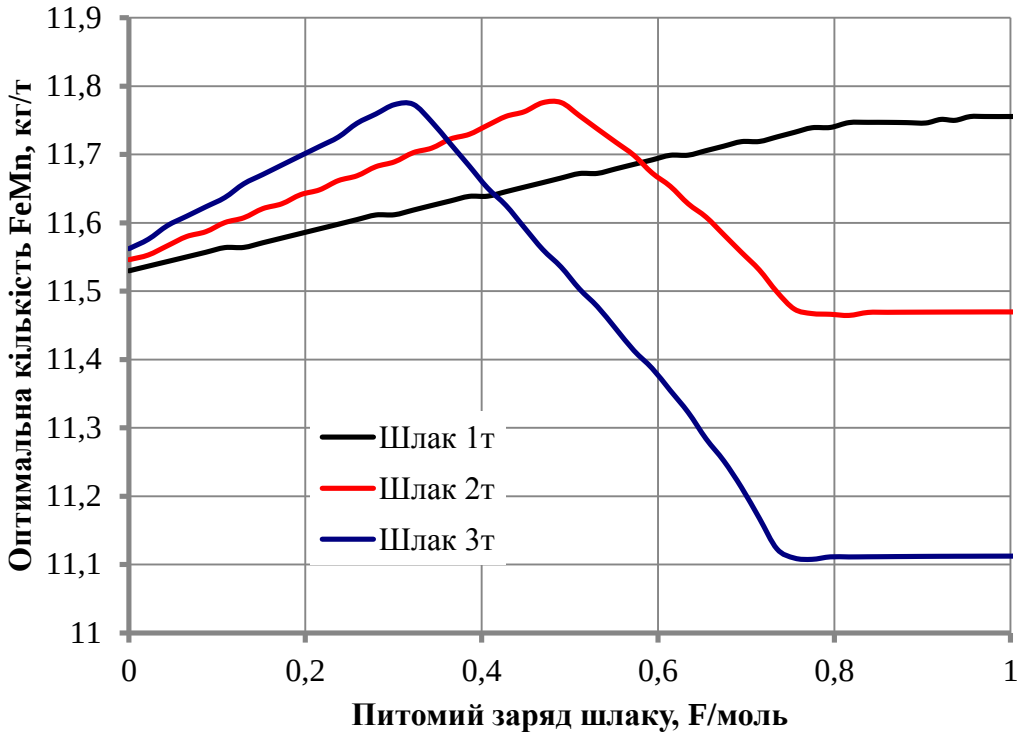


д)

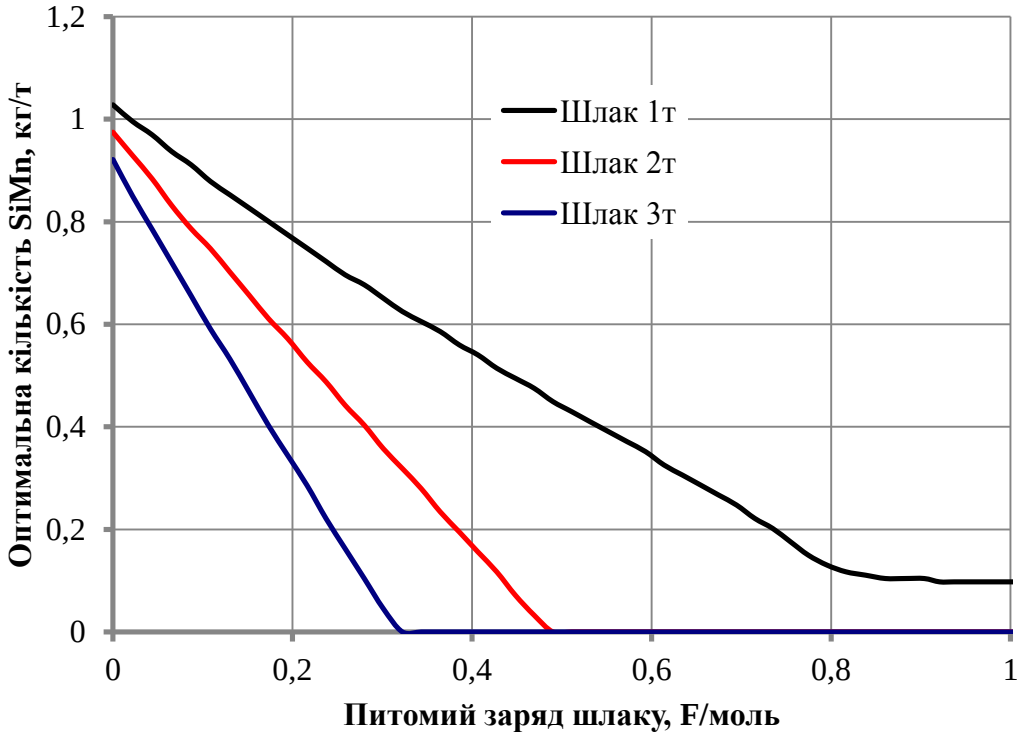


е)

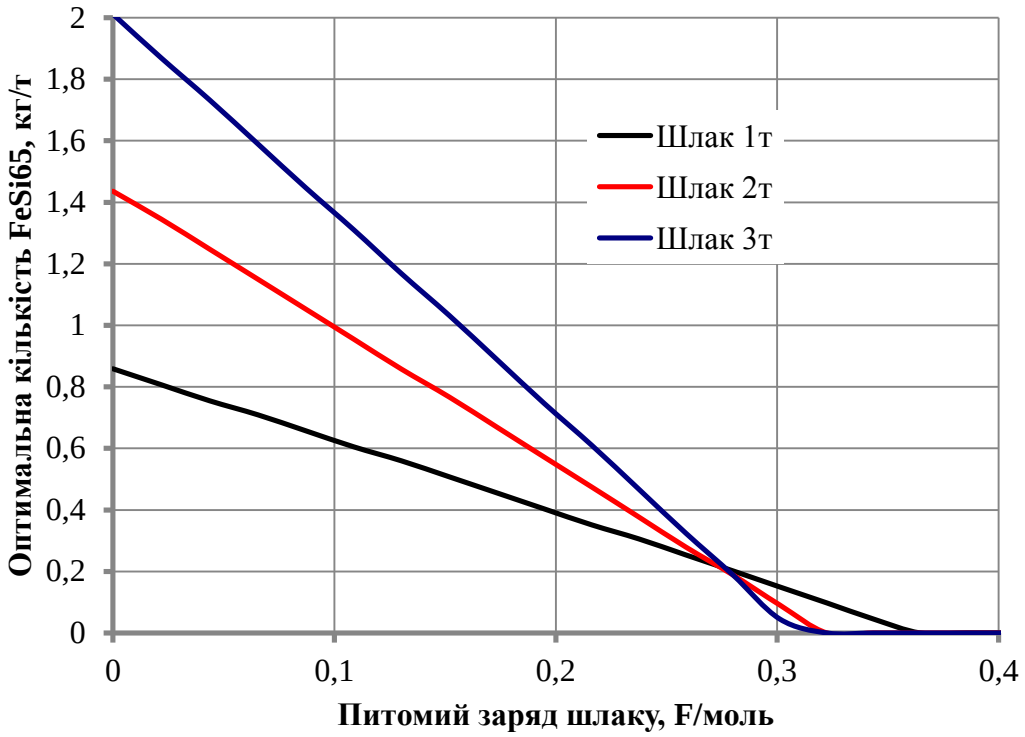
Рис.3.4 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 9MnSi6-3:
а) FeMn; б)SiMn; в) FeSi65; г) вапно; д) електроенергія; е) вартість матеріалів


11,9
11,8
11,7
11,6
11,5
11,4
11,3
11,2
11,1
11
Оптимальна кількість FeMn, кг/т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

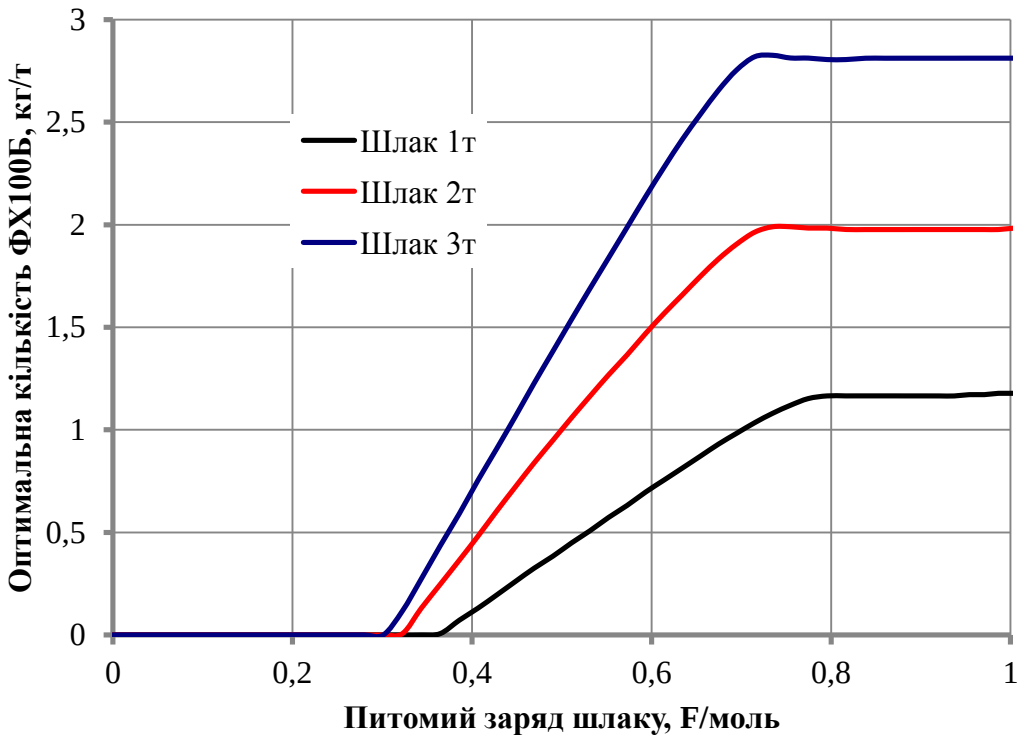
а)


1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Оптимальна кількість SiMn, кг/т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

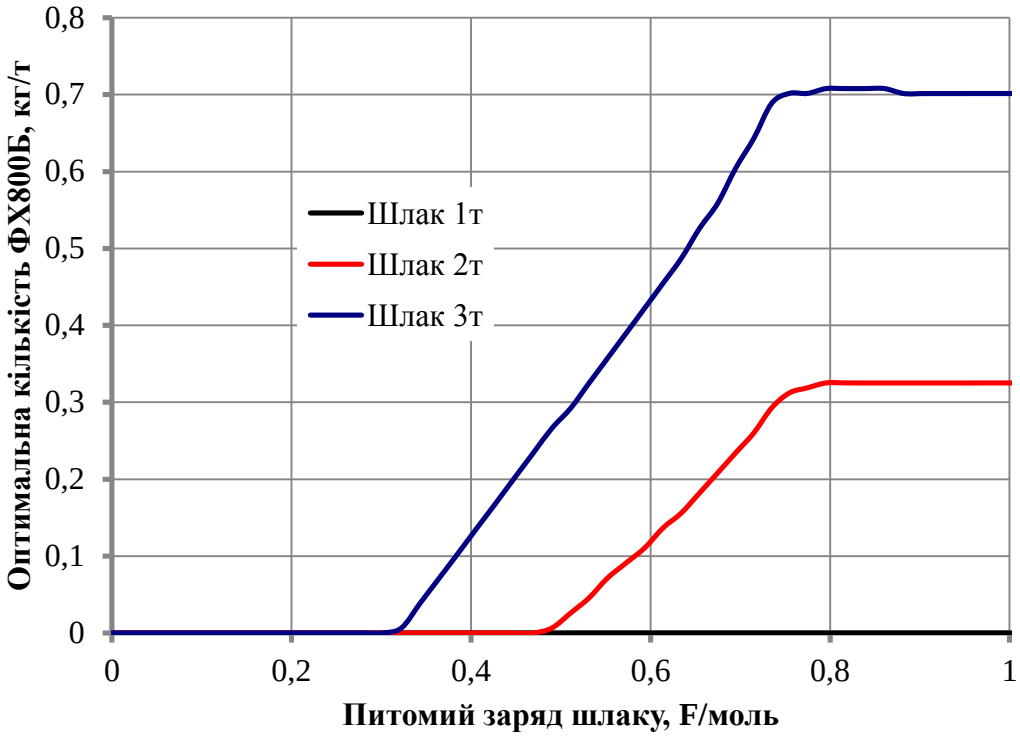
б)


Оптимальна кількість FeSi65, кг/т
2
1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,1
0,2
0,3
0,4
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

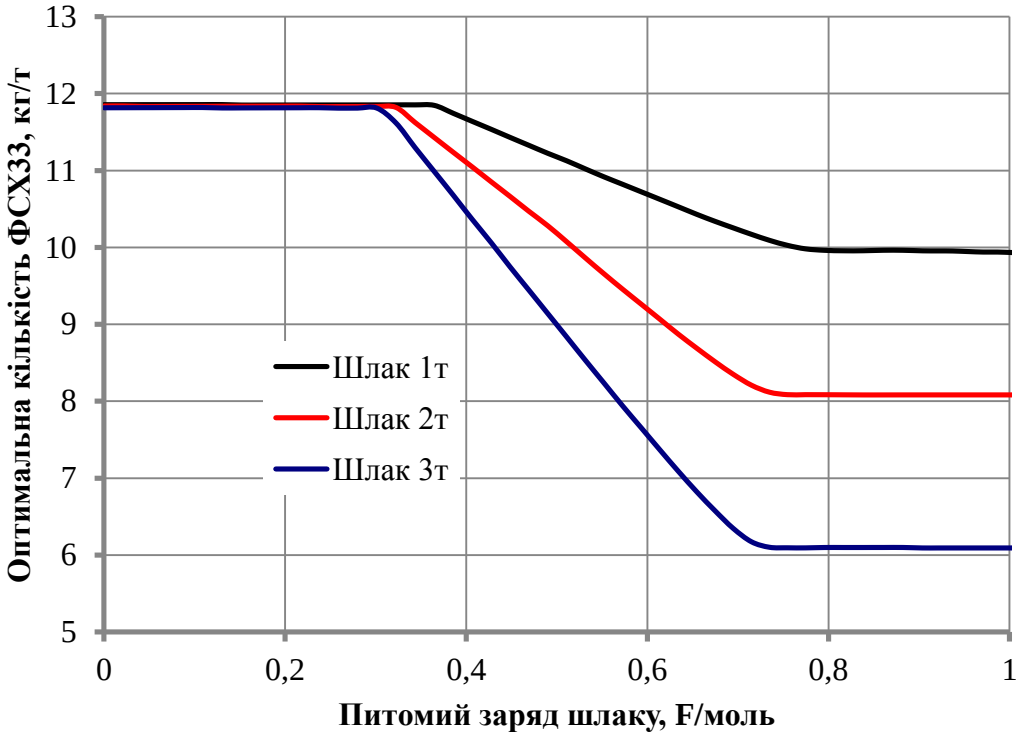
в)


Оптимальна кількість ФХ100Б, кг/т
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

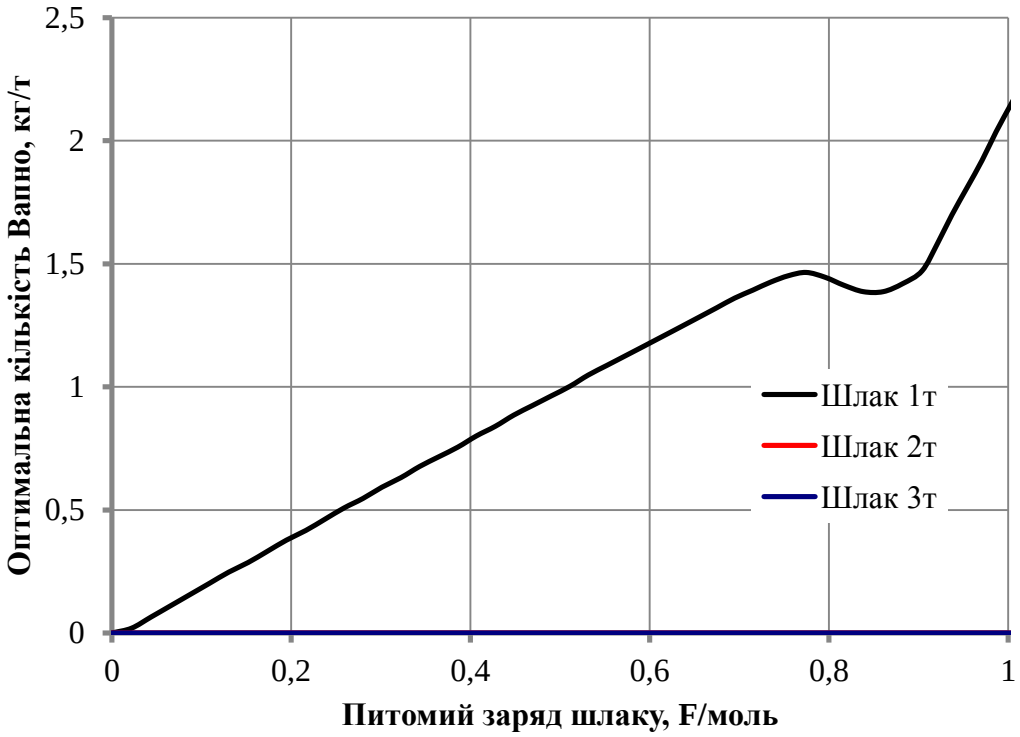
г)


0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Оптимальна кількість ФХ800Б, кг/т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

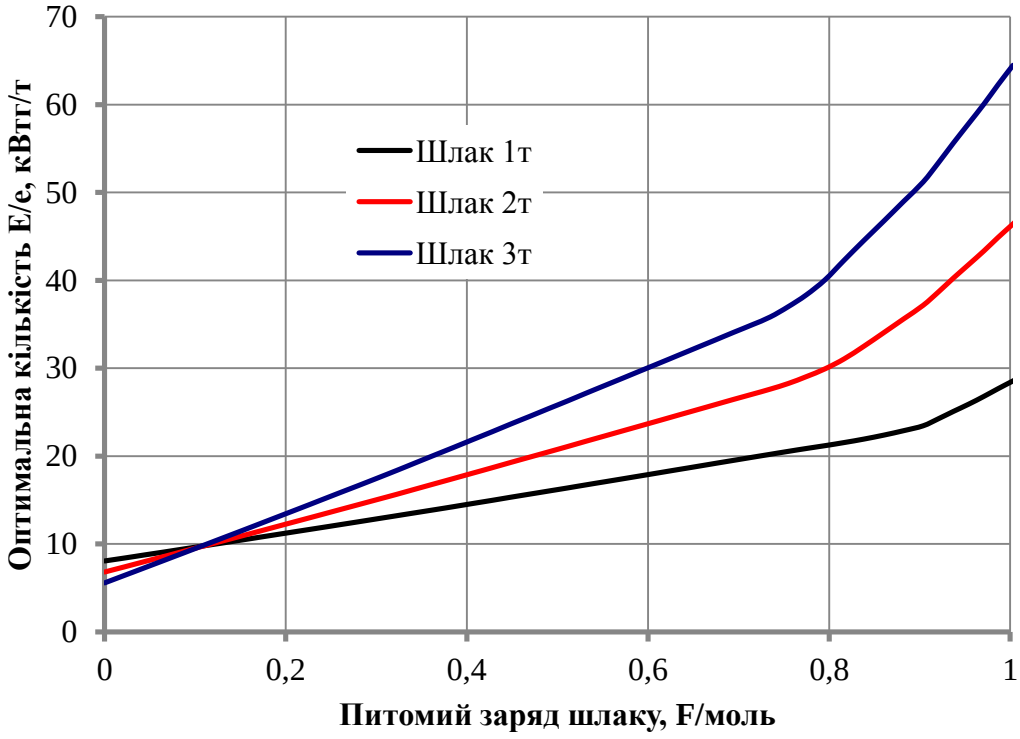
д)


13
12
11
10
9
8
7
6
5
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Оптимальна кількість ФСХ33, кг/т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

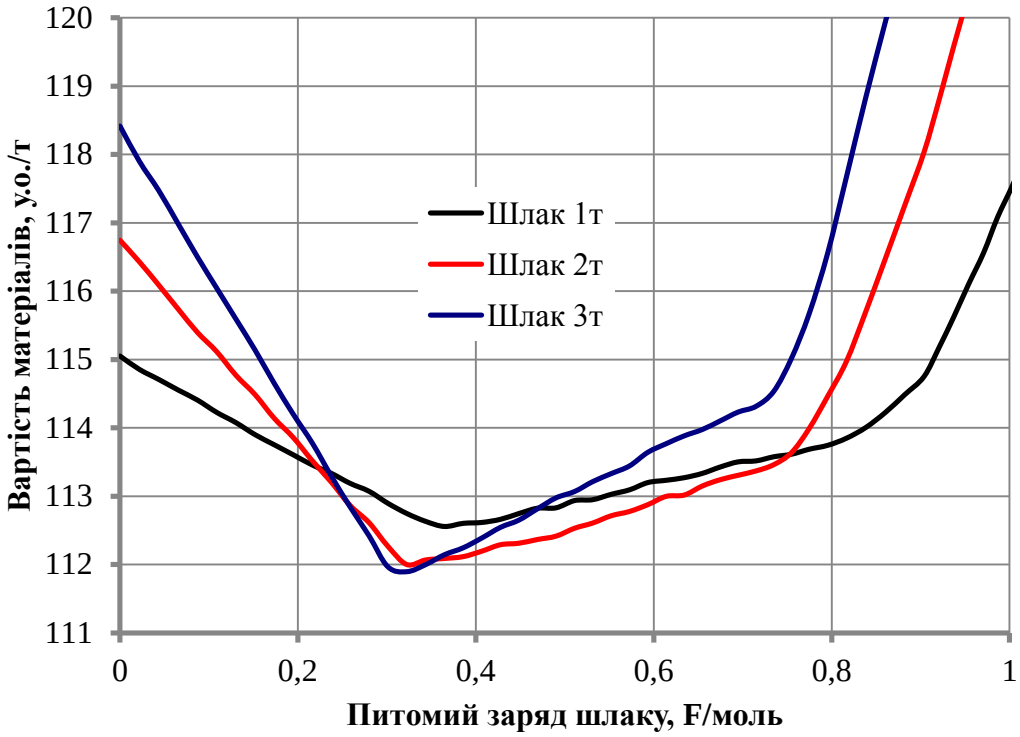
е)


2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Оптимальна кількість Вапно, кг/т
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

є)

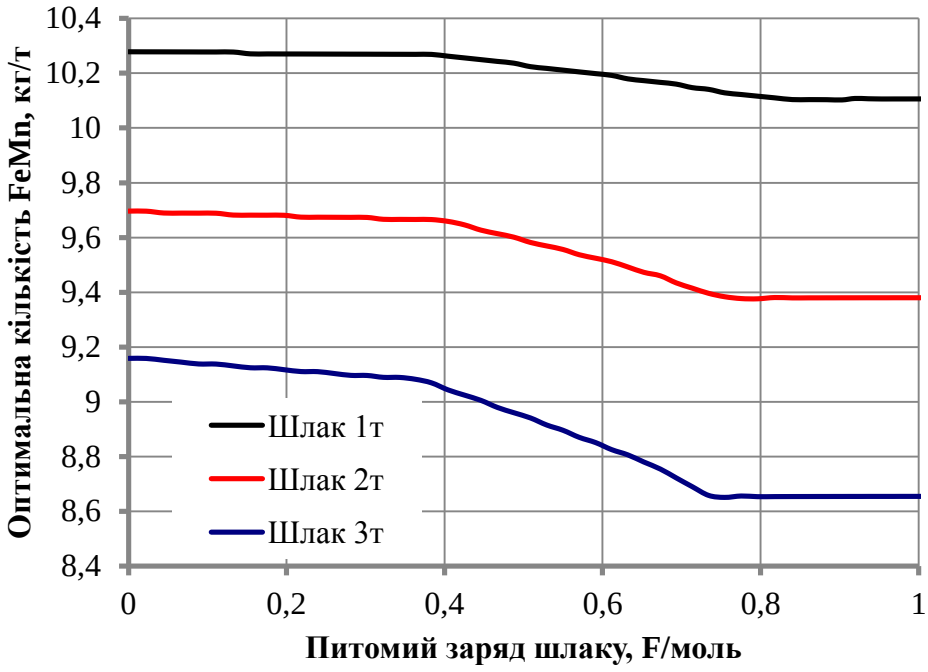

70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Оптимальна кількість E/e, кВтг/т
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

ж)

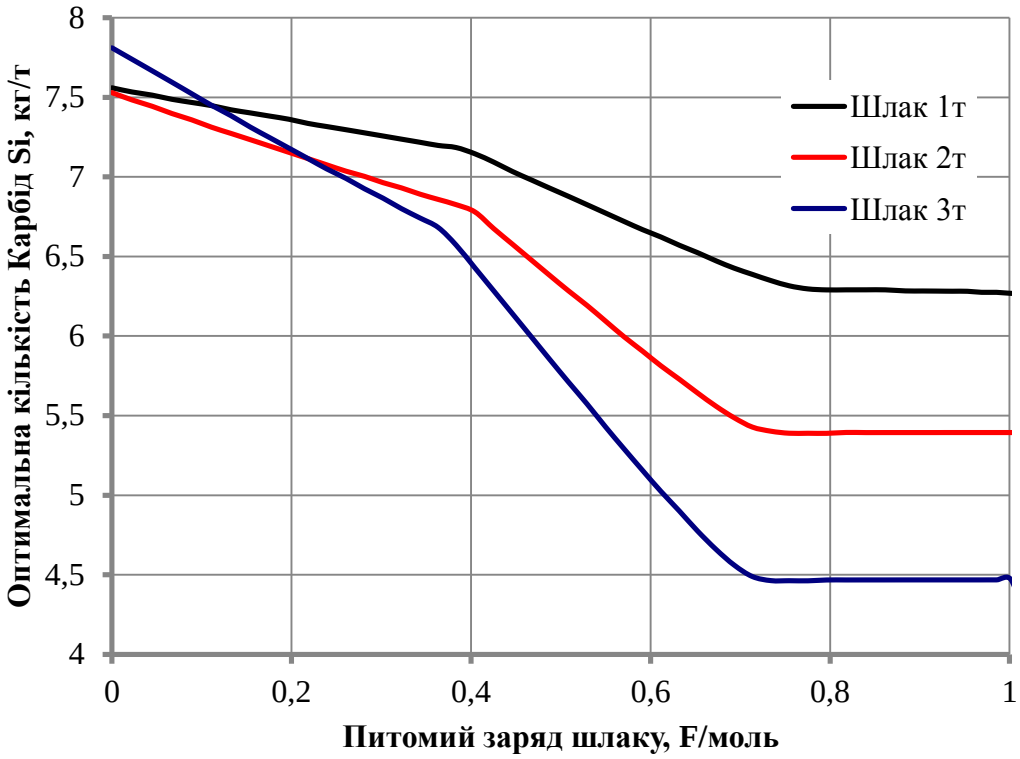


з)

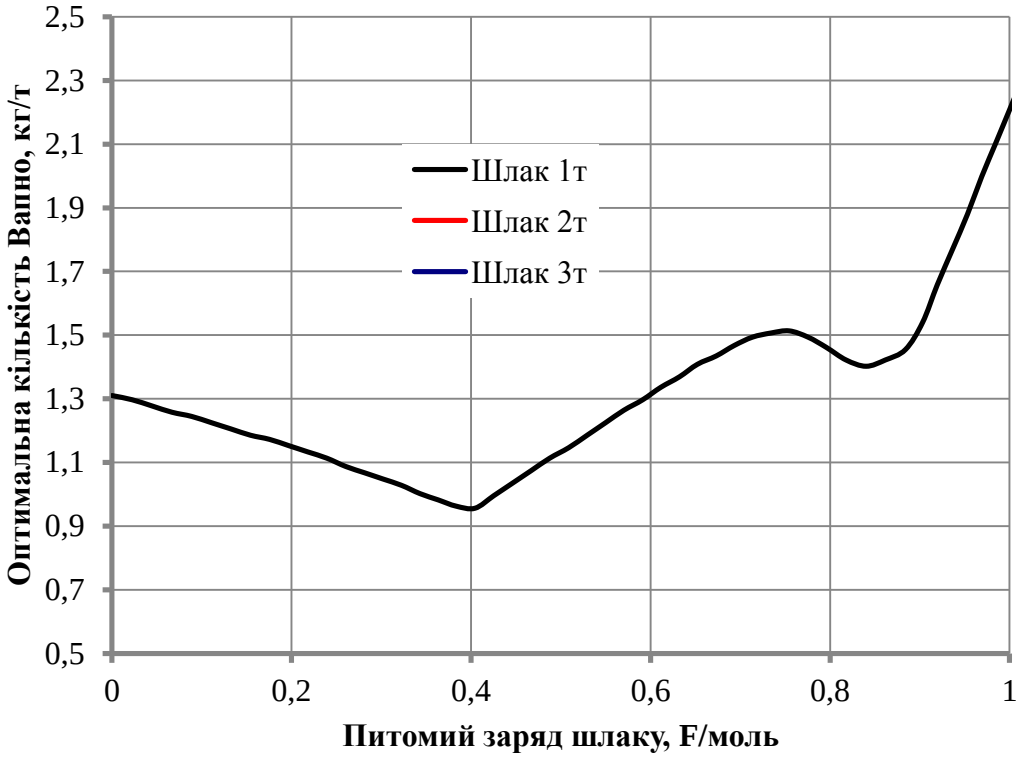
Рис.3.5 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 14MnCrSi4-3-2:
а) FeMn; б) SiMn; в) FeSi65; г) ФХ100Б; д) ФХ800Б; е) ФСХ33; є) вапно; з) електроенергія ; ж) вартість матеріалів



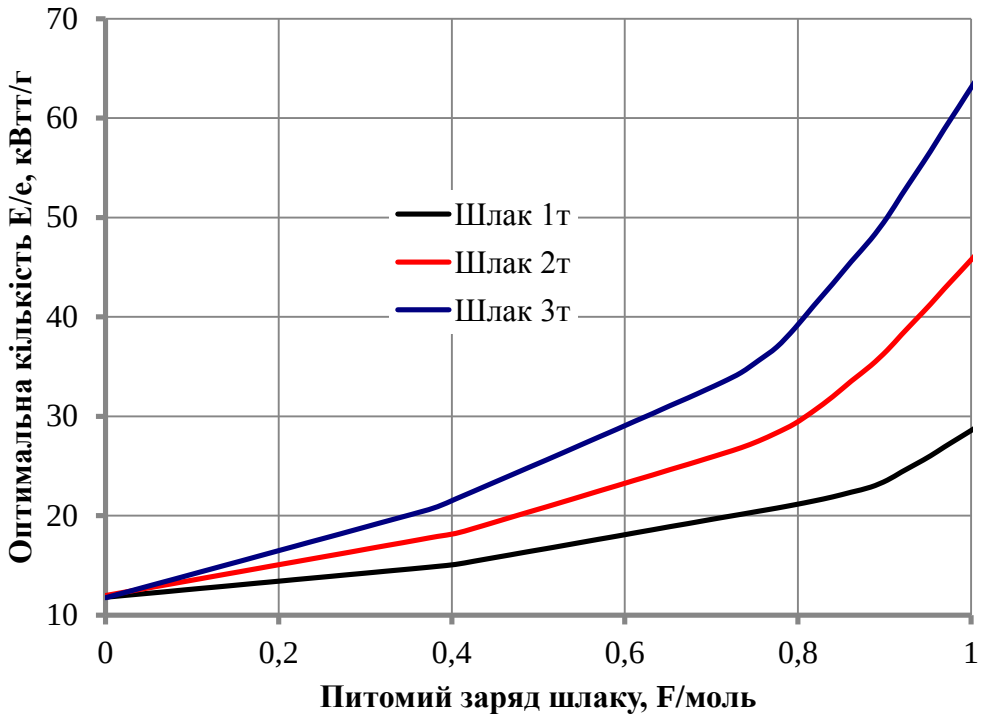
а)


Оптимальна кількість Карбід Si, кг/т
8
7,5
7
6,5
6
5,5
5
4,5
4
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

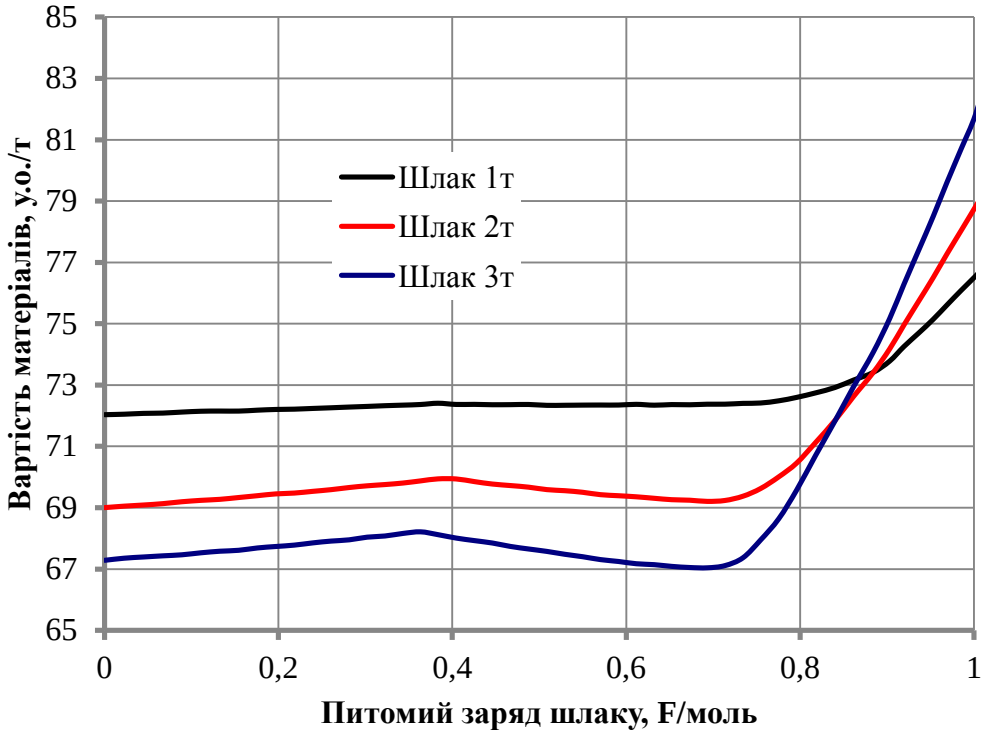
б)


Оптимальна кількість Вапно, кг/т
2,5
2,3
2,1
1,9
1,7
1,5
1,3
1,1
0,9
0,7
0,5
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

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 мінімума. 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.

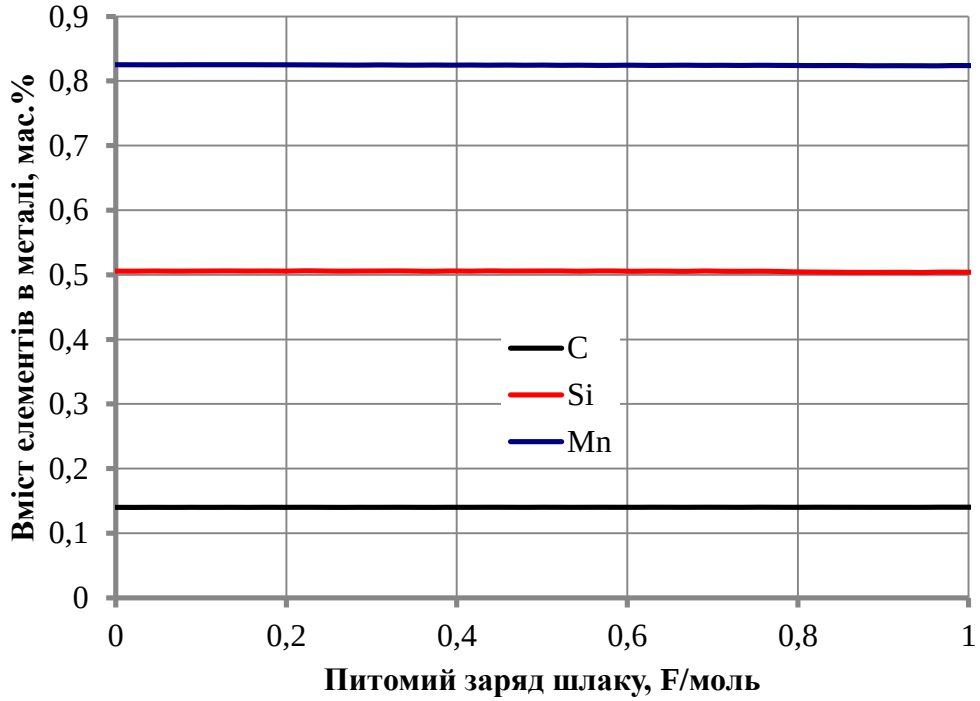
2. Витрати електроенергії при підвищенні питомого заряду шлаку постійно зростають для всіх марок сталей тим більше, чим більше маса шлаку. При нульовому заряду шлаку витрати електроенергії для підігріва металу складають 3…14 Е/е кВтт/г. Найбільші витрати електроенергії на рівні 110..120 кВтг/т спостерігаються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

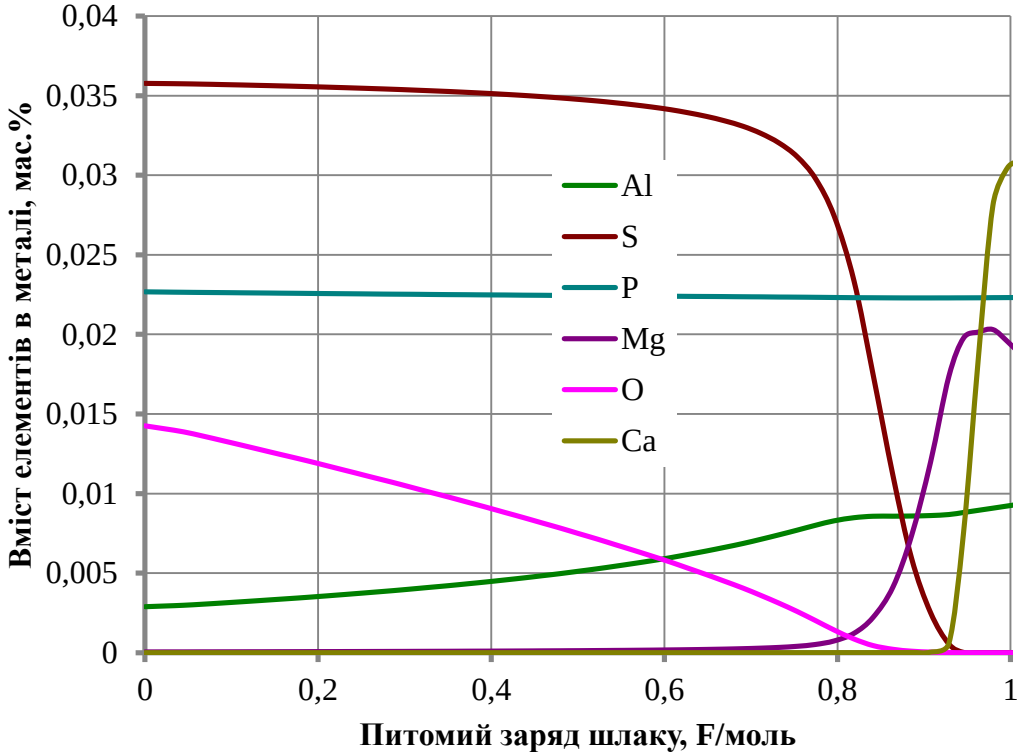
4. При підвищенні питомого заряду шлаку витрата вапна зростає до 1,5..2,0 кг/т тільки у випадку застосування 1 тонни начального шлаку для компенсації зниження його маси в процесі ВЕЛР.

3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі

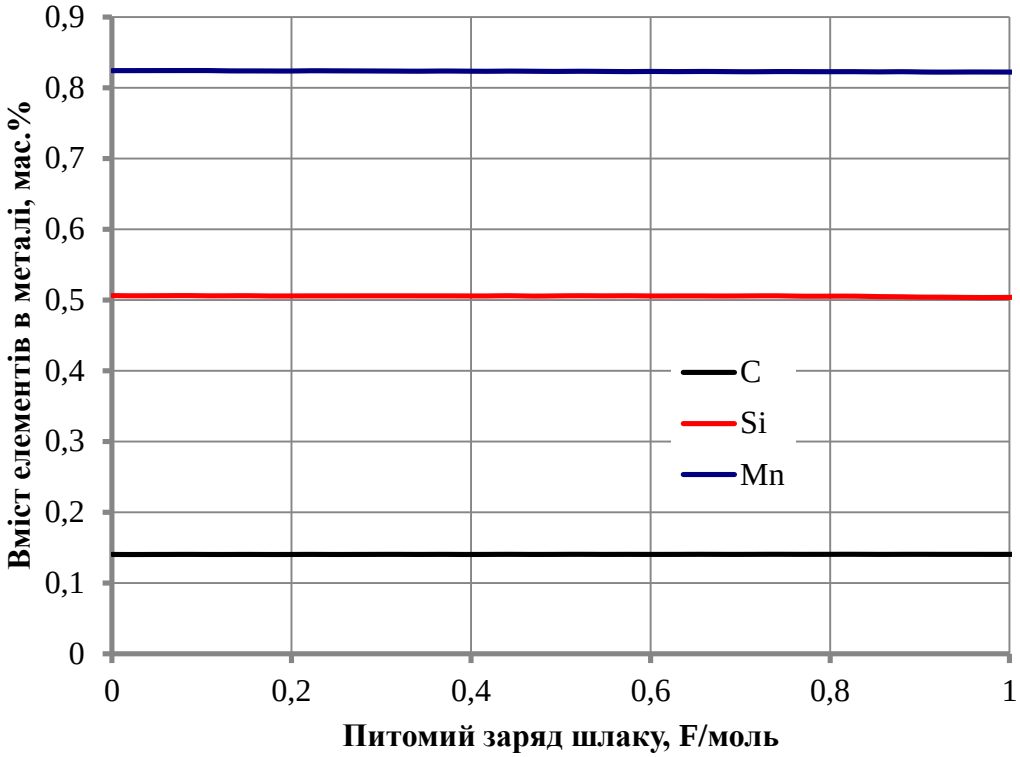
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі. На рисунках 3.7–3.15 наведено відповідні результати розрахунків.



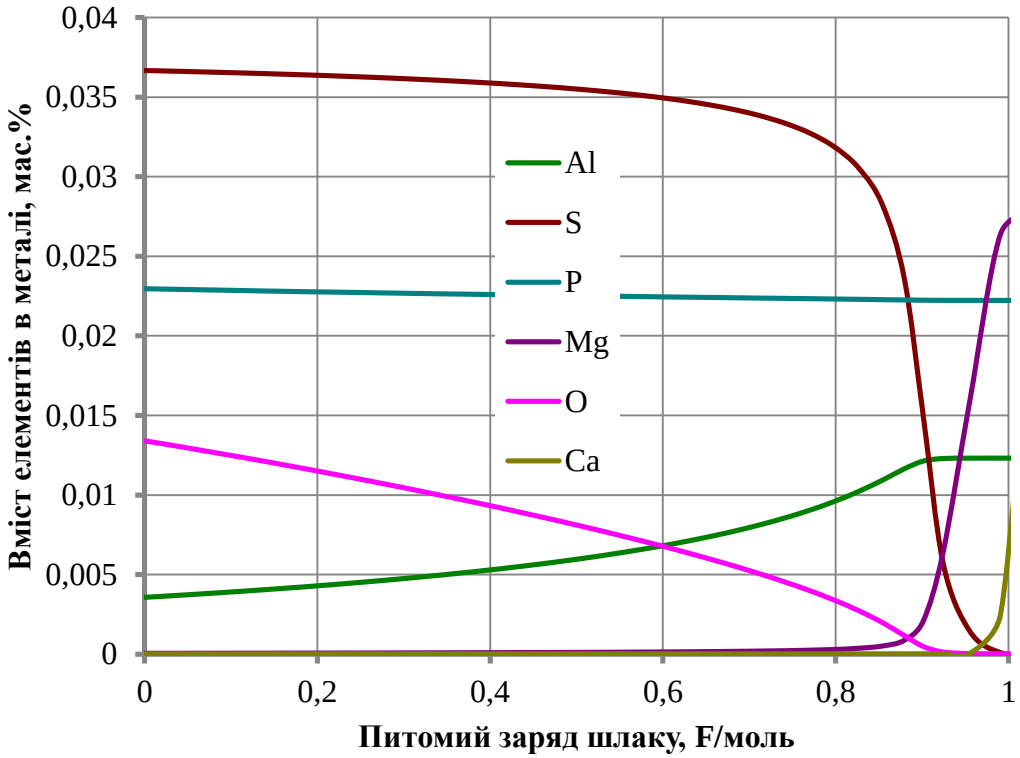
а)



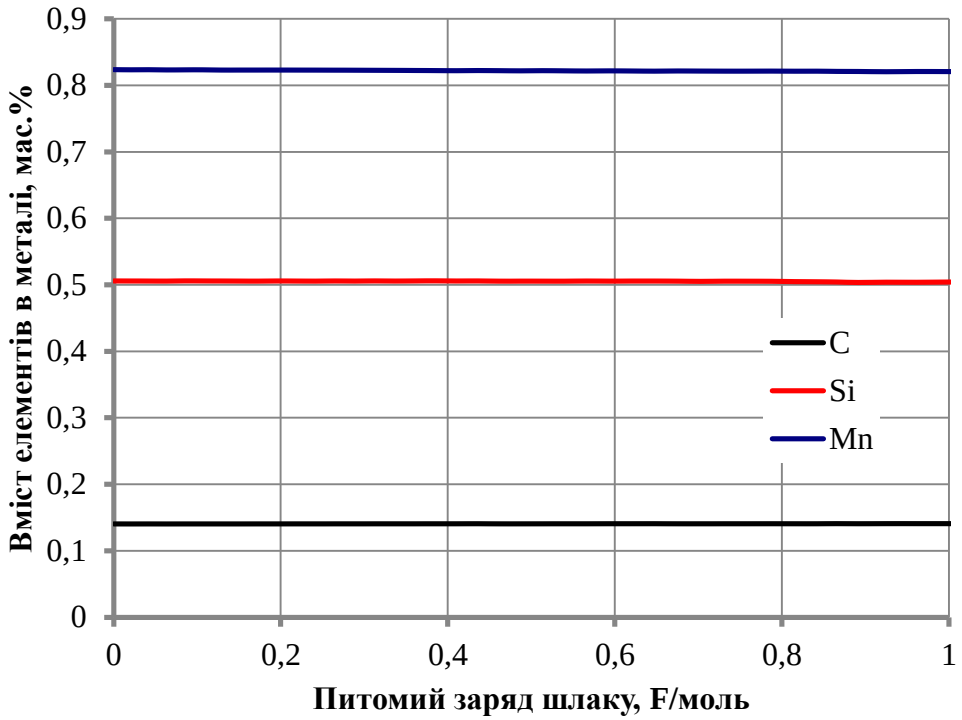
б)


0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
C
Si
Mn

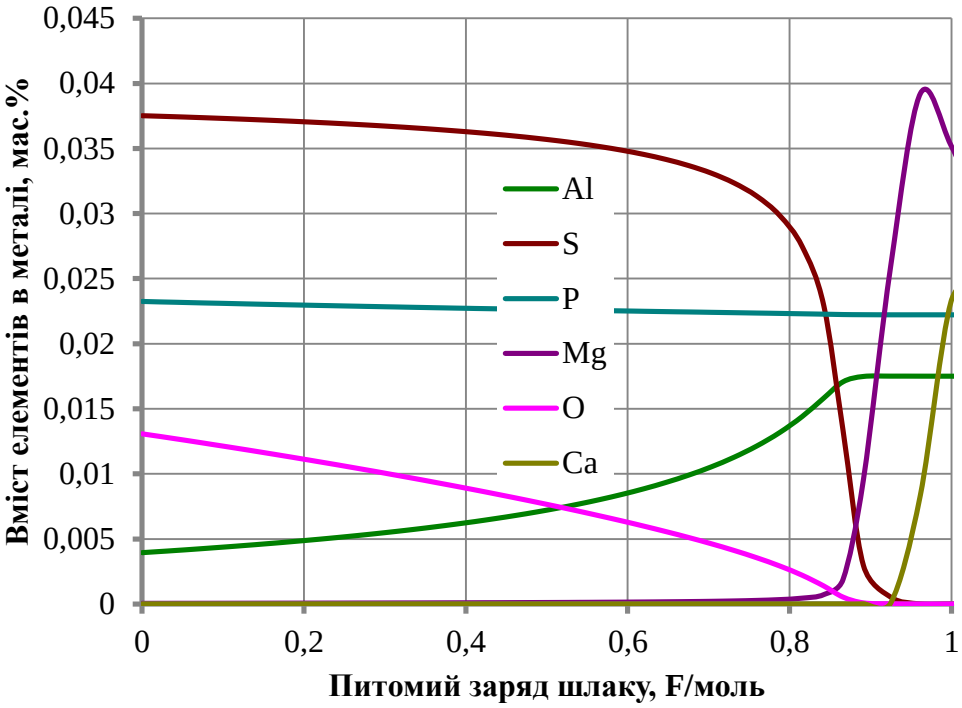
в)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Al
S
P
Mg
O
Ca

г)

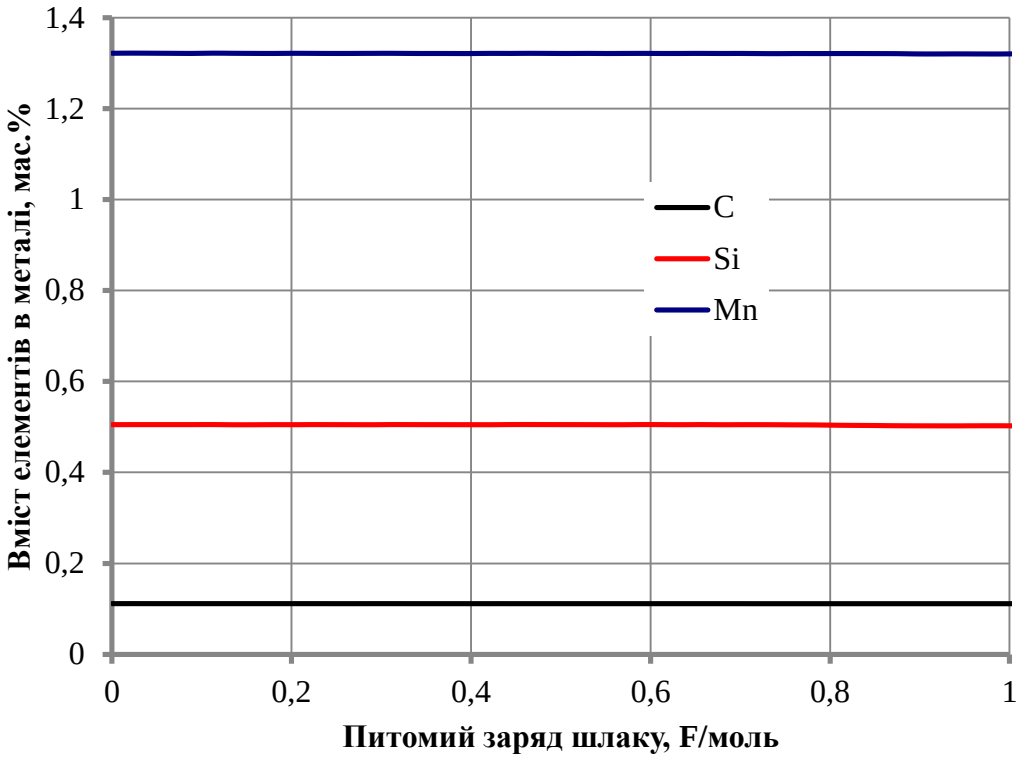


д)

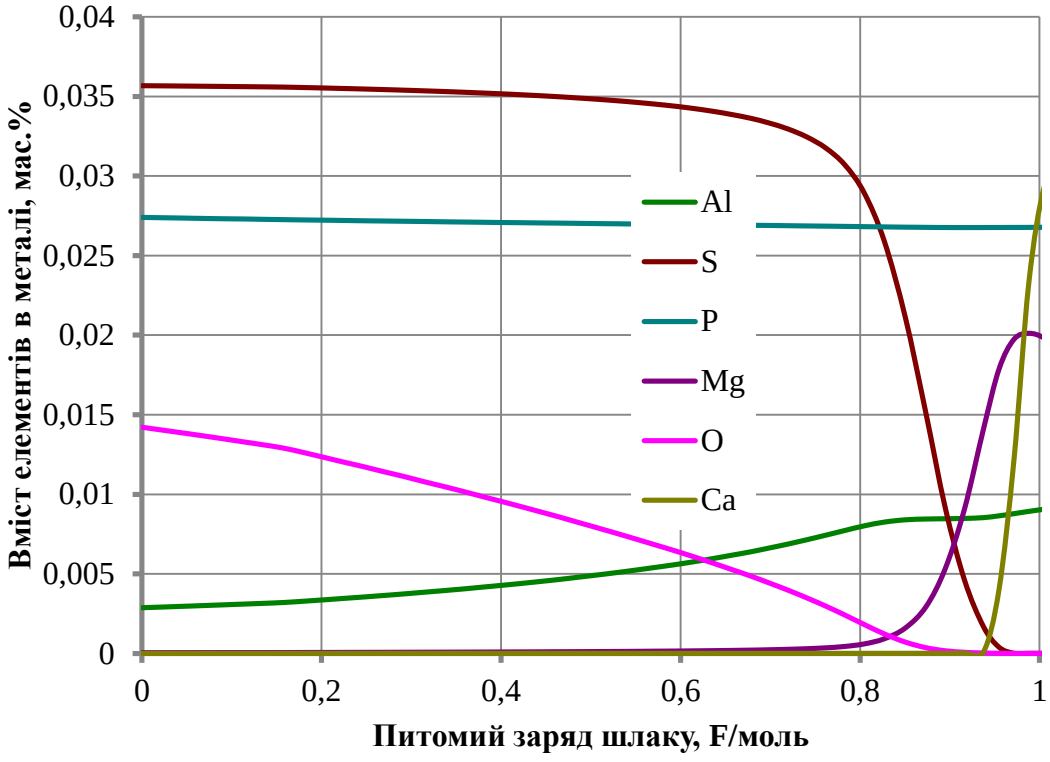


е)

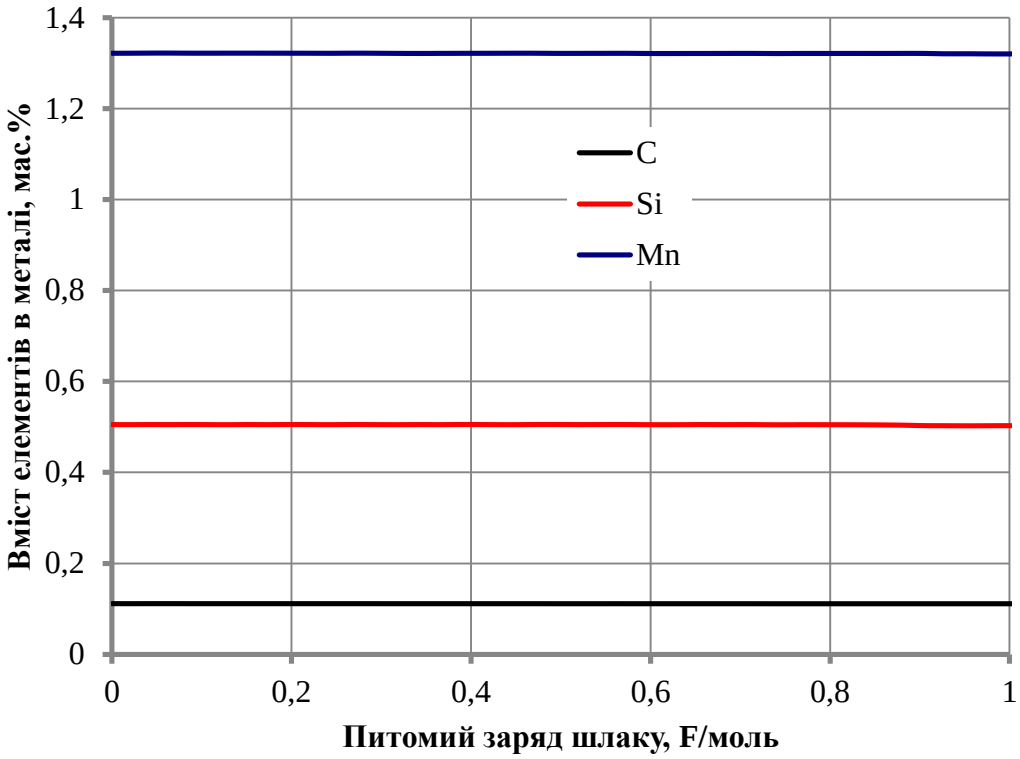
Рис 3.7 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 12MnSi4-3:
вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
C
Si
Mn

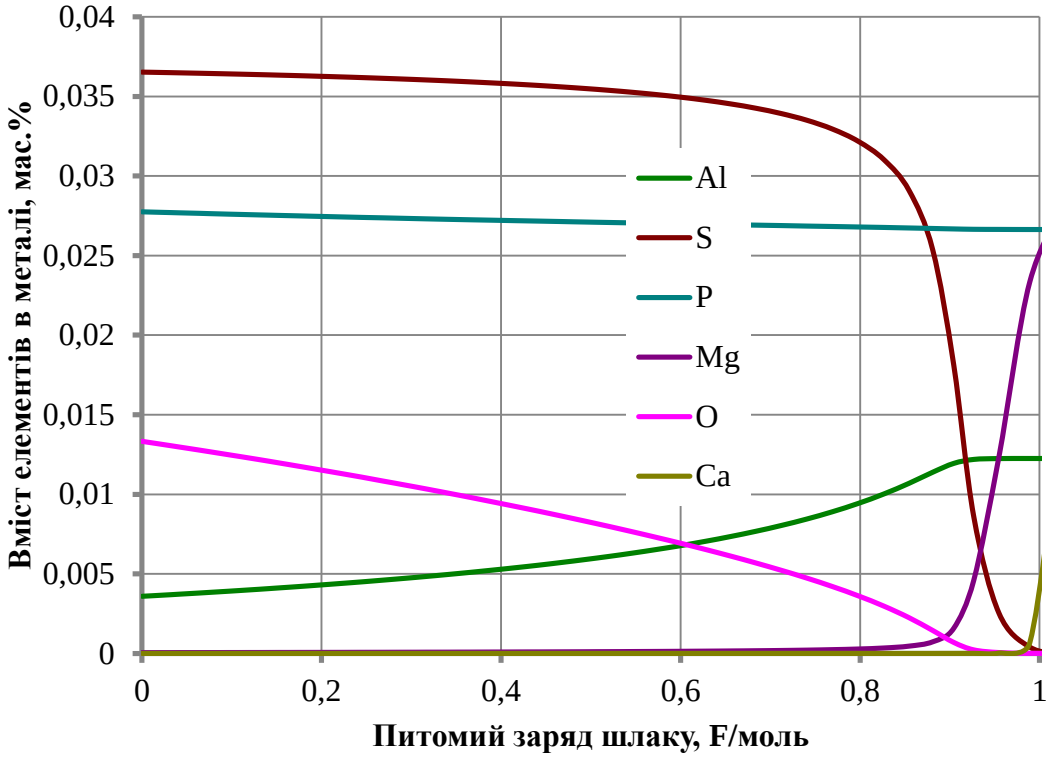
а)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Al
S
P
Mg
O
Ca

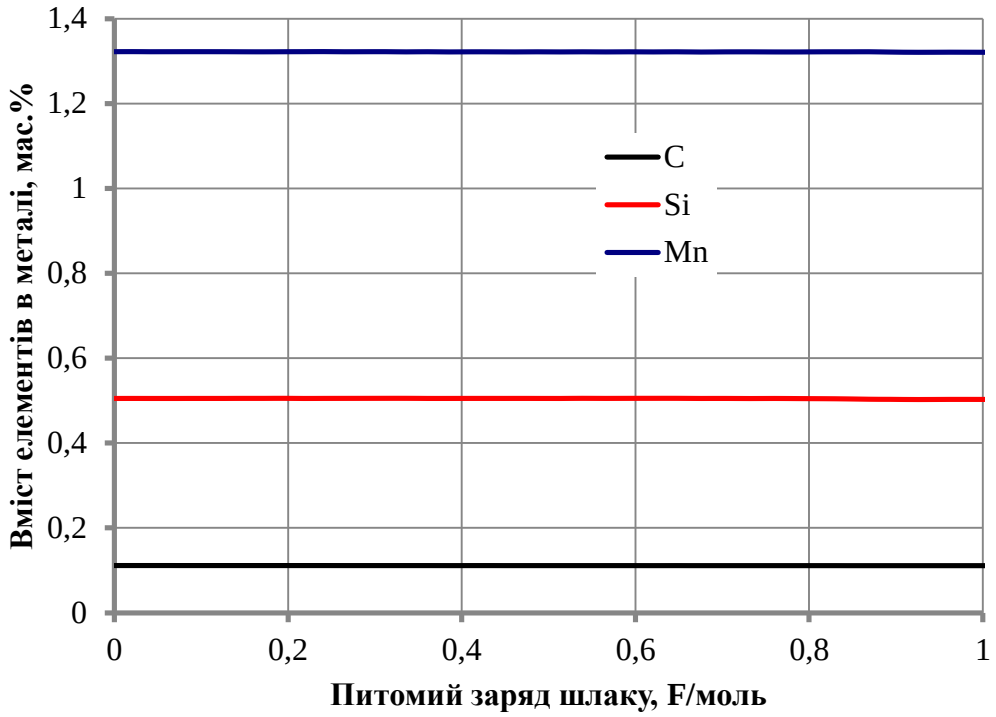
б)


1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
C
Si
Mn
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль

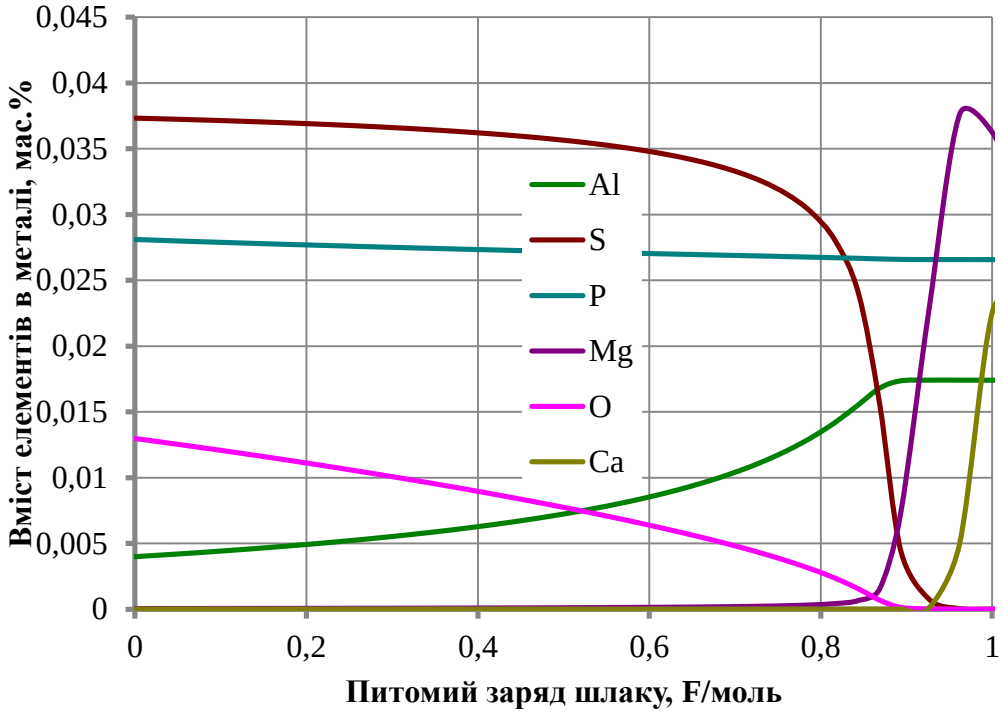
в)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Al
S
P
Mg
O
Ca
Вміст елементів в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)



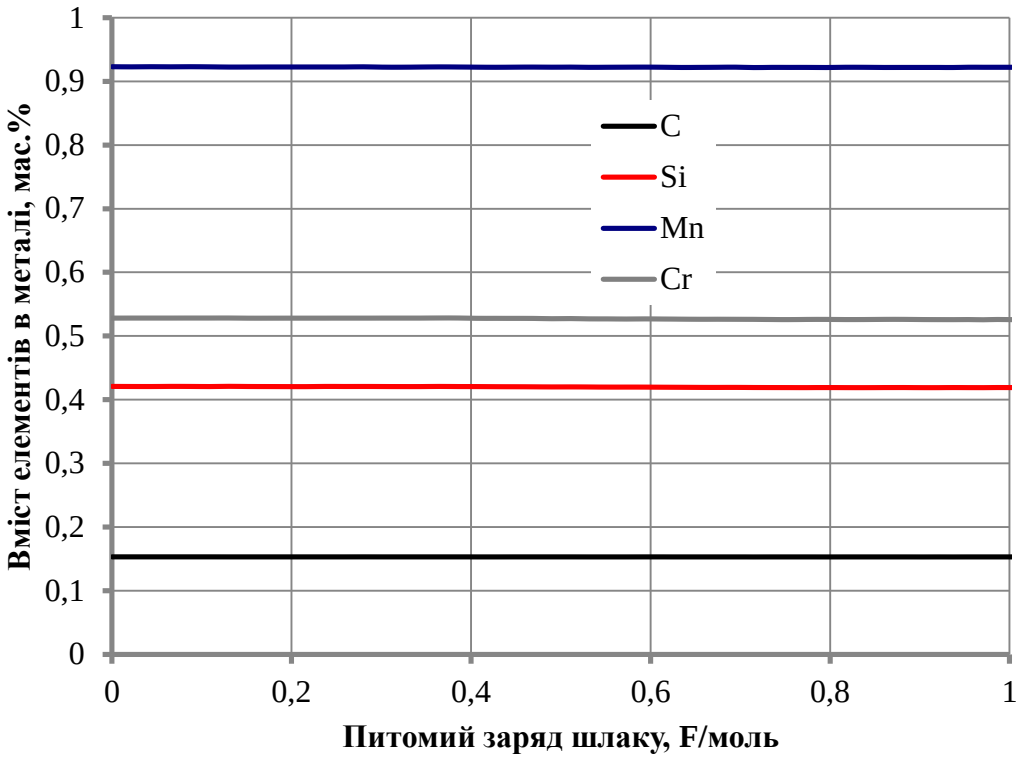
д)



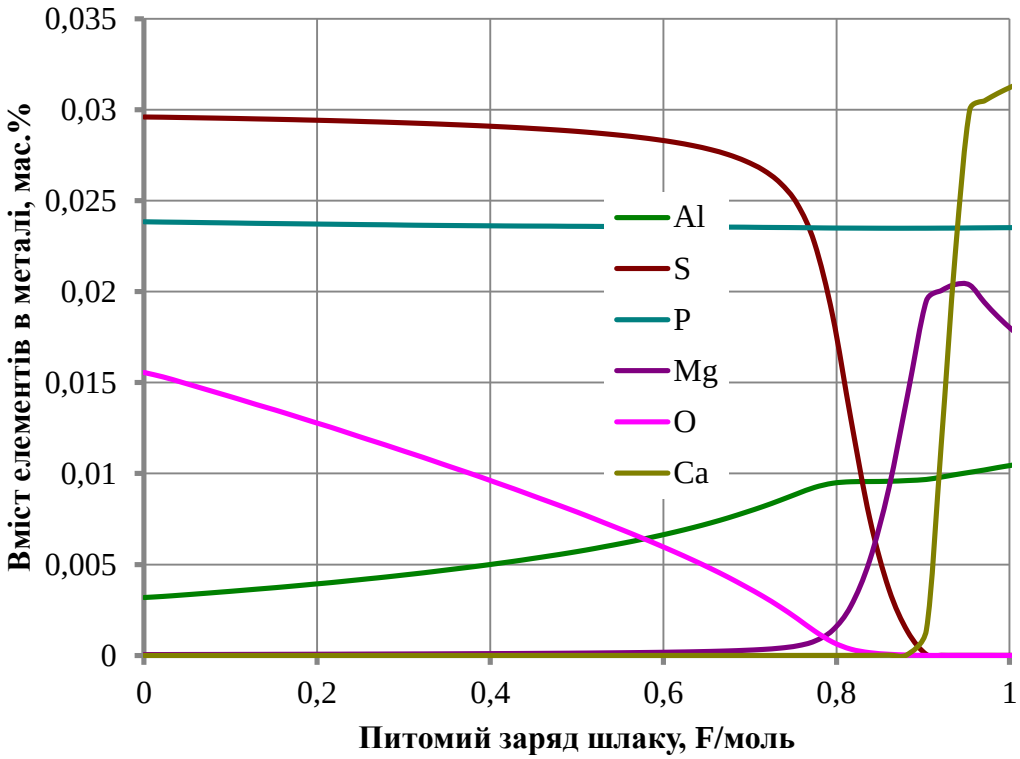
е)

Рис 3.8 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 9MnSi6-3:

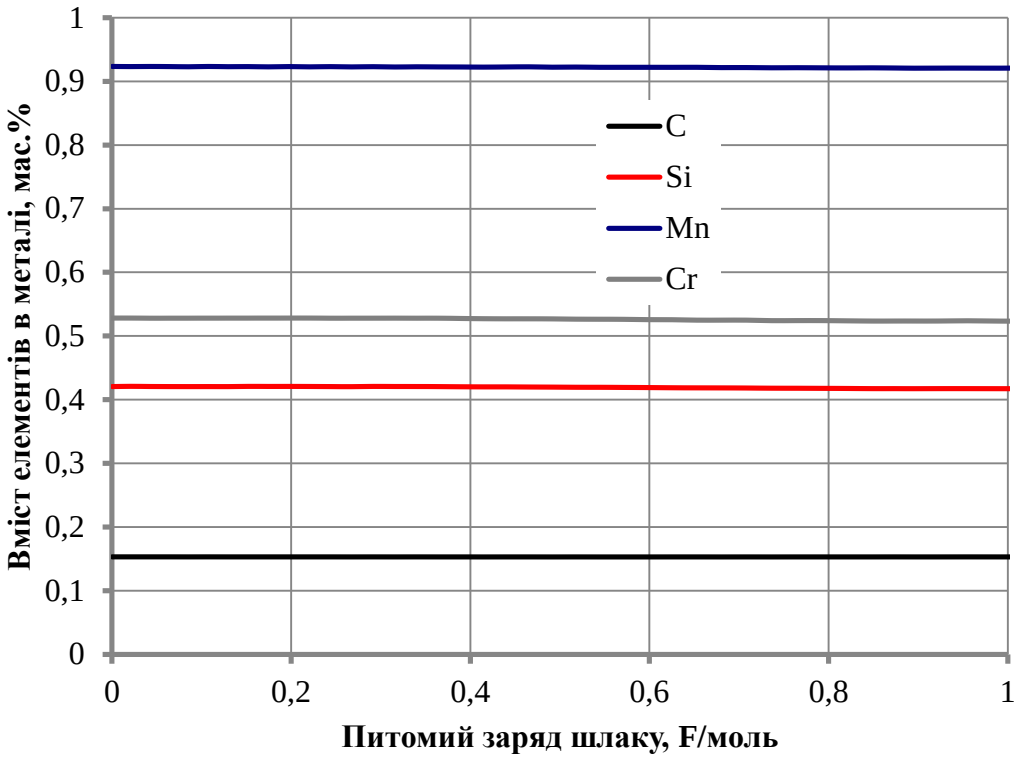
вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


Вміст елементів в металі, мас.%
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
C
Si
Mn
Cr

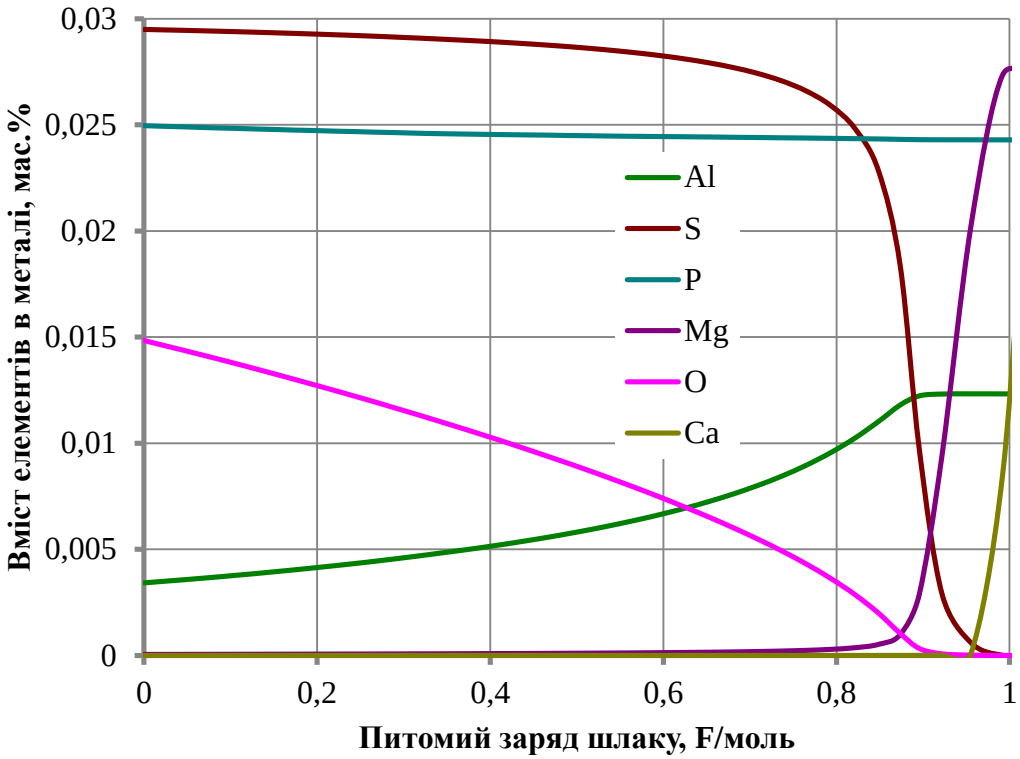
а)


Вміст елементів в металі, мас.%
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Al
S
P
Mg
O
Ca

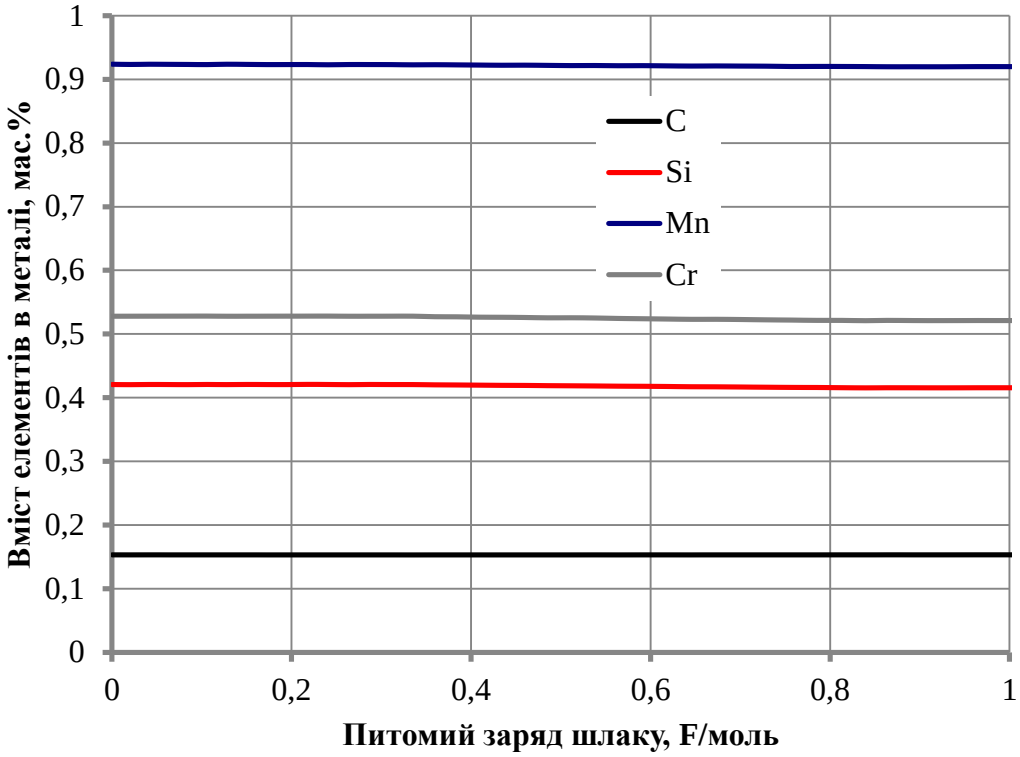
б)


Вміст елементів в металі, мас.%
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
C
Si
Mn
Cr

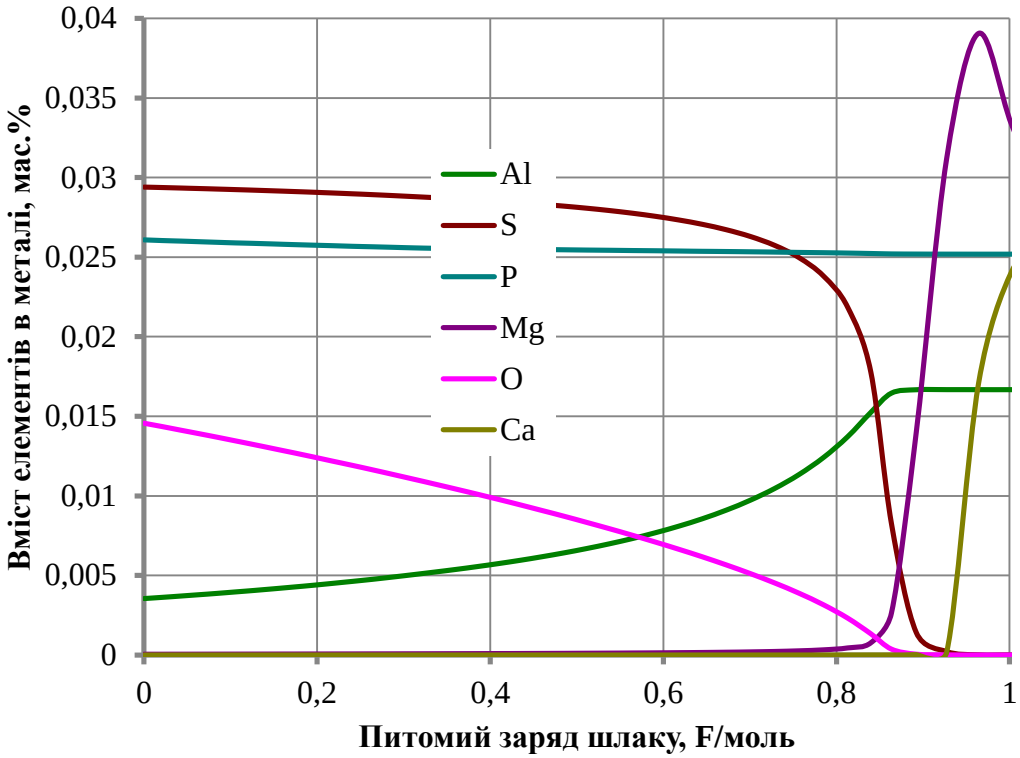
в)


Вміст елементів в металі, мас.%
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Al
S
P
Mg
O
Ca

г)

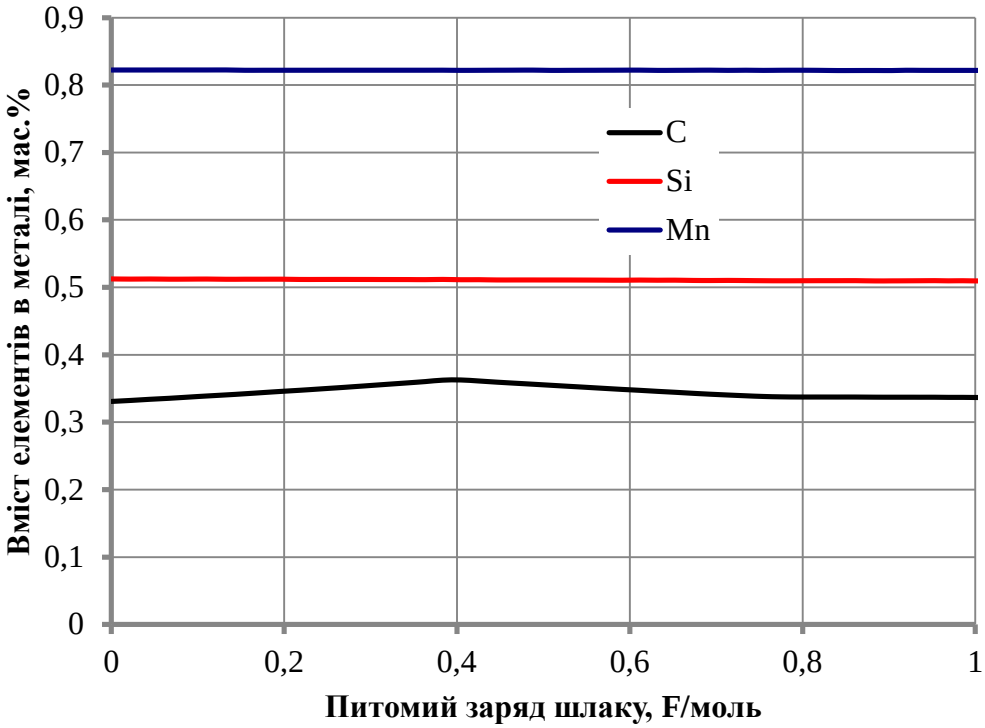


д)

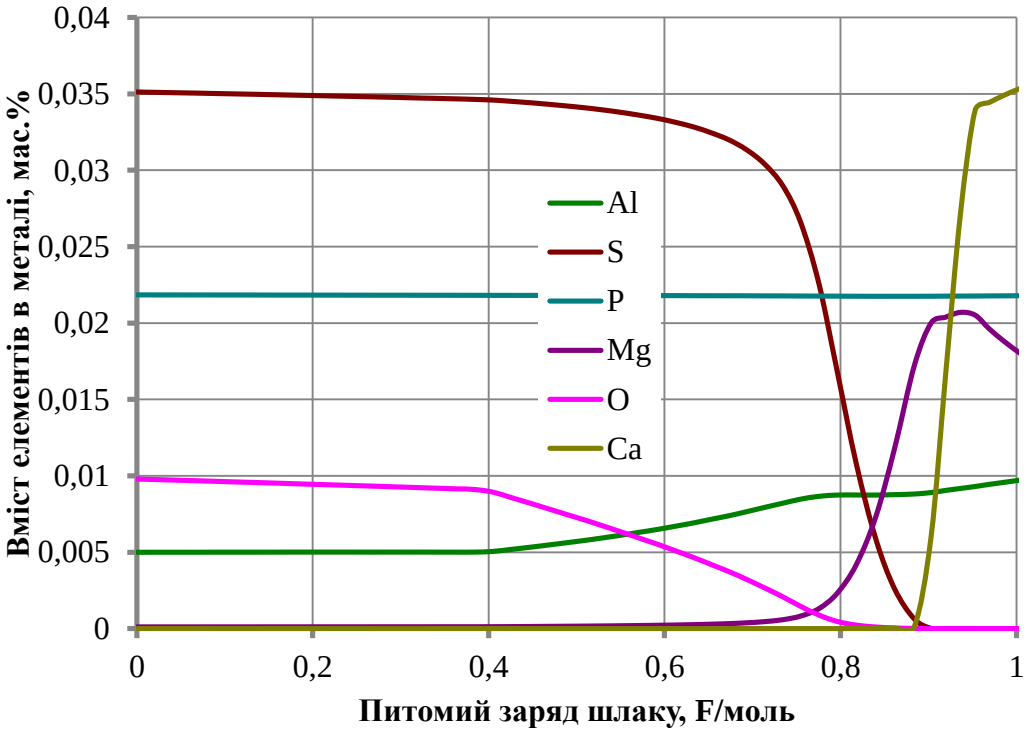


е)

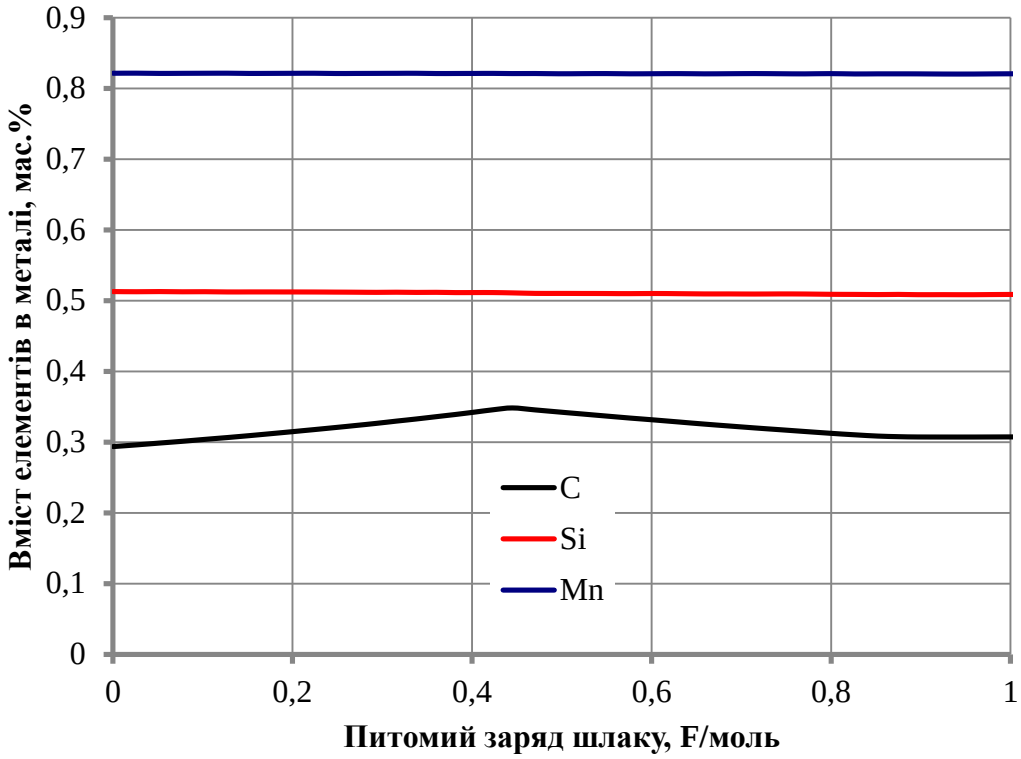
Рис 3.9 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 14MnCrSi4-3-2:
кальцій,кісларод, кремній (а, в, д) ; залізо, марганець, алюміній, сірка, магній (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Вміст елементів в металі, мас.%
C
Si
Mn
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

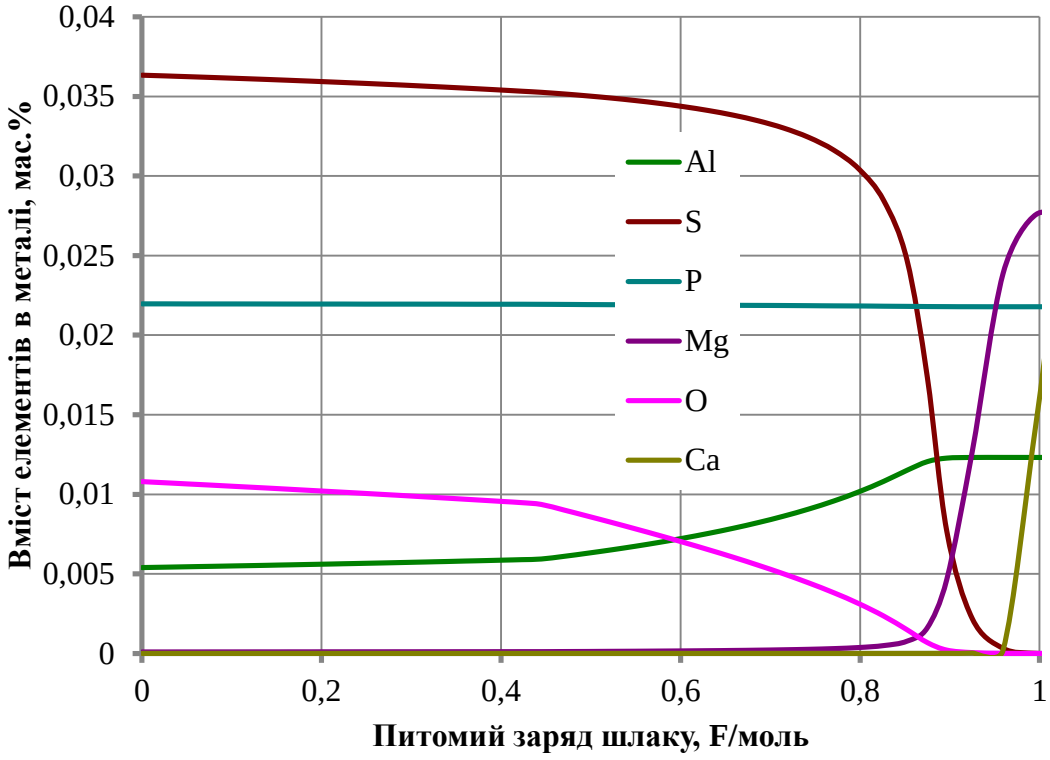
а)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Вміст елементів в металі, мас.%
Al
S
P
Mg
O
Ca
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

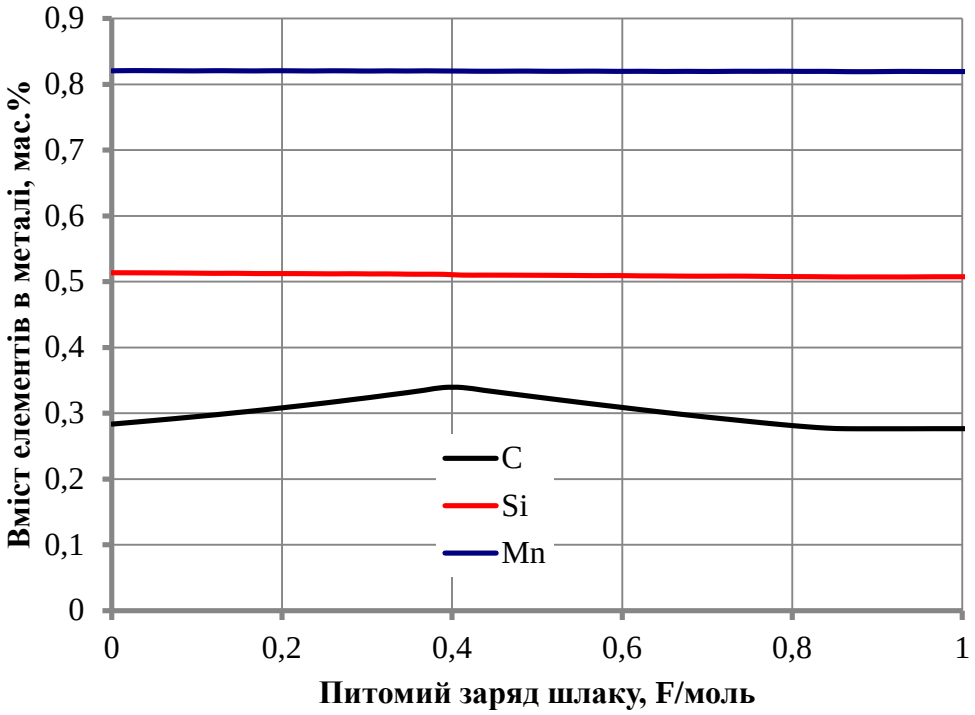
б)


0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Вміст елементів в металі, мас.%
C
Si
Mn
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

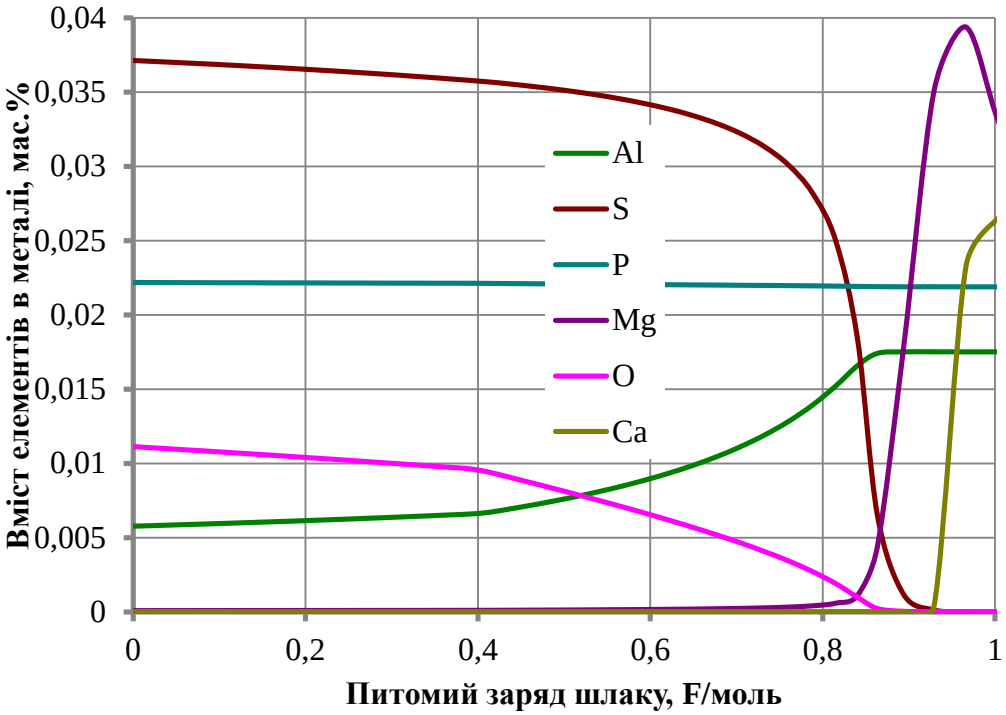
в)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Вміст елементів в металі, мас.%
Al
S
P
Mg
O
Ca
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)



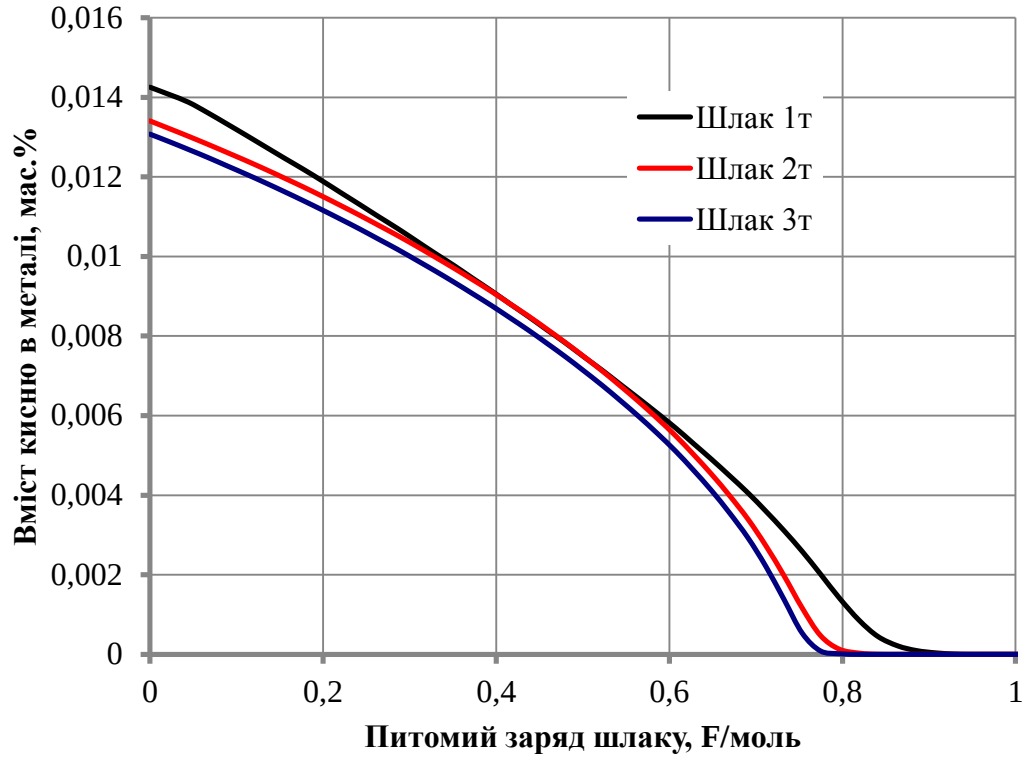
д)



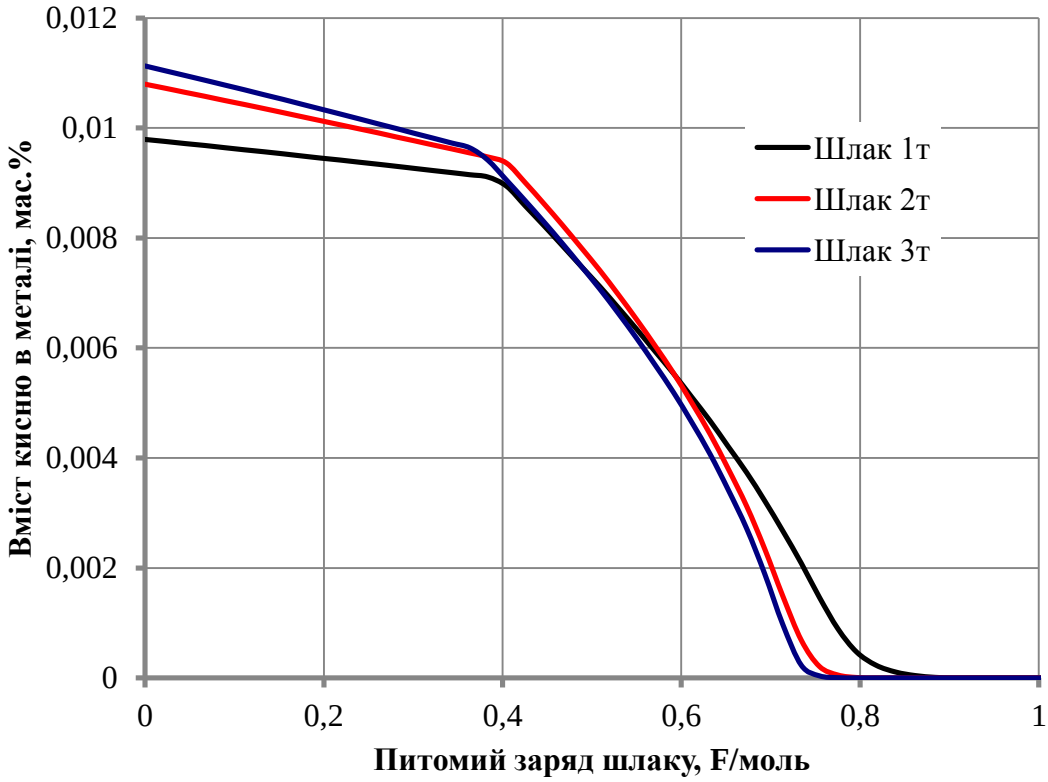
е)

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

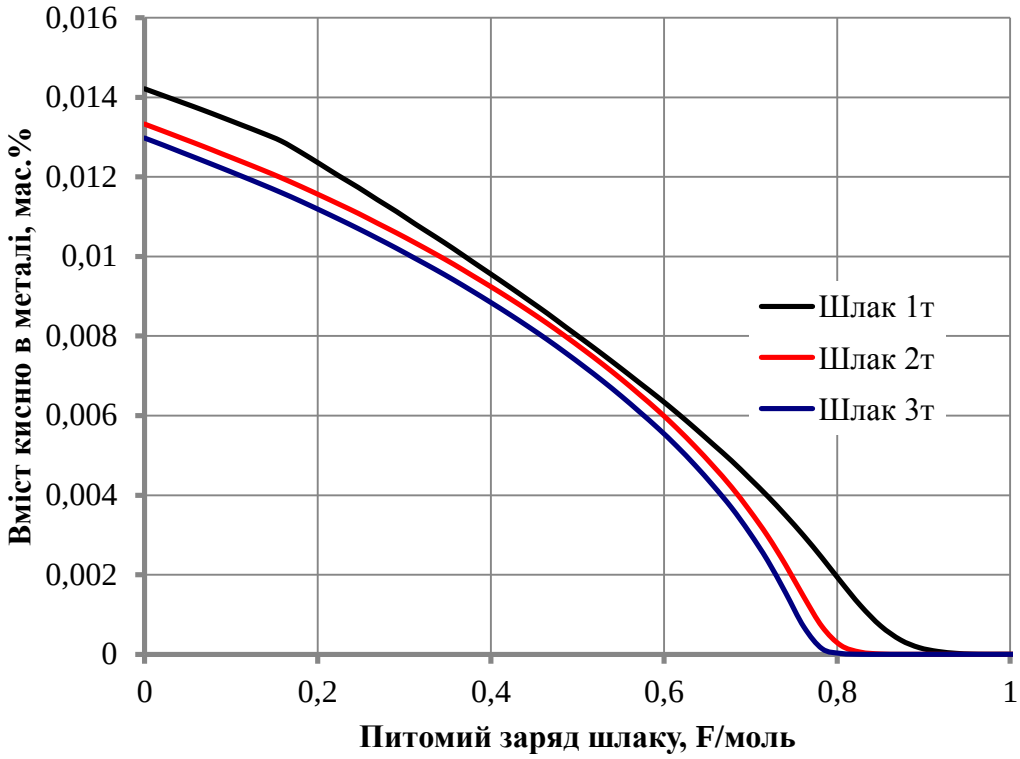
вуглець, марганець, кремній (а, в, д) ; сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


0,016
0,014
0,012
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст кисню в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

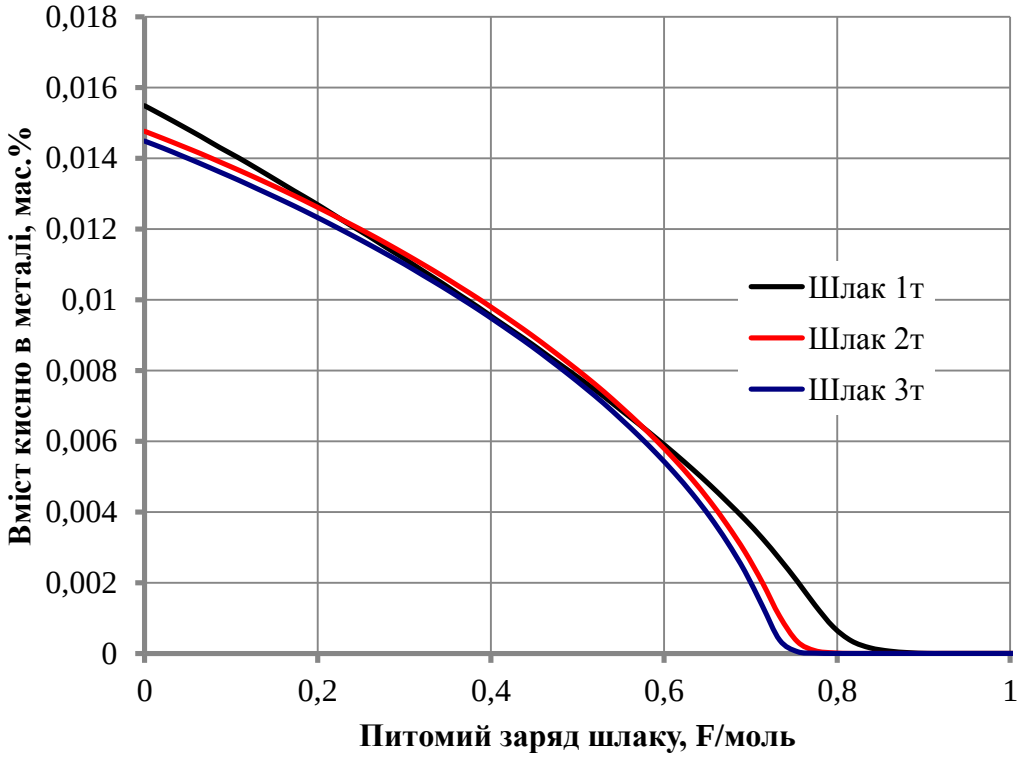
а)


0,012
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст кисню в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

б)

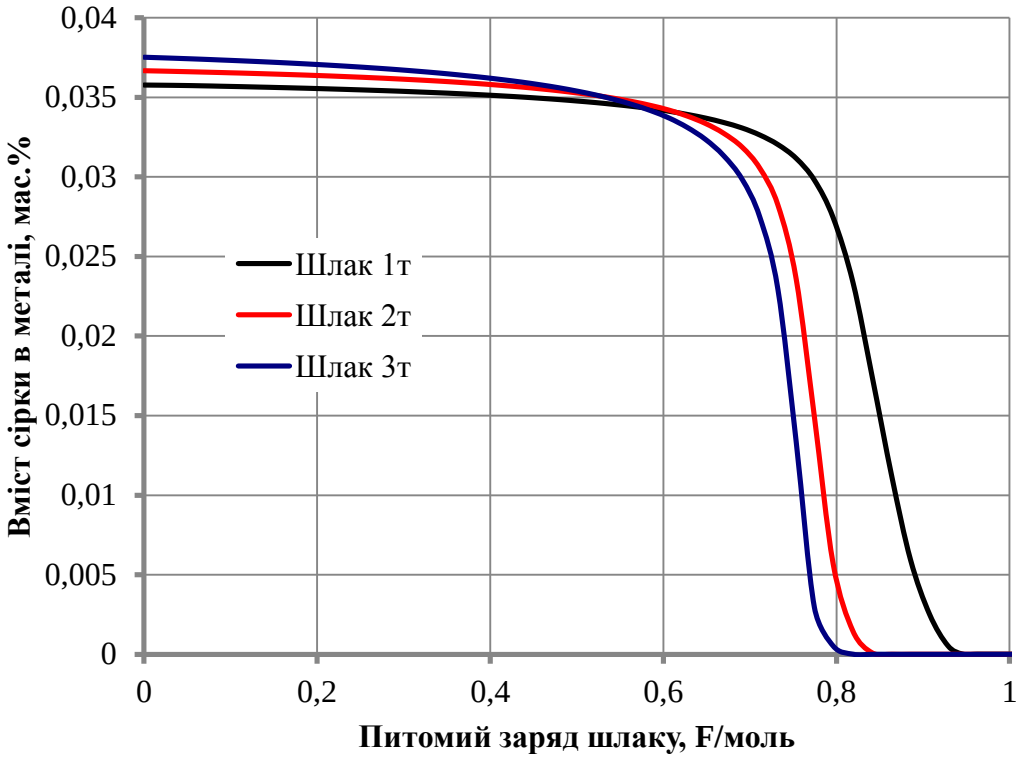


в)

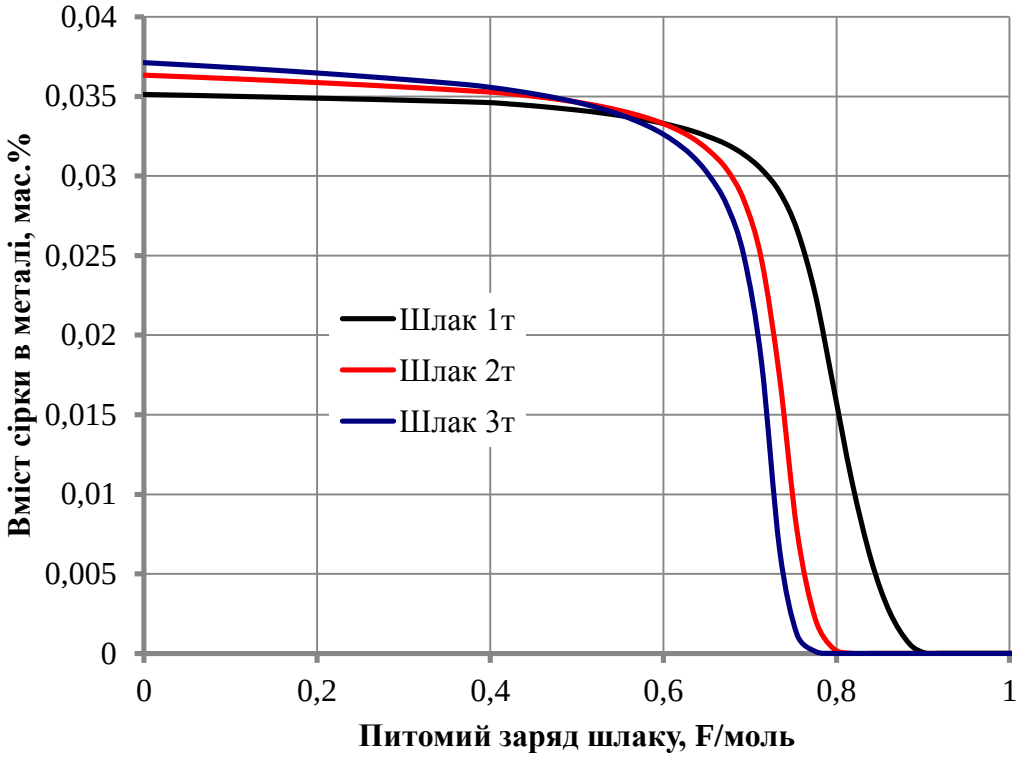


г)

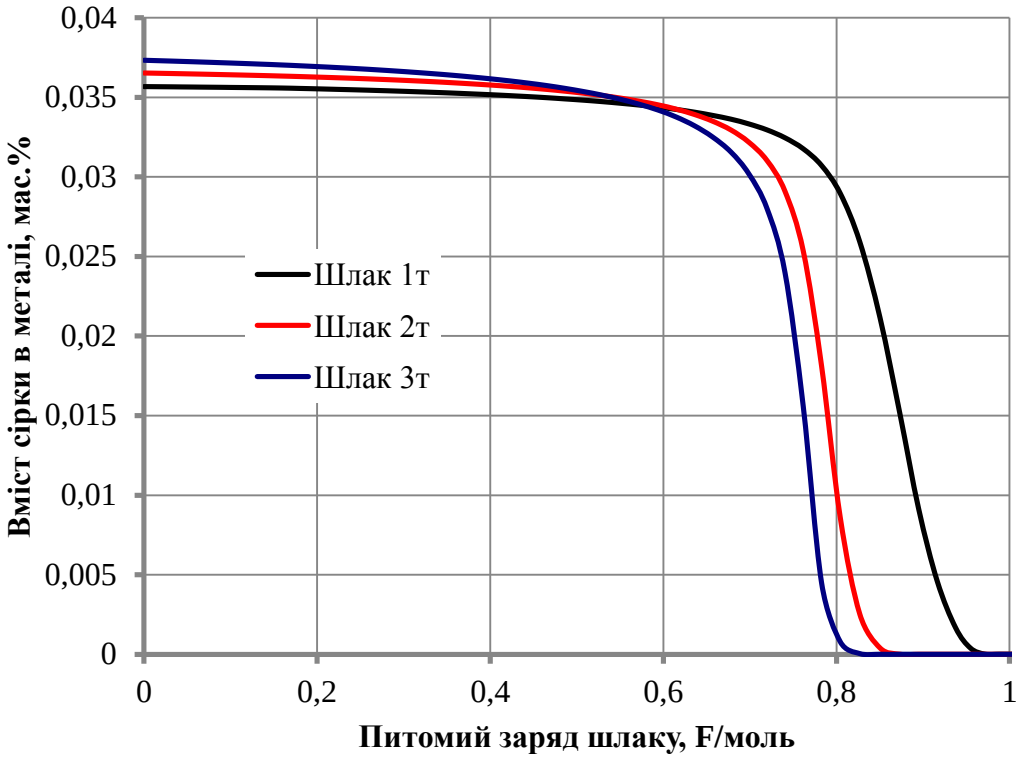
Рис 3.11 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст кисню в сталі:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст сірки в металі, мас.%
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

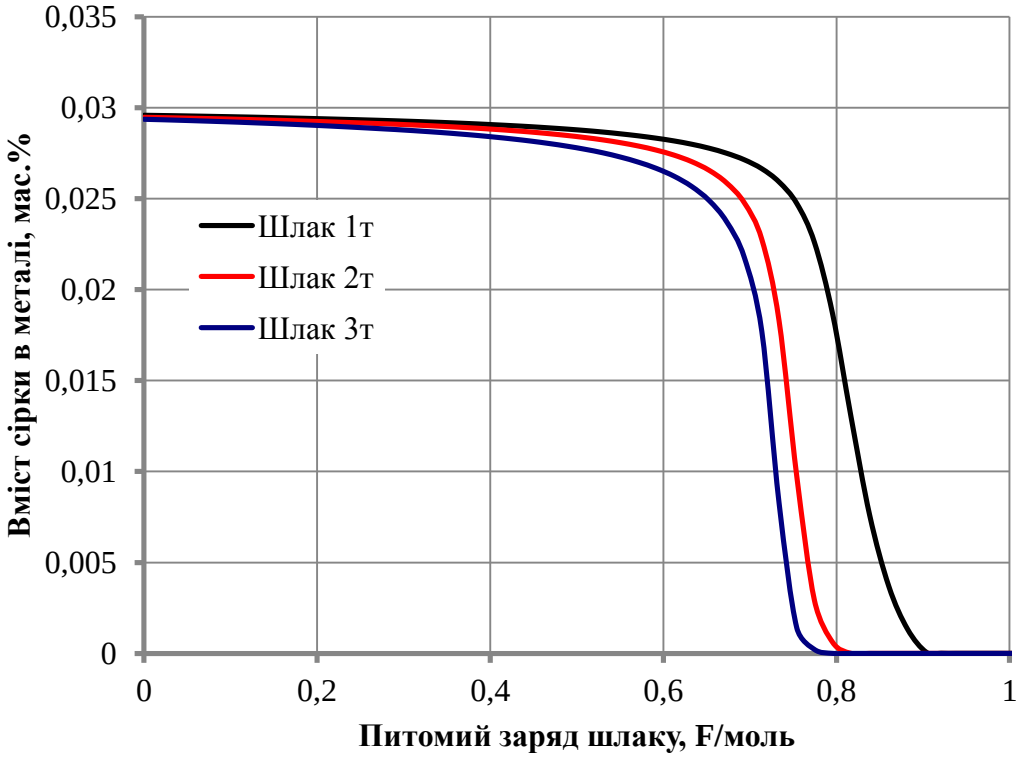
а)


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст сірки в металі, мас.%
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)

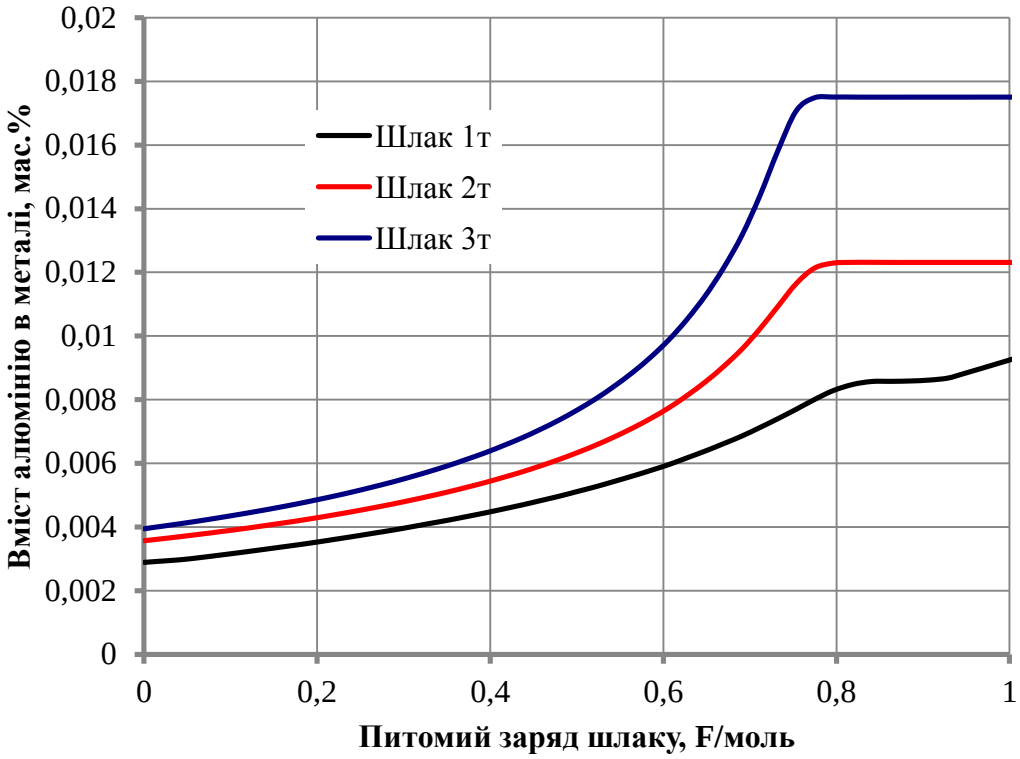


в)

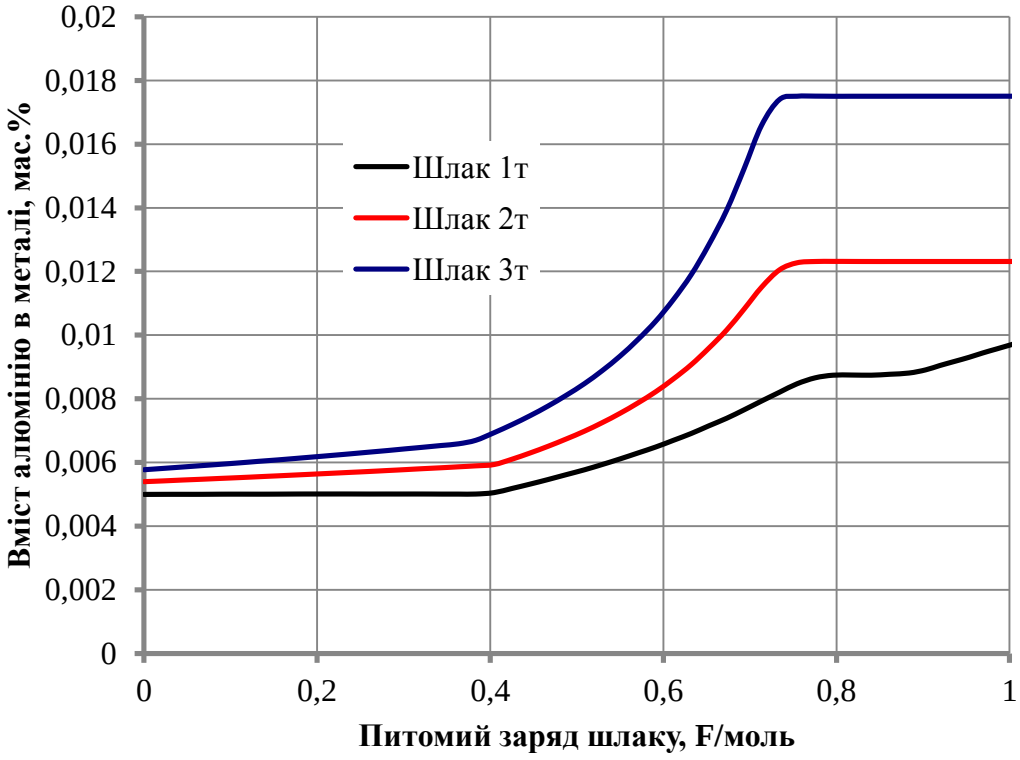


г)

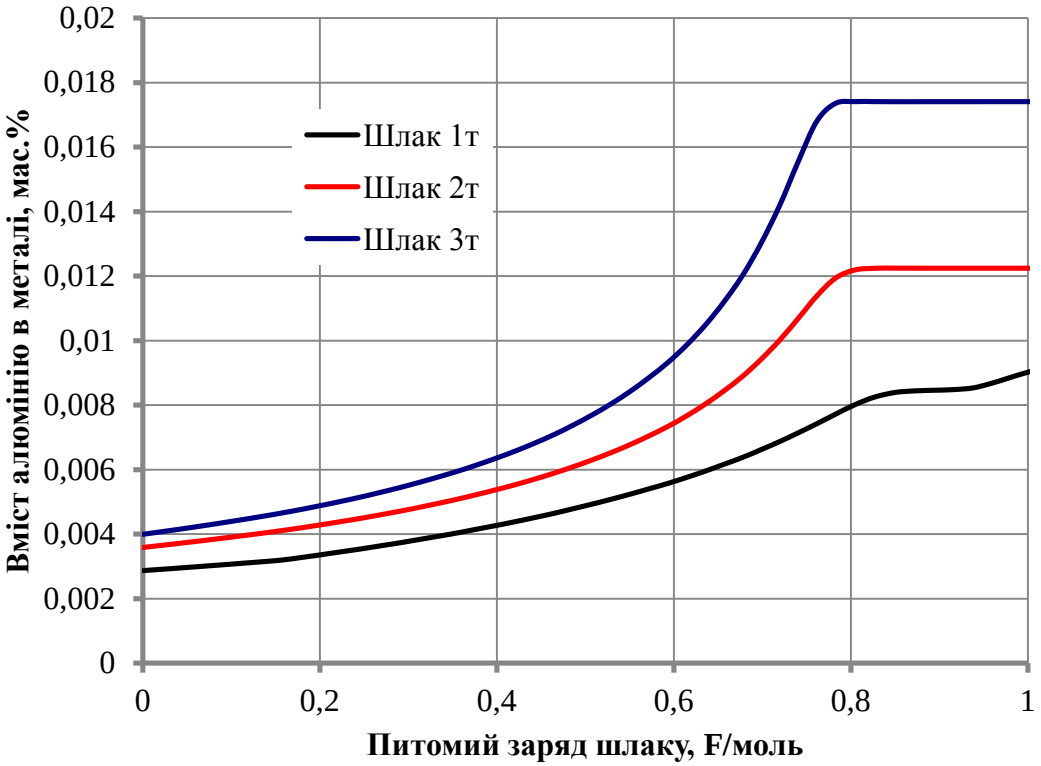
Рис 3.12 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст сірки в сталі:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


0,02
0,018
0,016
0,014
0,012
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0
Вміст алюмінію в металі, мас.%
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

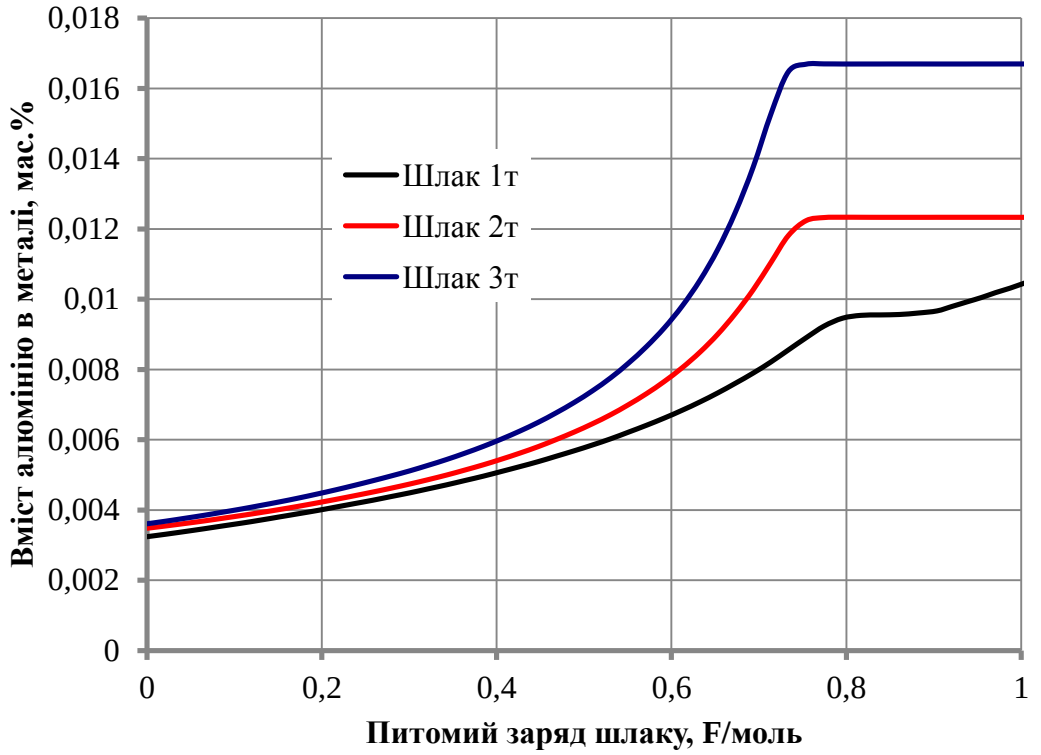
а)


0,02
0,018
0,016
0,014
0,012
0,01
0,008
0,006
0,004
0,002
0
Вміст алюмінію в металі, мас.%
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)

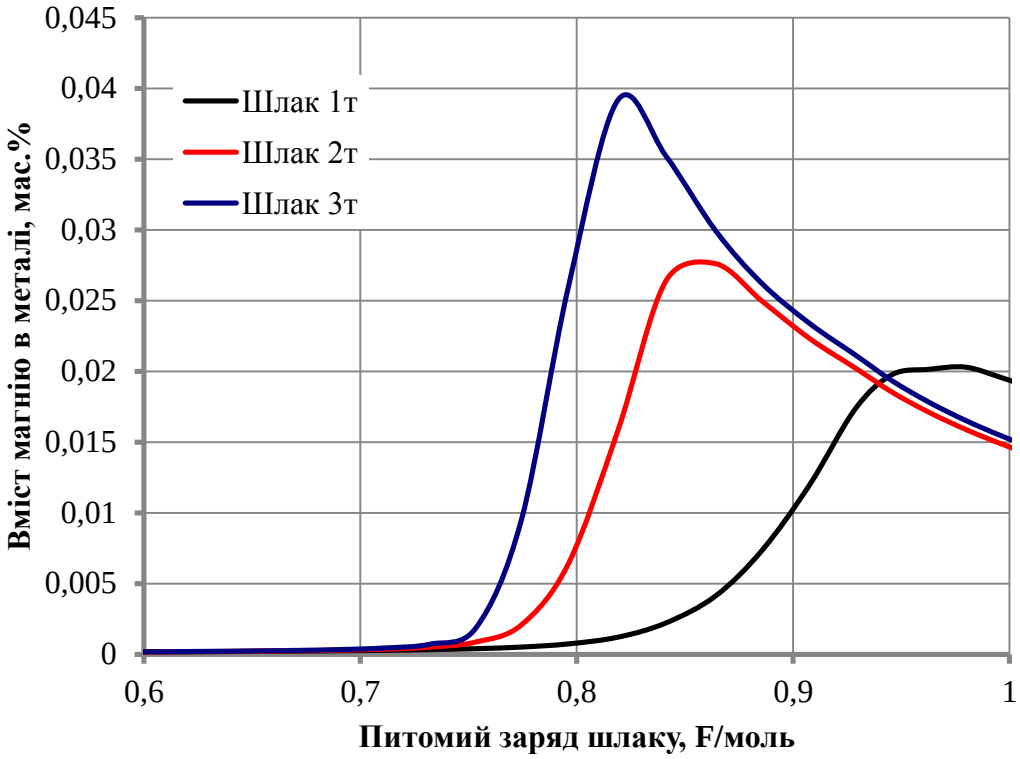


в)

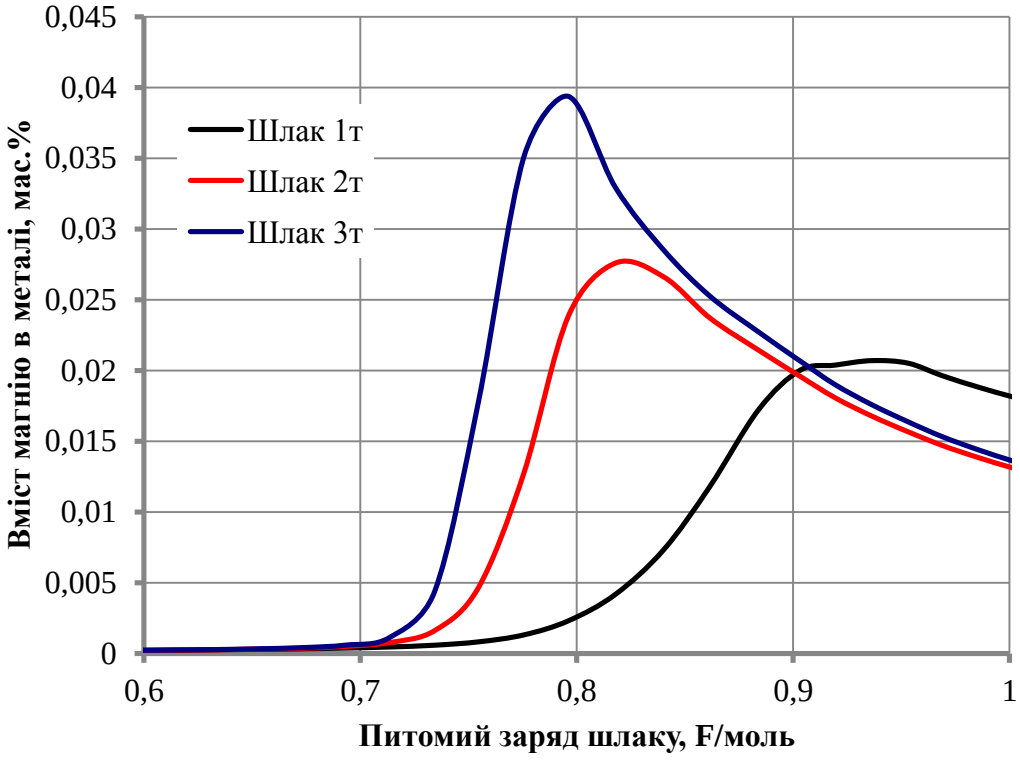


г)

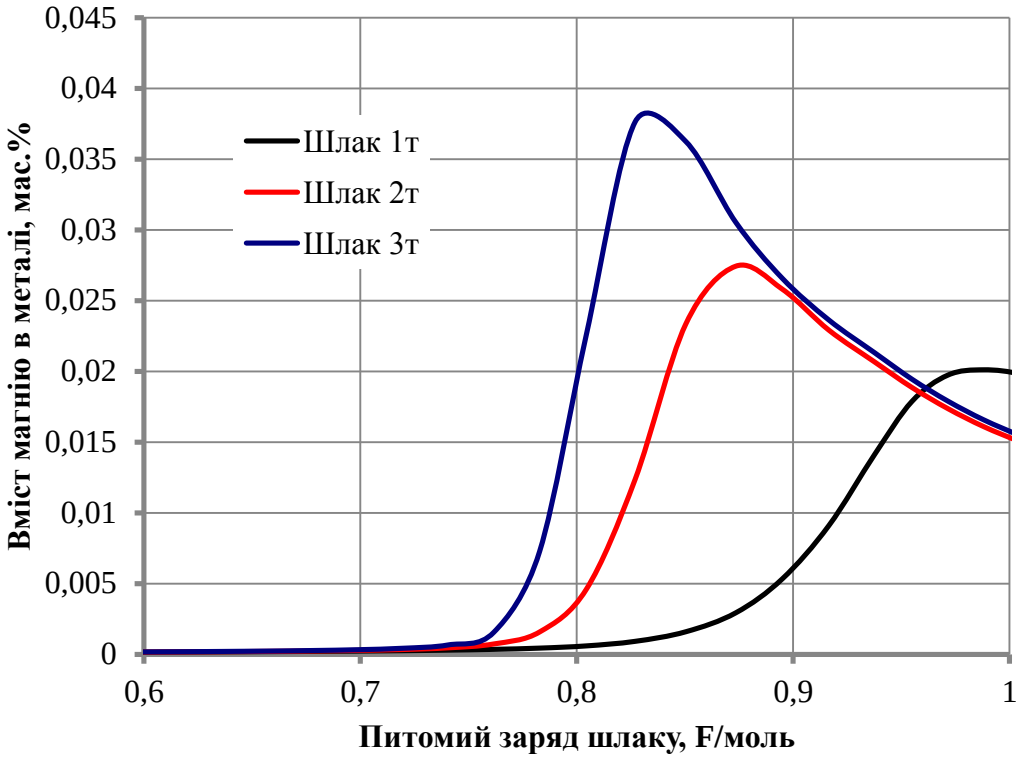
Рис 3.13 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст алюмінію в сталі:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


0,045
0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Вміст магнію в металі, мас.%
0,6
0,7
0,8
0,9
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

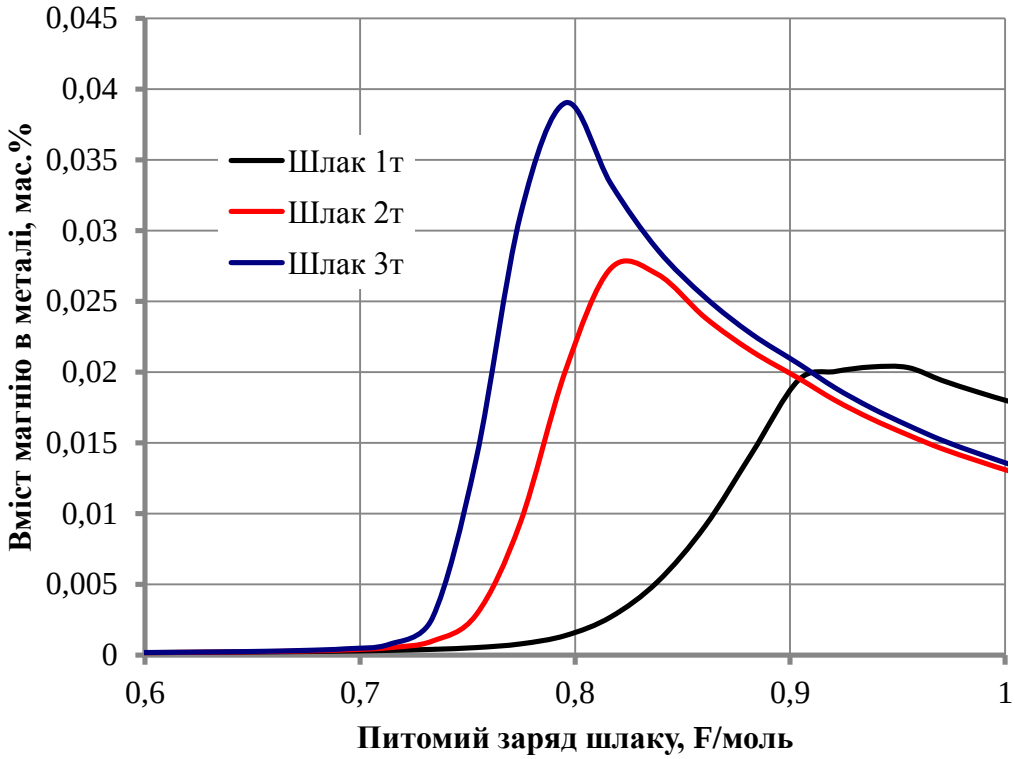
а)


0,045
0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Вміст магнію в металі, мас.%
0,6
0,7
0,8
0,9
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)

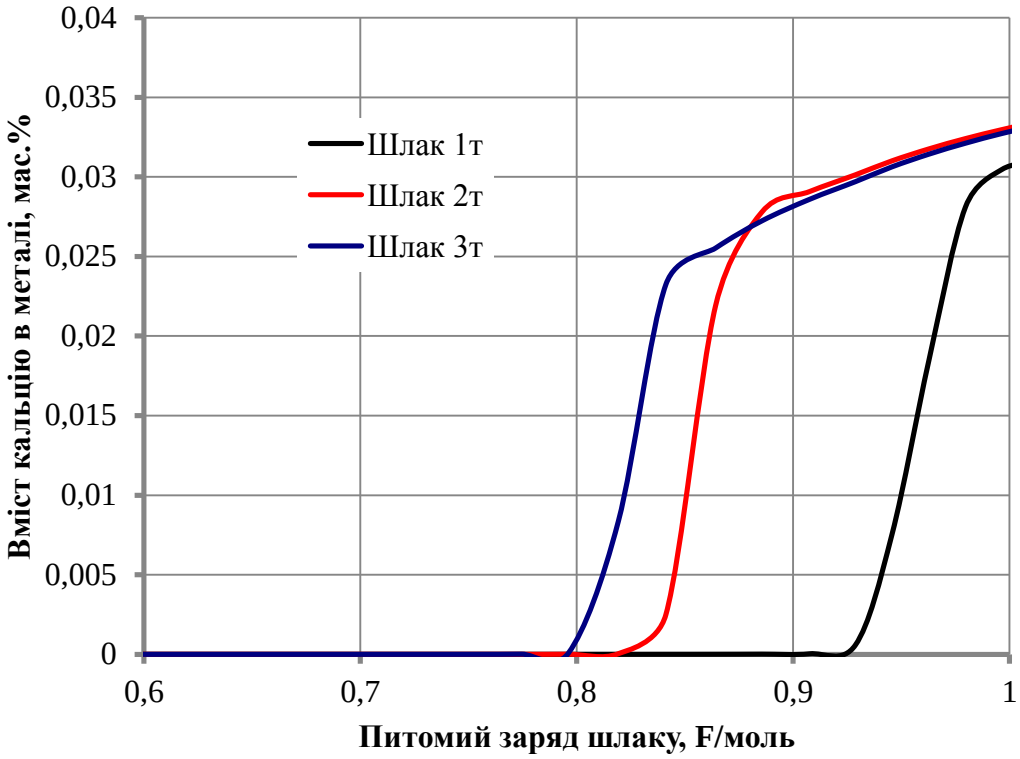


в)

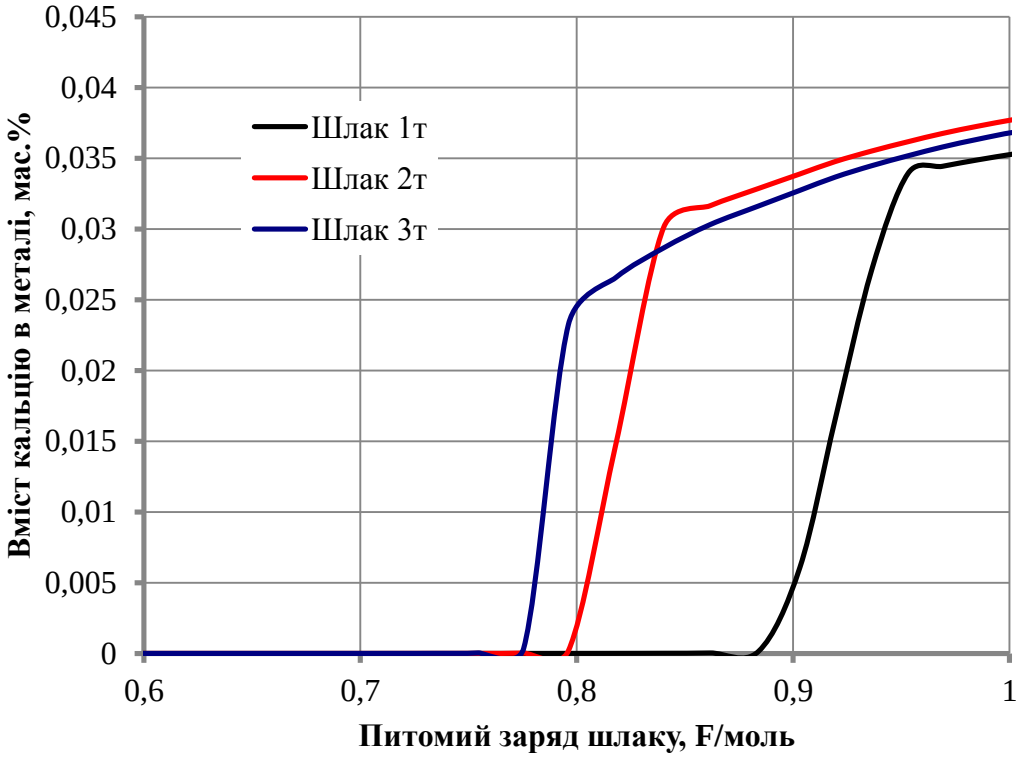


г)

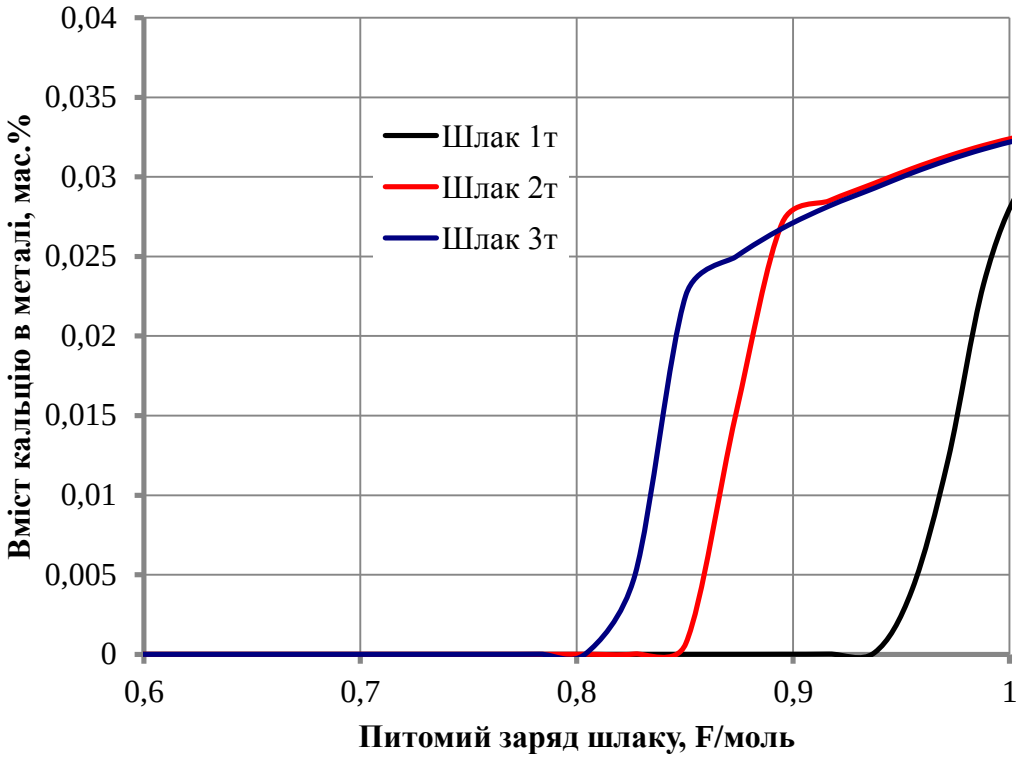
Рис 3.14 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст магнію в сталі:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0,6
0,7
0,8
0,9
1
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Вміст кальцію в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль

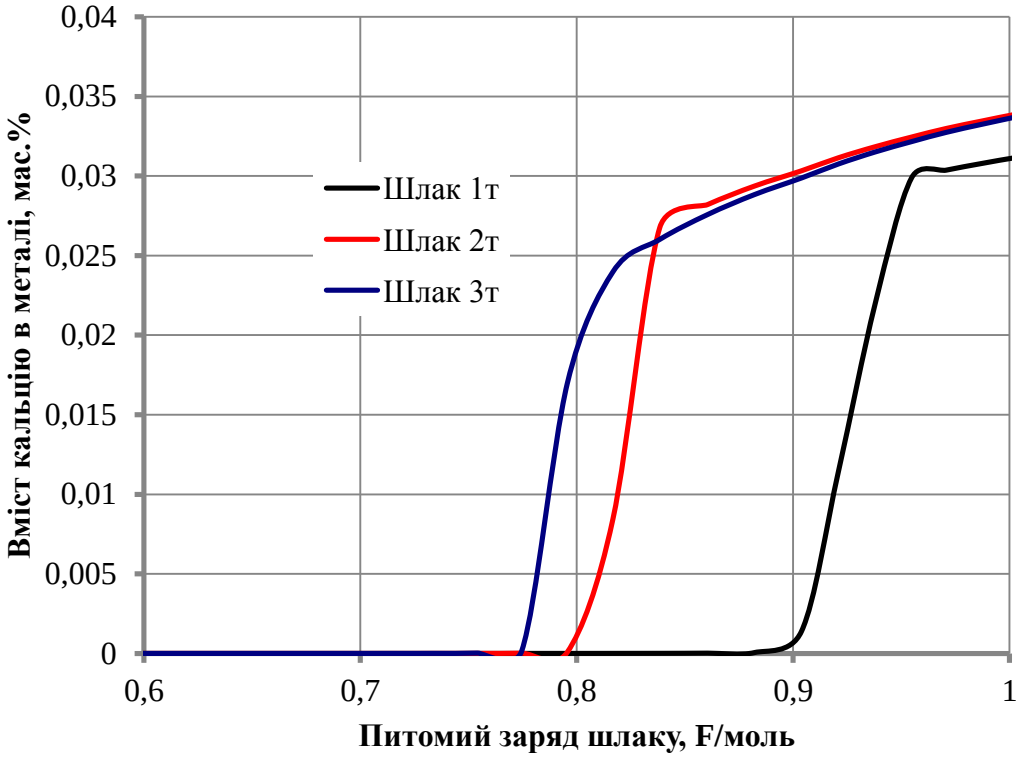
а)


0,045
0,04
0,035
0,03
0,025
0,02
0,015
0,01
0,005
0
0,6
0,7
0,8
0,9
1
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Вміст кальцію в металі, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль

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 ≥ 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 кинетіку 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 [14; 15], 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.

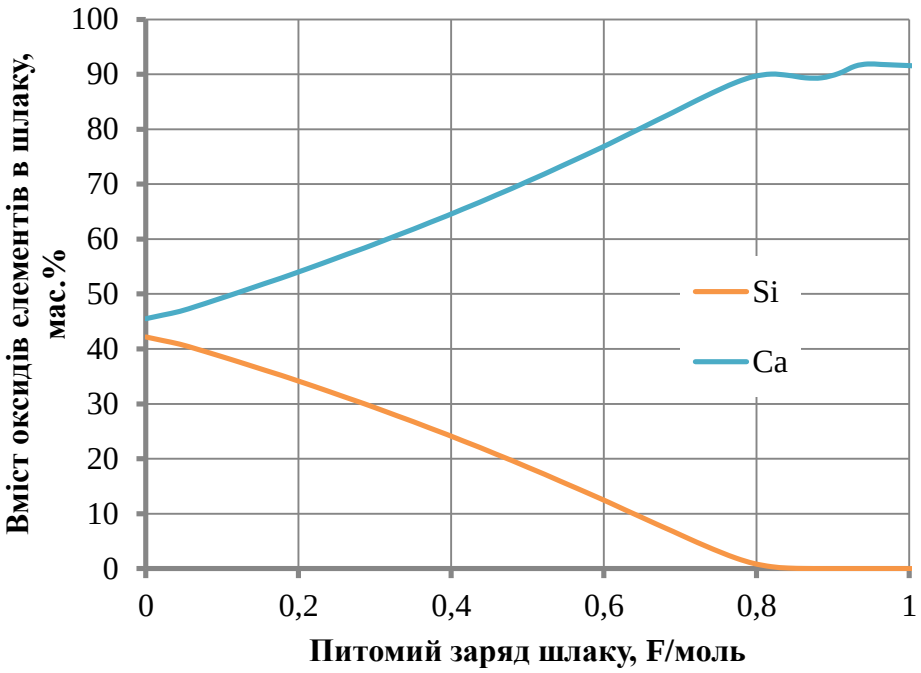
Вміст кальцію і магнію в сталі різко зростає після досягнення питомого заряду шлаку 0,8-0,9 F/моль, коли починається інтенсивне газоутворення. Початок зростання вмісту цих елементів залежить також від маси шлаку: чим більше маса шлаку, тим менший заряд шлаку потрібен для зростання їх концентрації в металі.

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

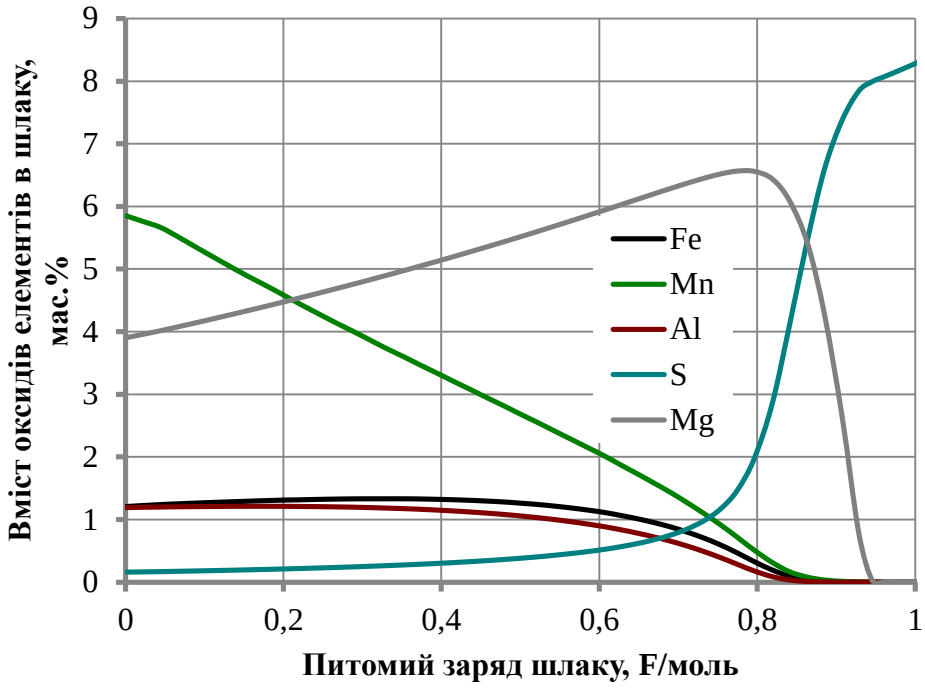
Вміст фосфору в досліджуваних сталях практично не змінюється.

3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку

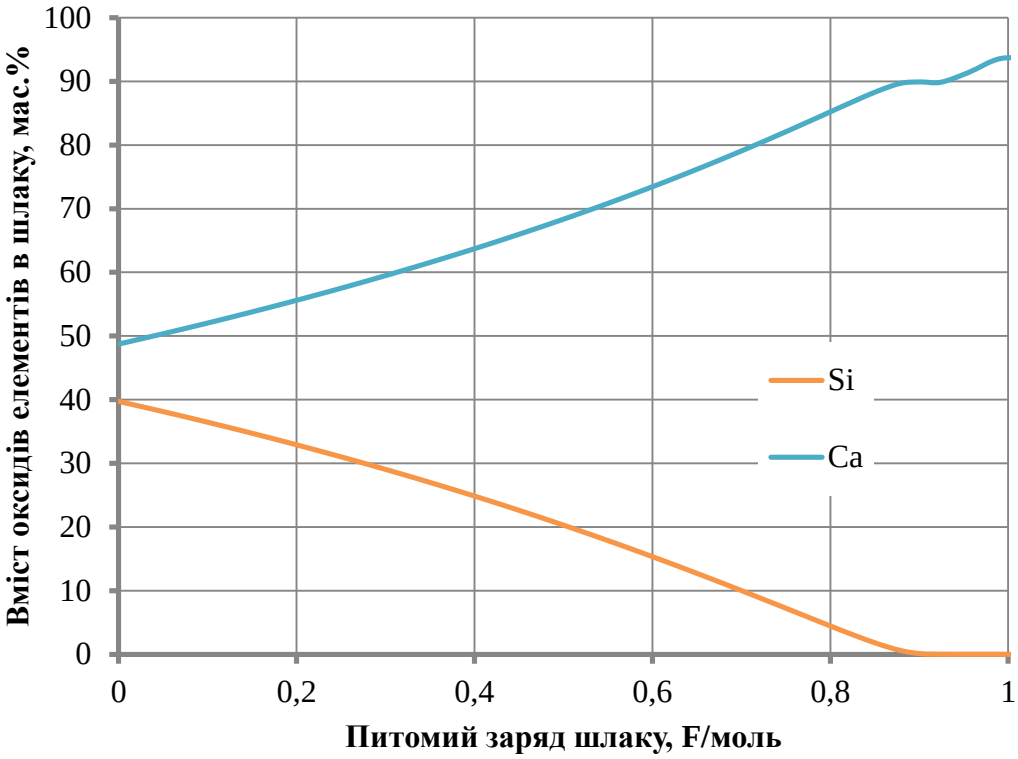
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку (окрім сірки). На рисунках 3.16–3.23 наведено відповідні результати розрахунків.



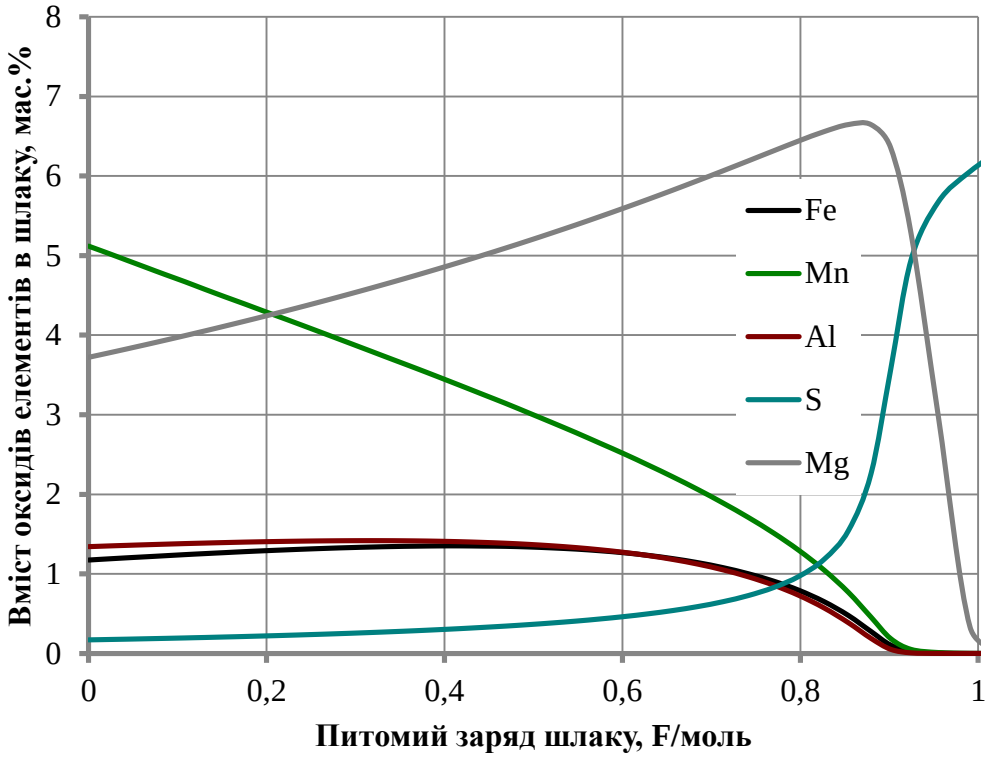
а)



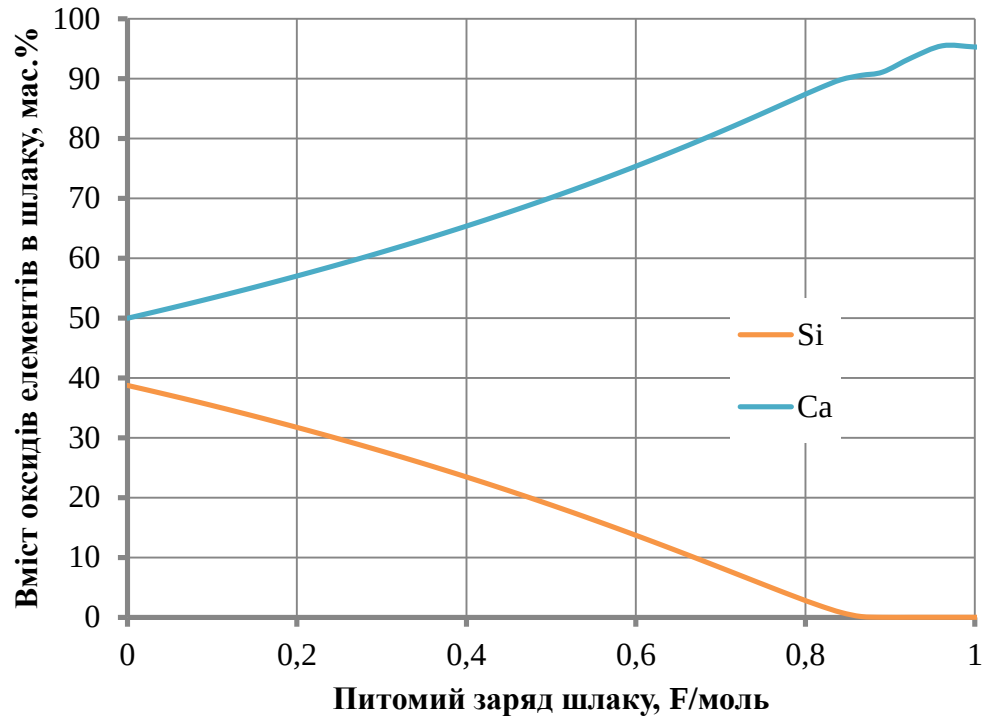
б)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

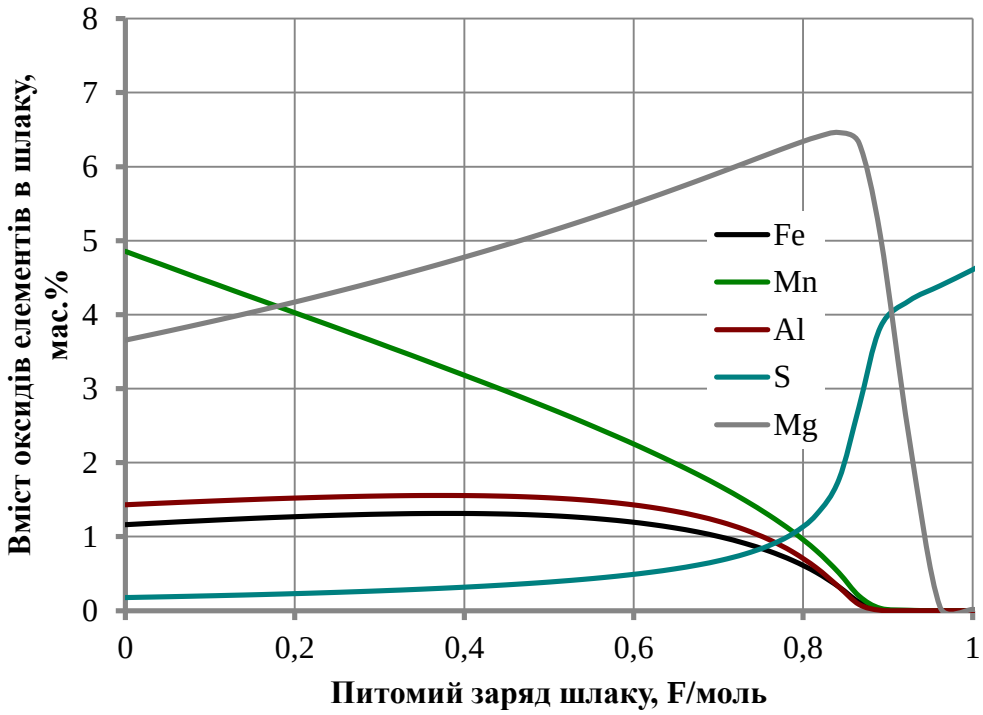
в)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

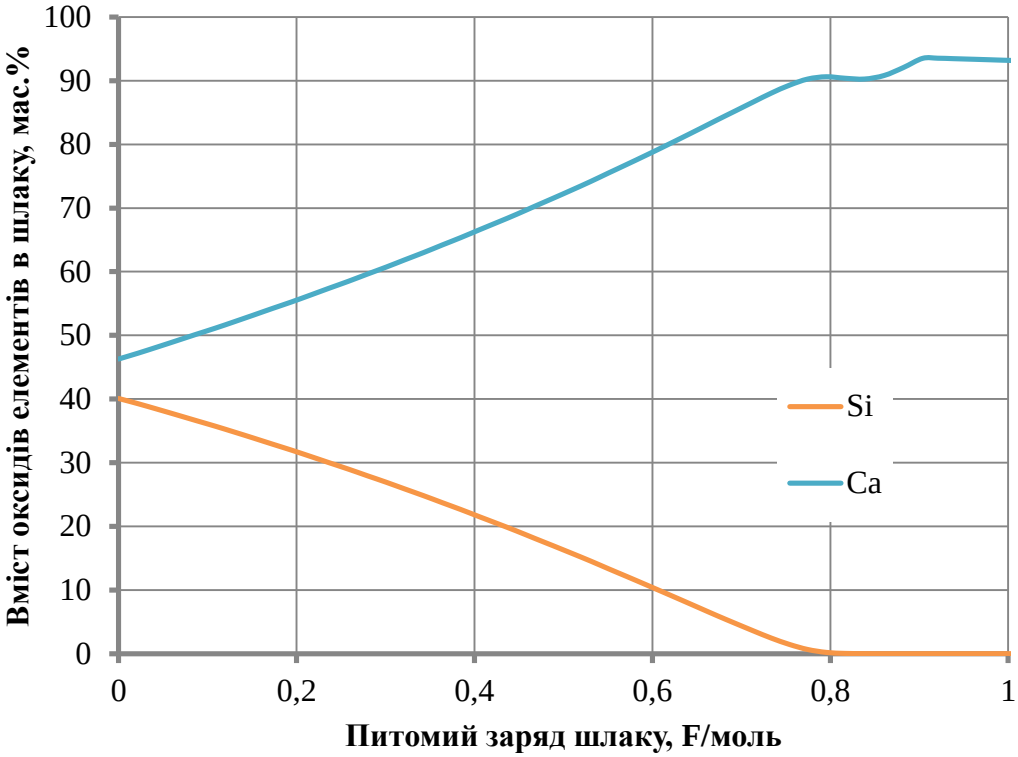


д)

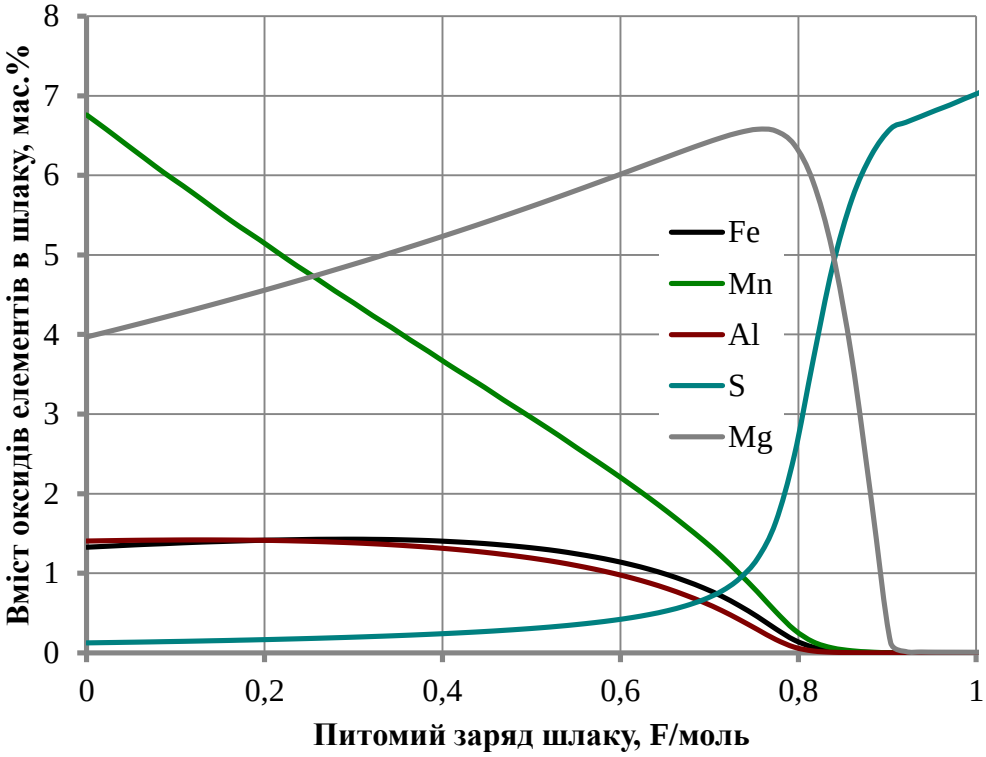


е)

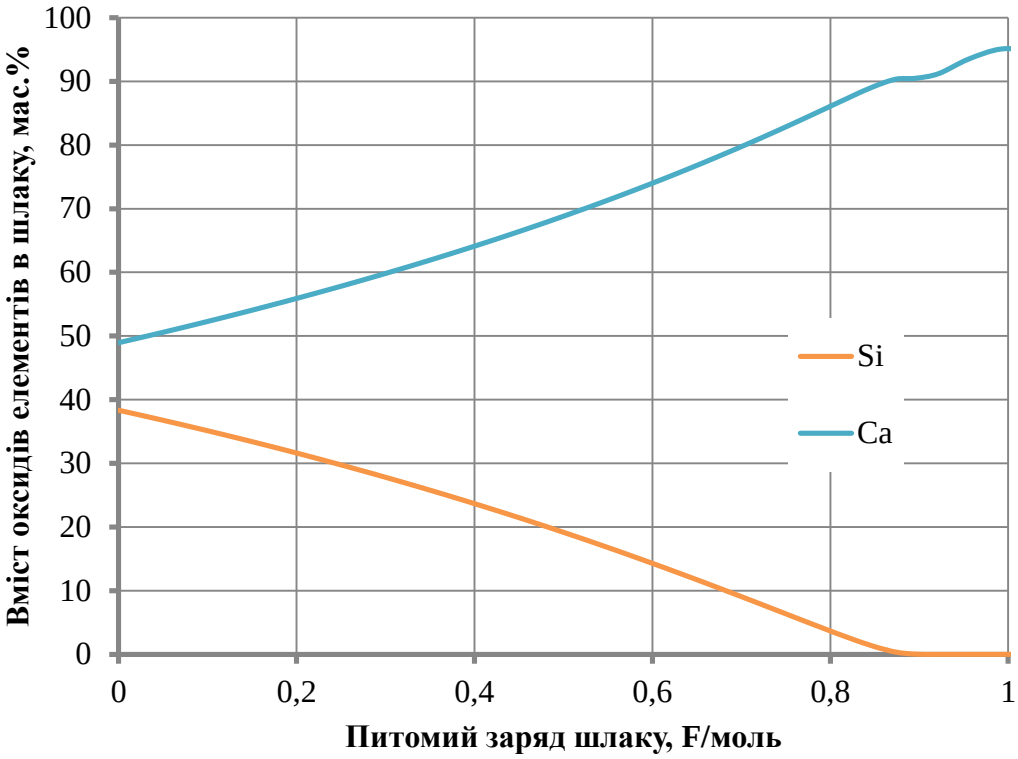
Рис 3.16 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 12MnSi4-3:
кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е)
при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

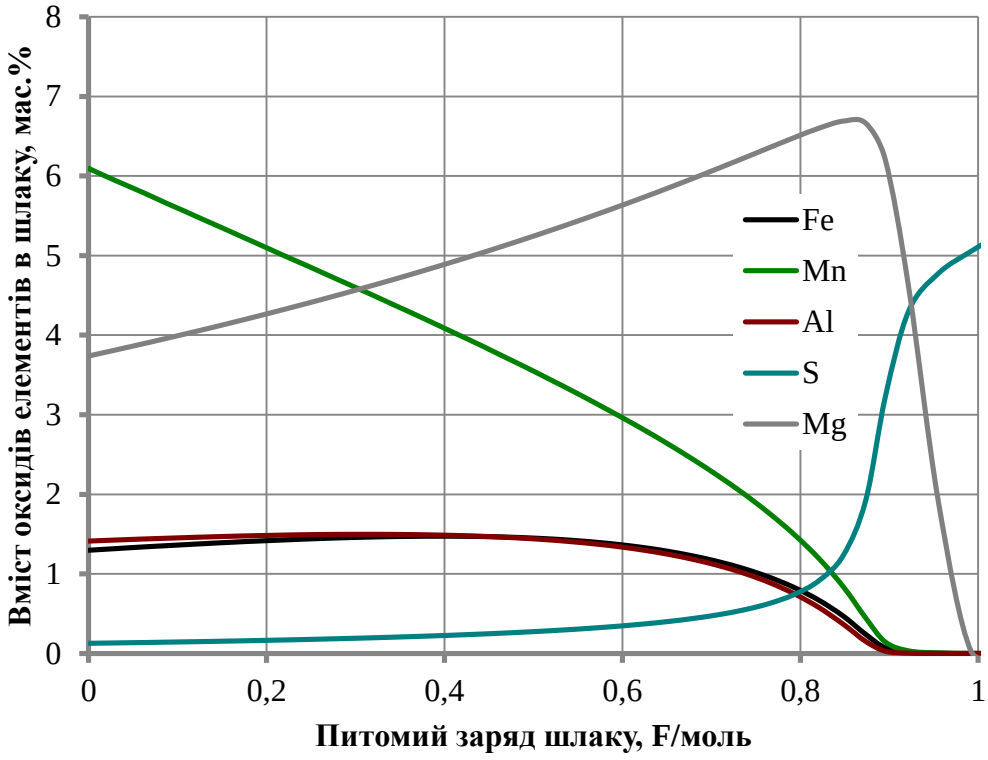
а)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

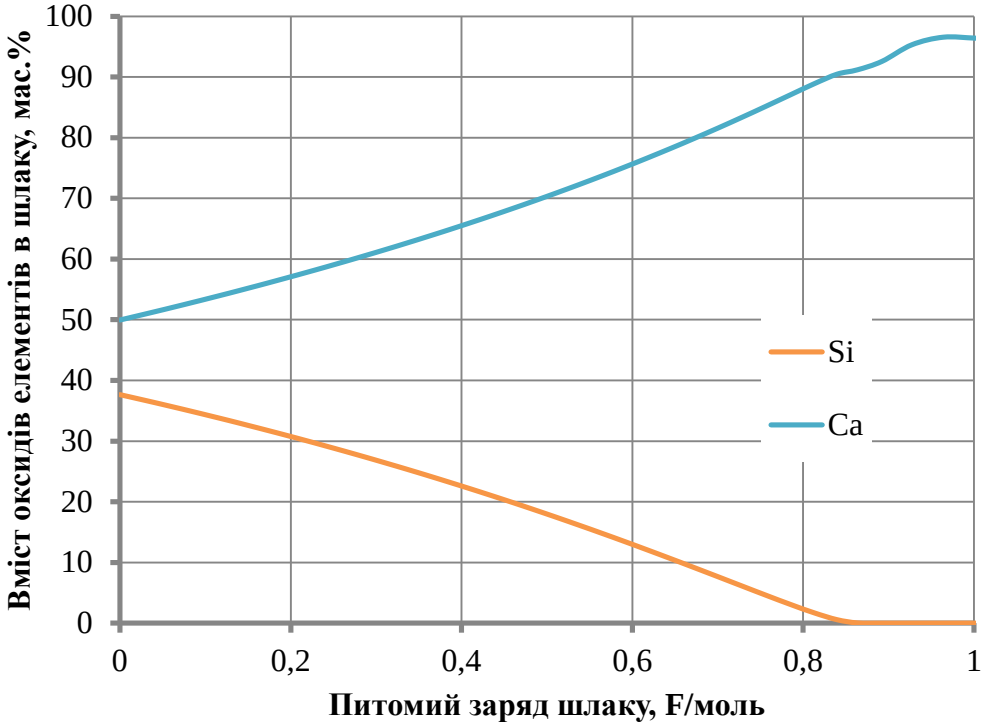
б)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

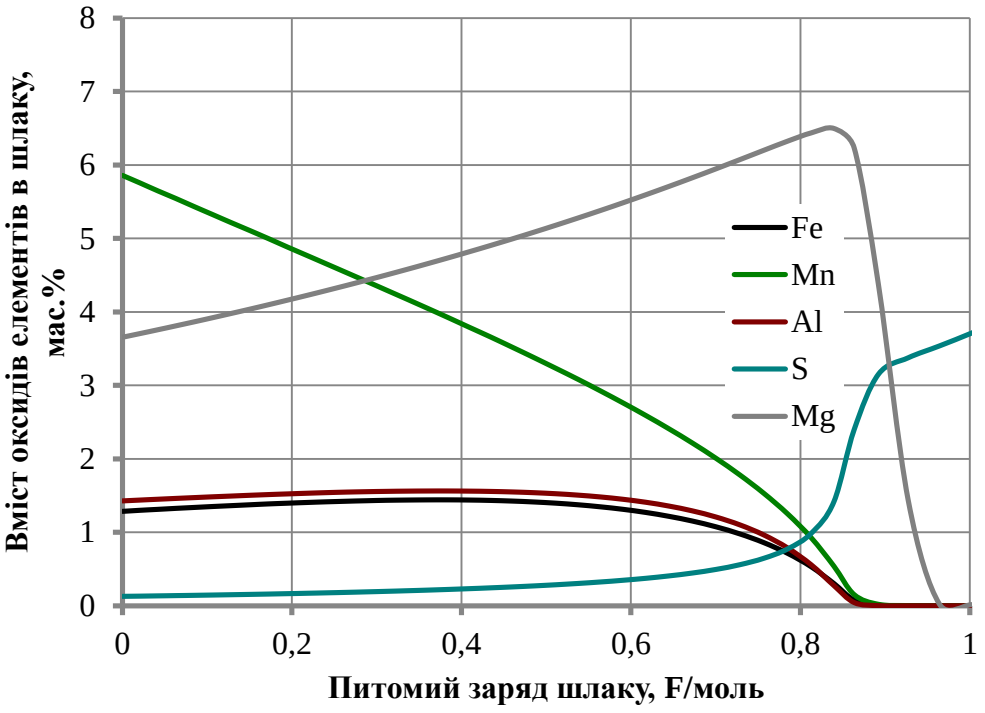
в)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

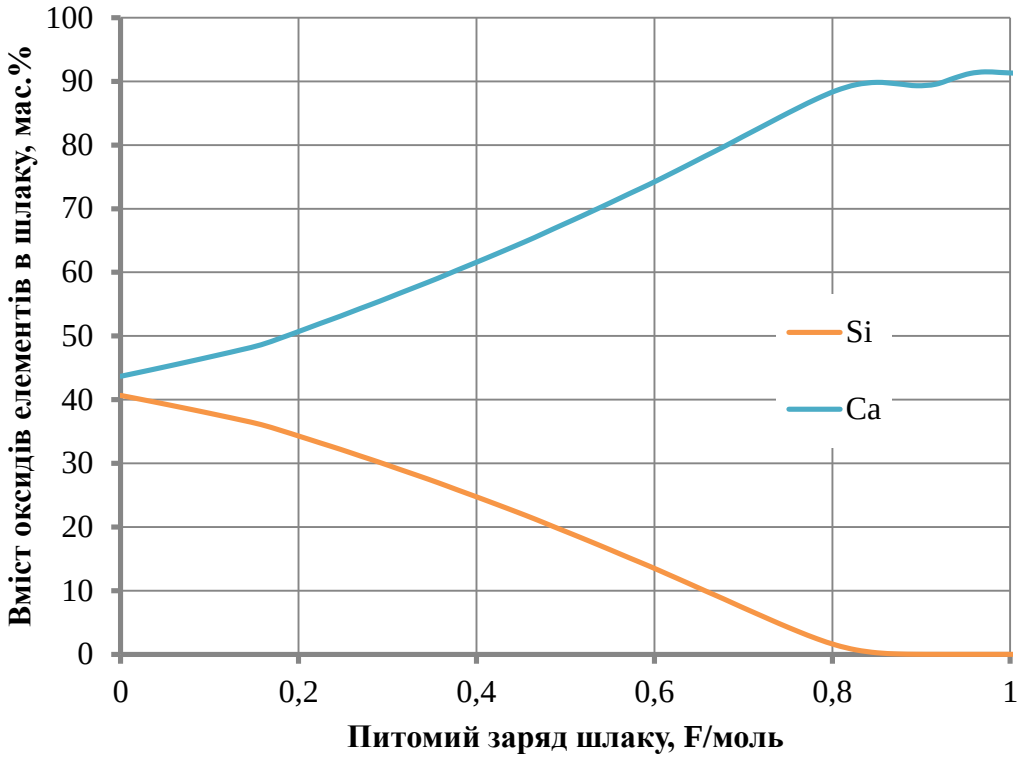


д)

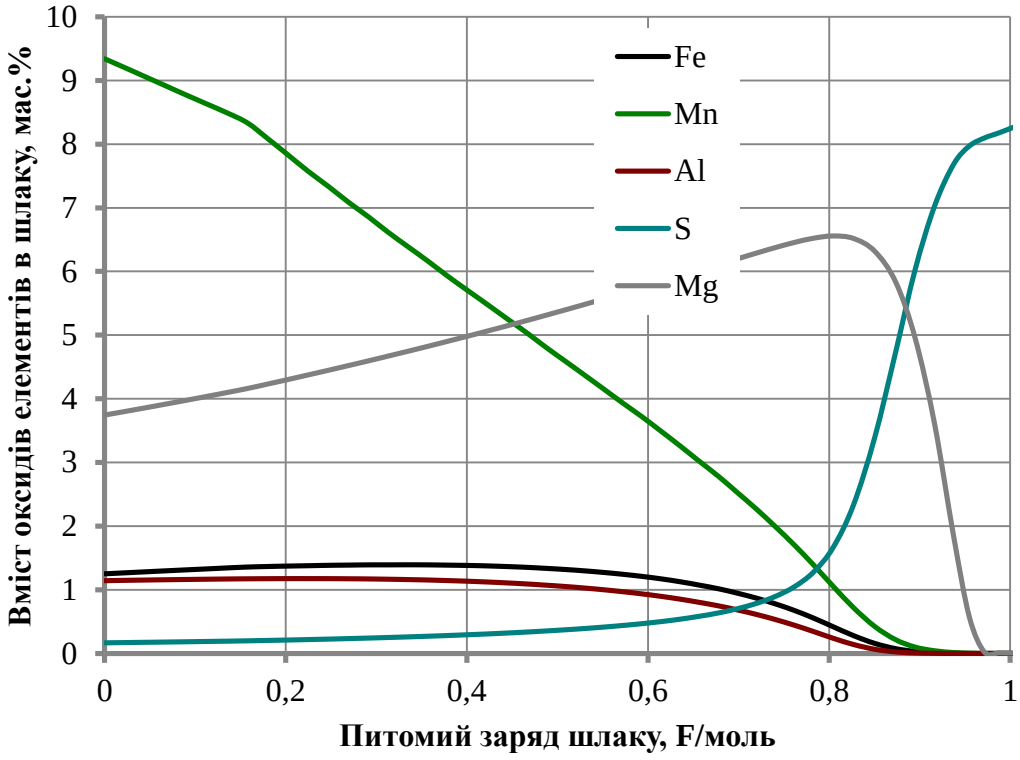


е)

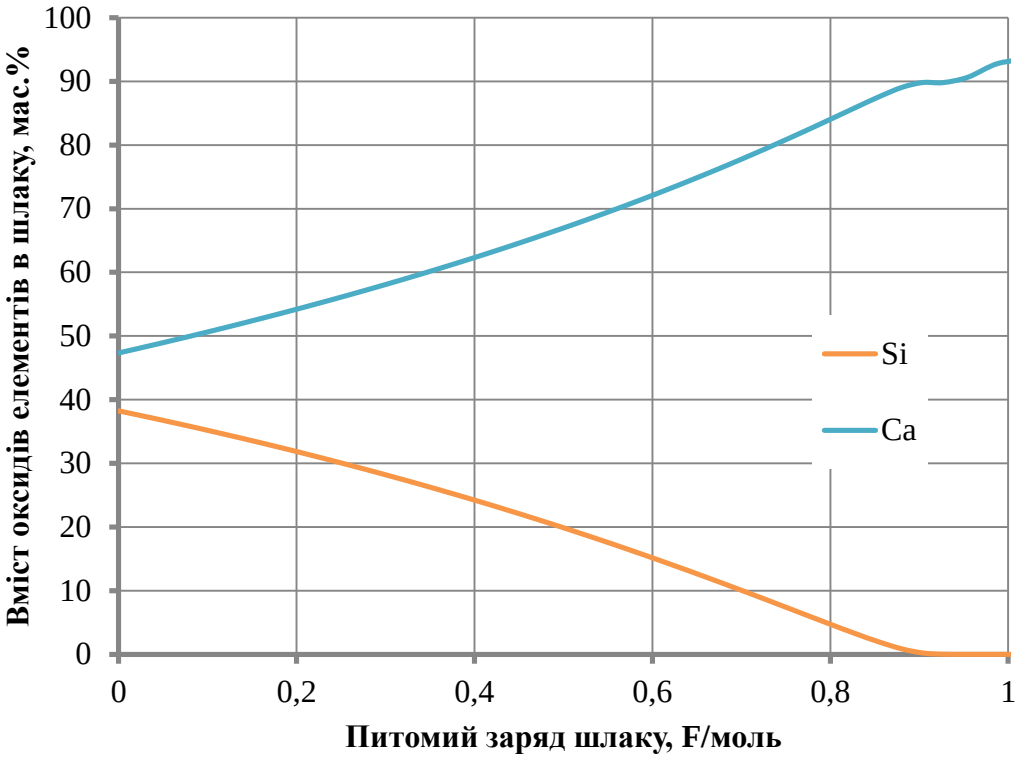
Рис 3.17 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 14MnCrSi4-3-2:
кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е)
при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

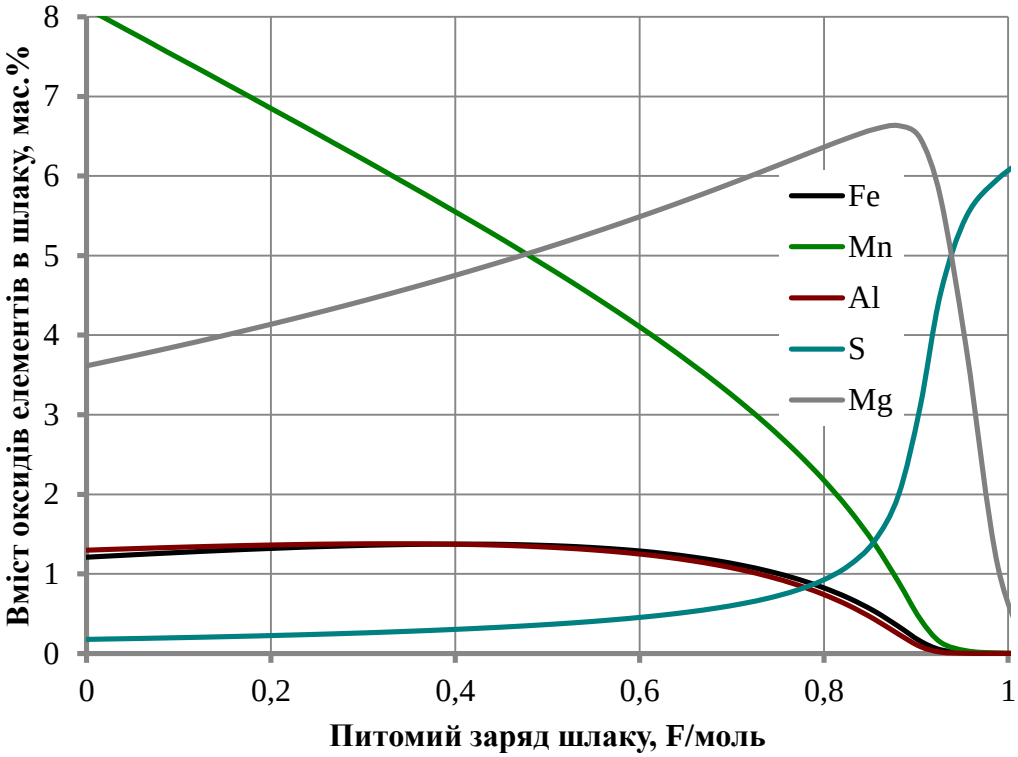
а)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

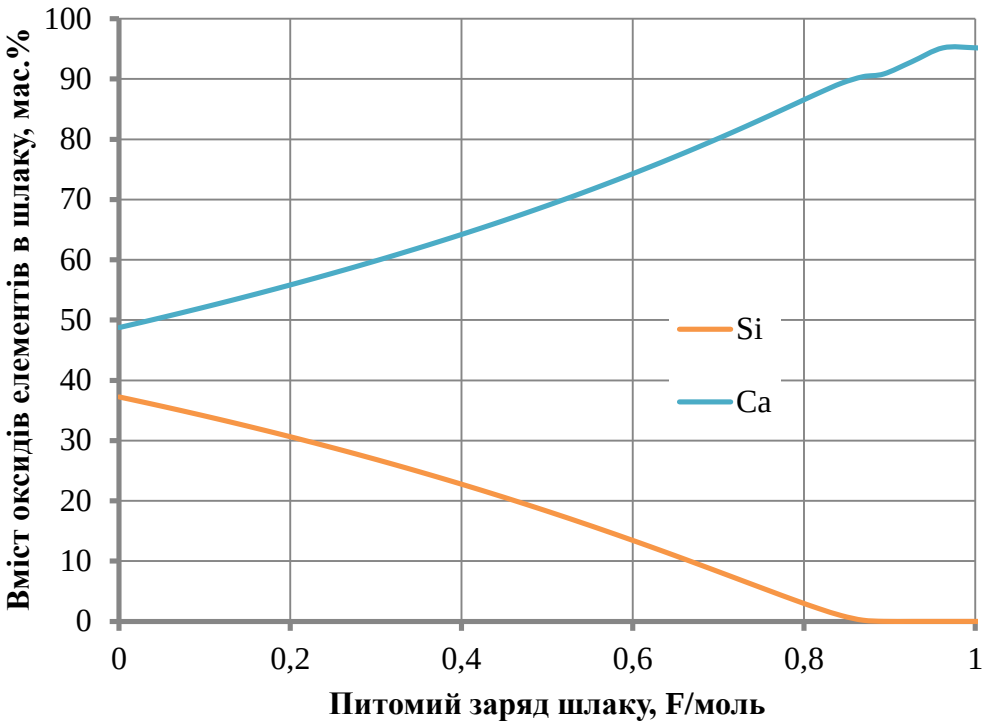
б)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

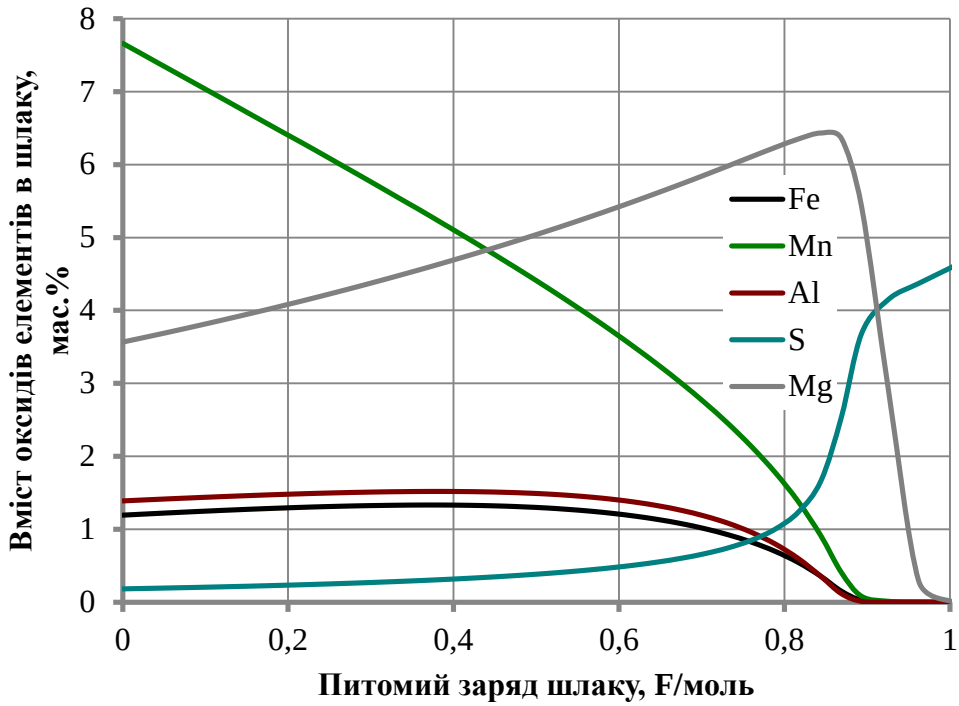
в)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

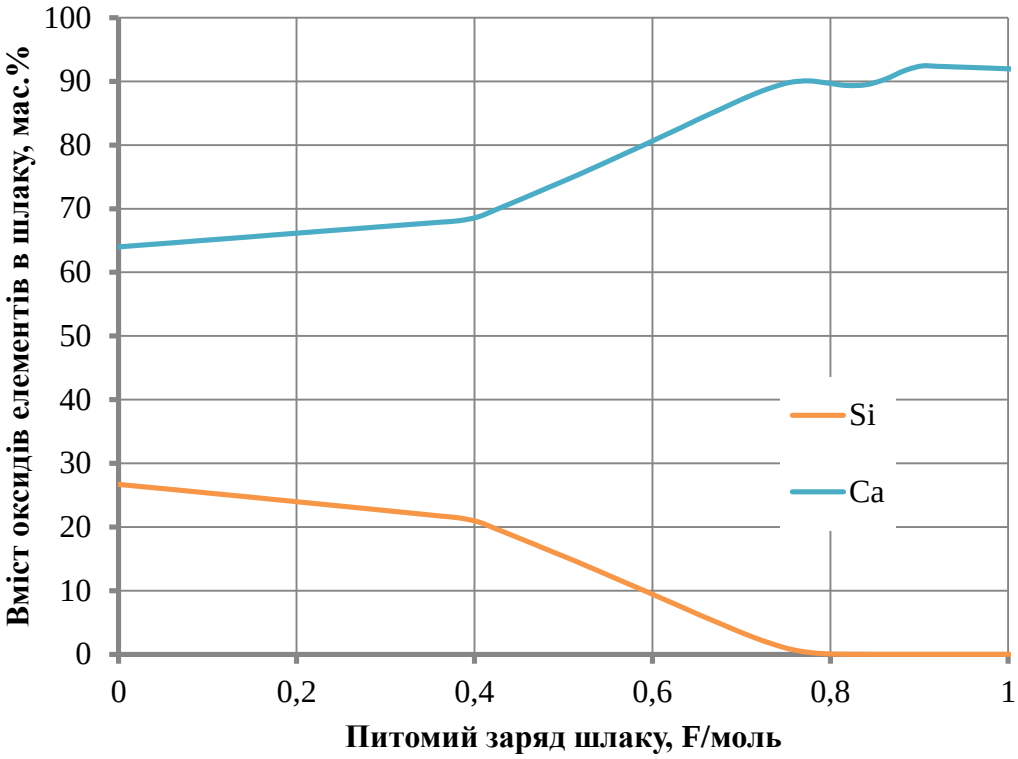


д)

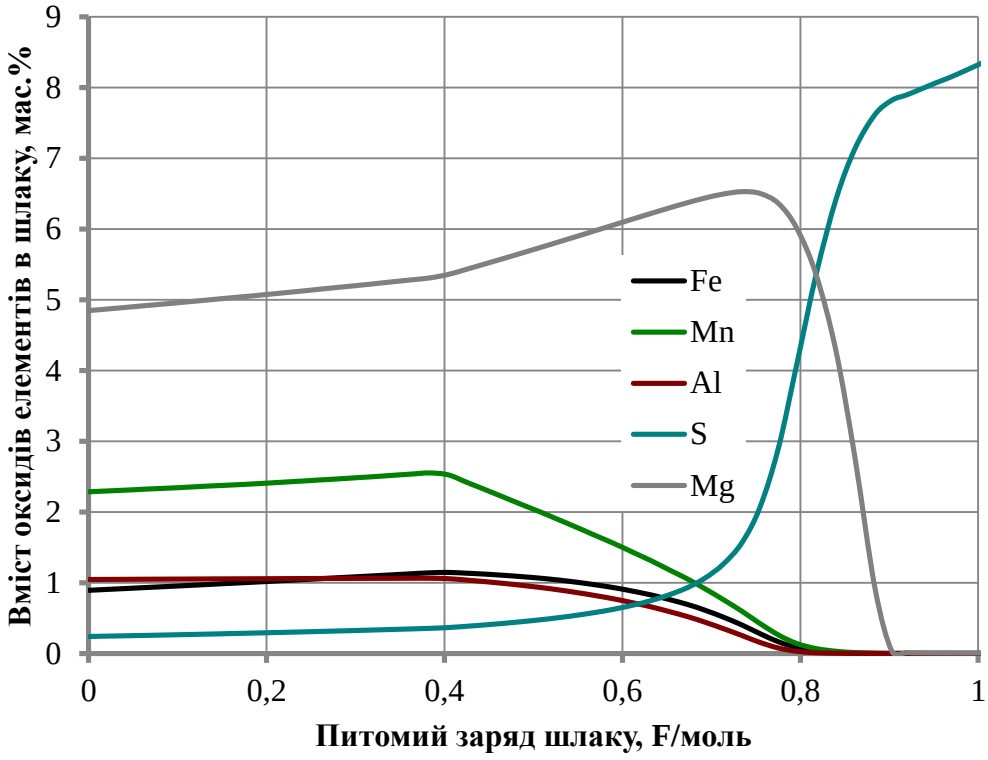


е)

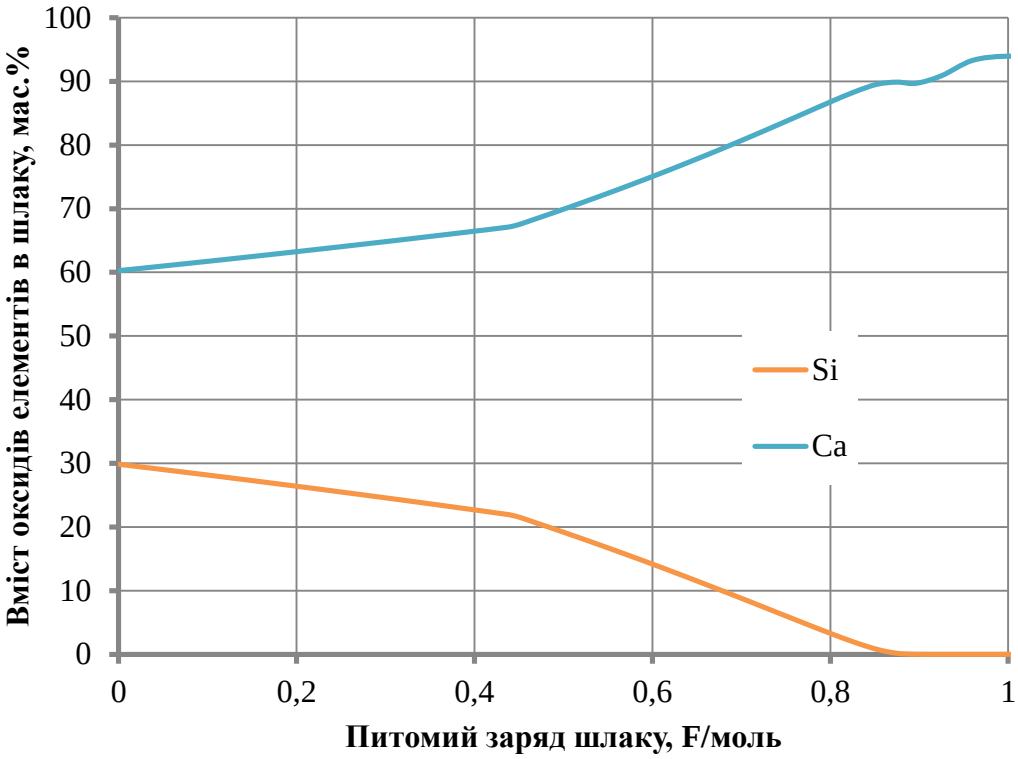
Рис. 3.18 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 9MnSi6-3:
кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

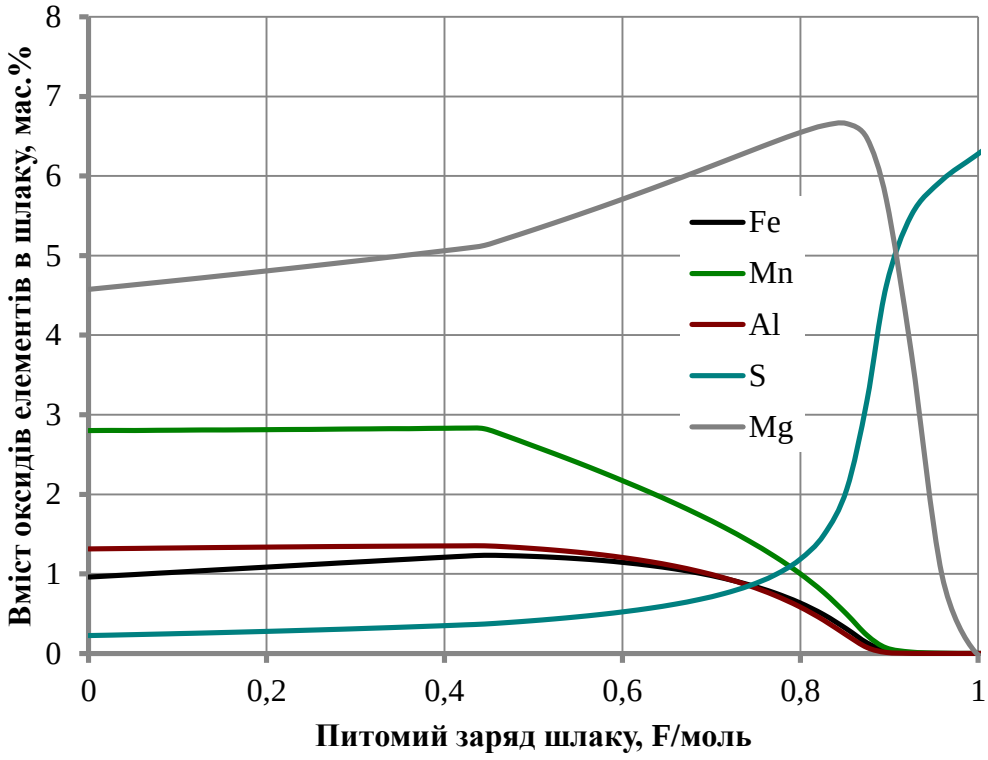
а)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

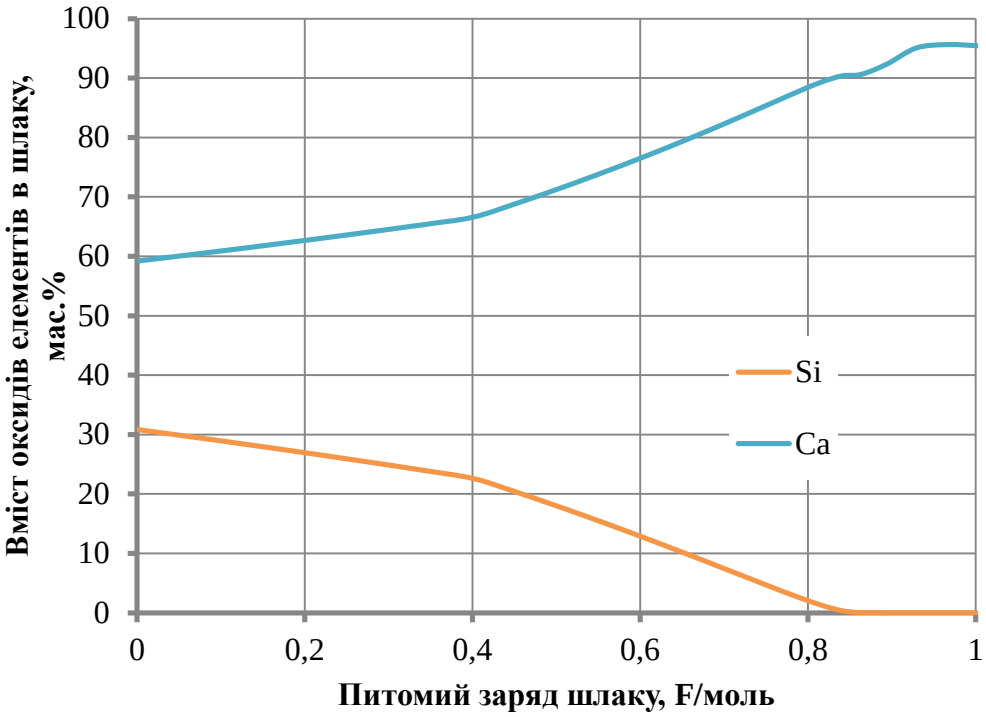
б)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Si
Ca
Питомий заряд шлаку, F/моль

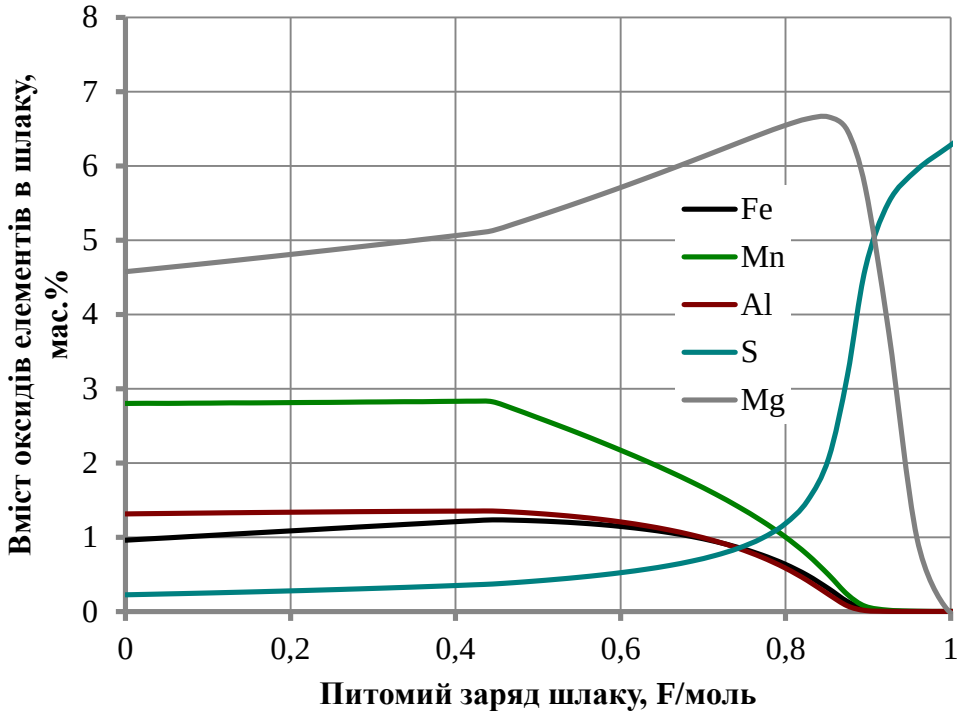
в)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Fe
Mn
Al
S
Mg
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

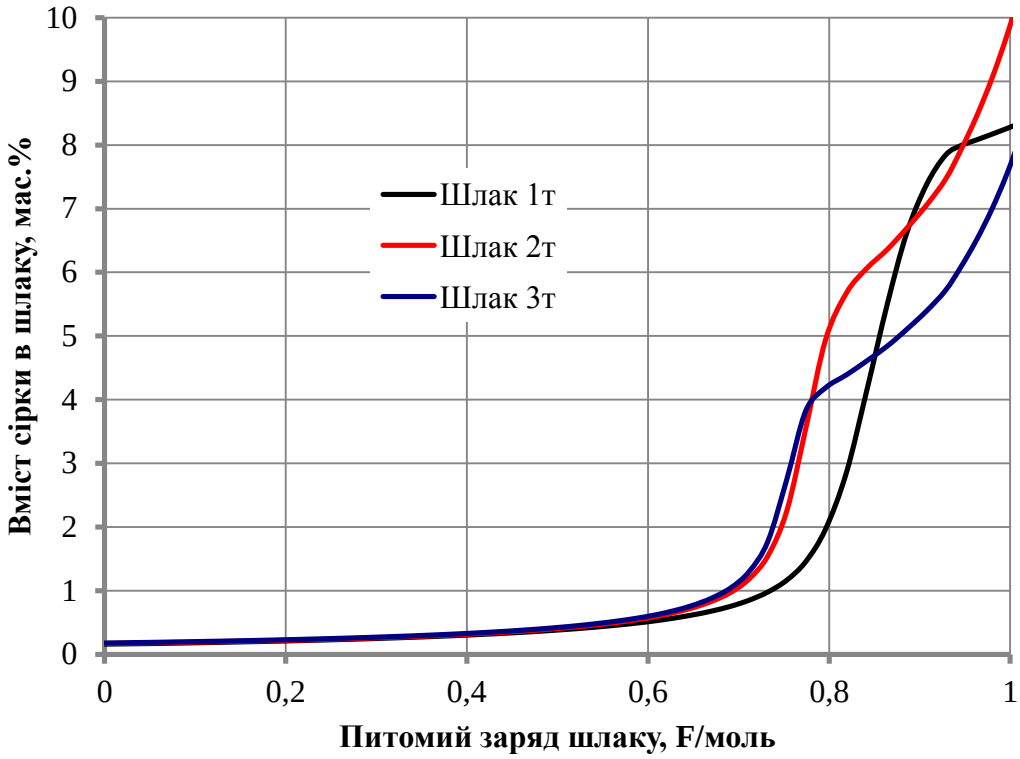


д)

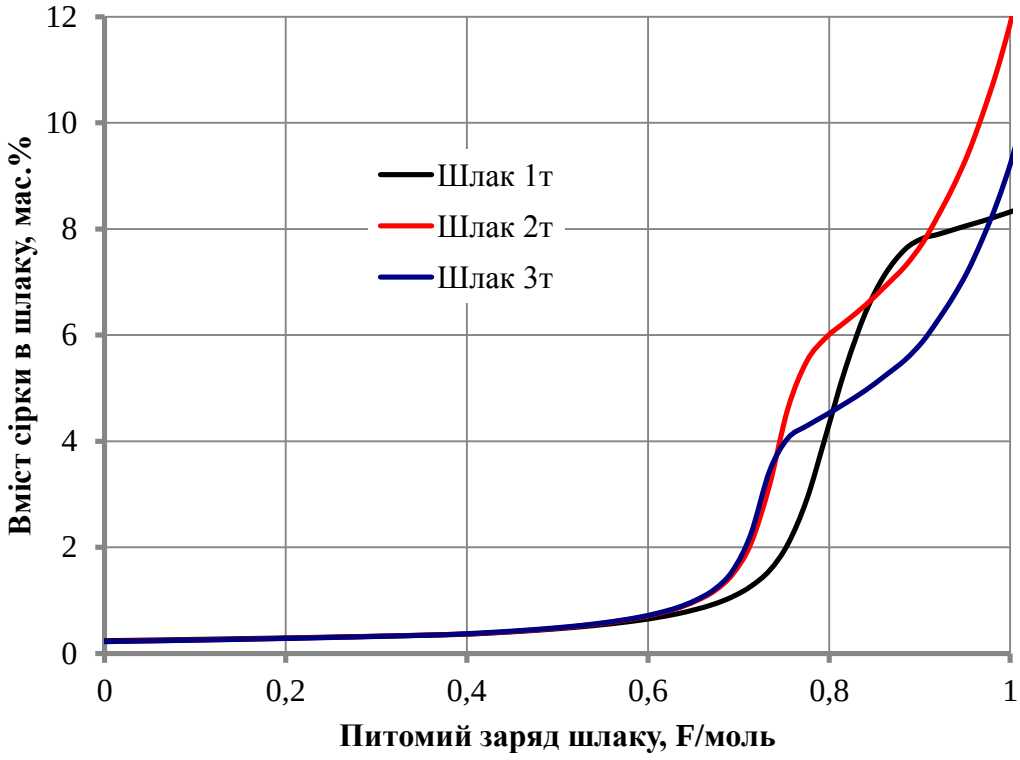


е)

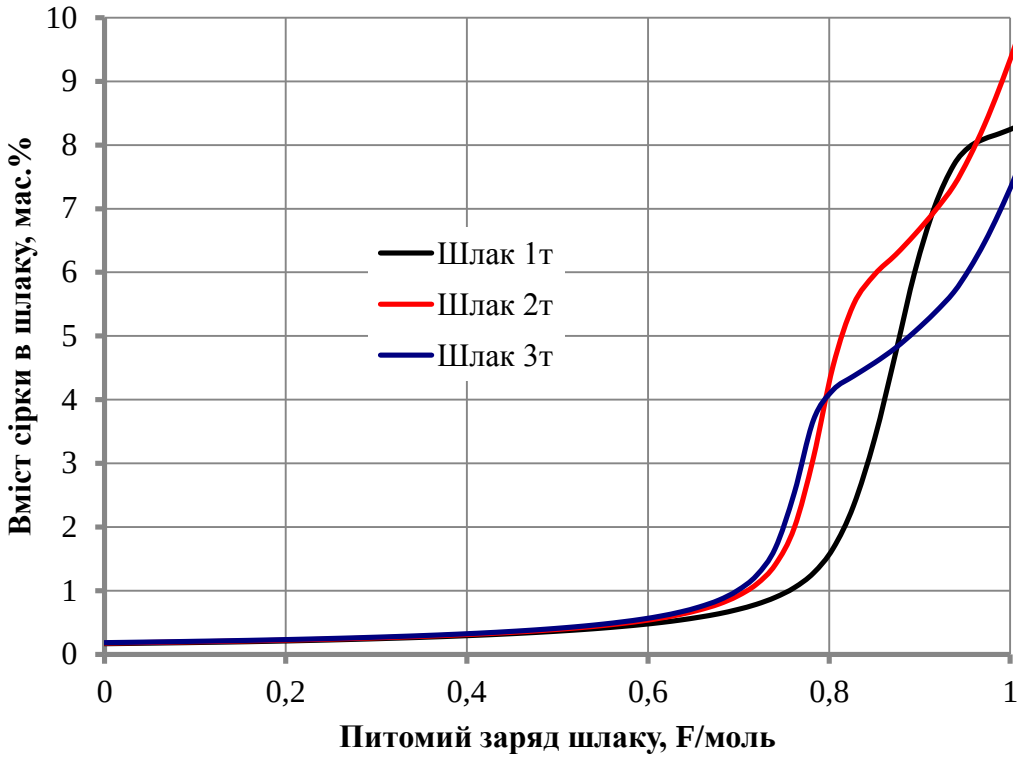
Рис. 3.19 - Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 30MnSi4-3:
кремній, кальцій (а, в, д) ; сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


Вміст сірки в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

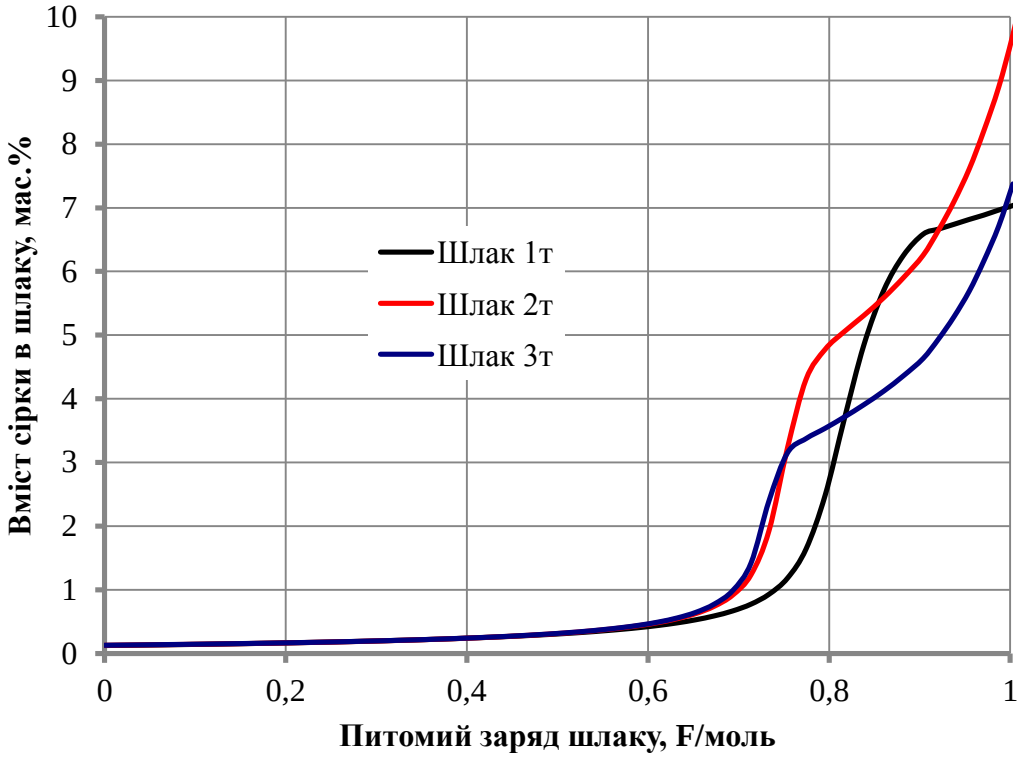
а)


Вміст сірки в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
2
4
6
8
10
12
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

б)

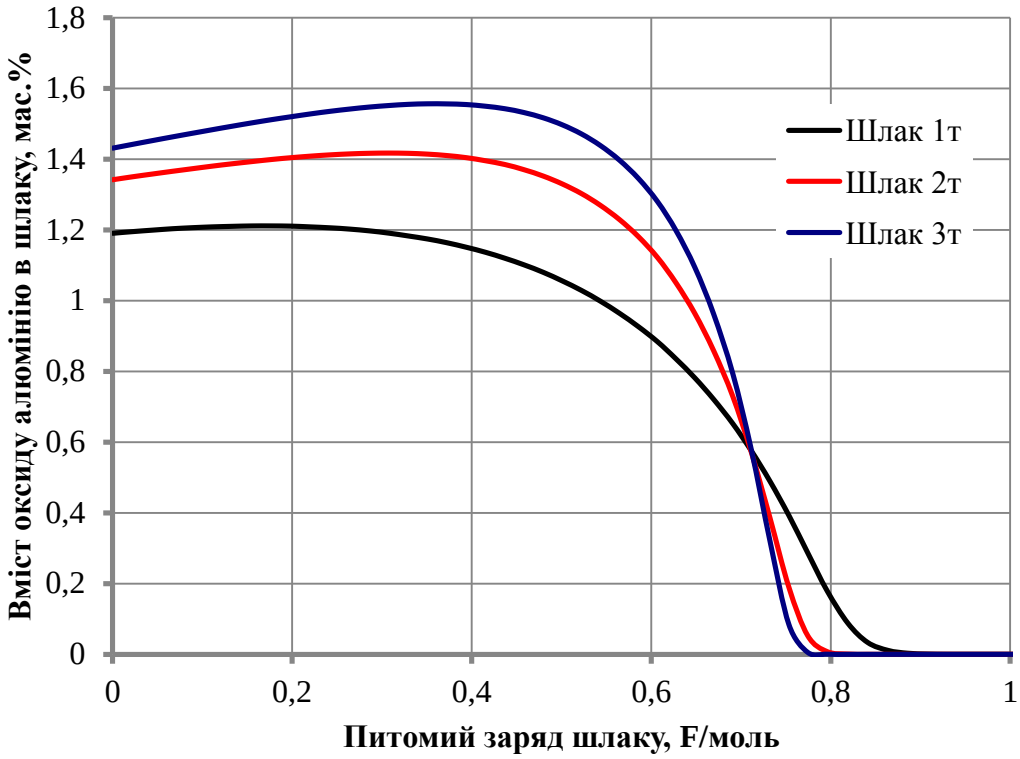


в)

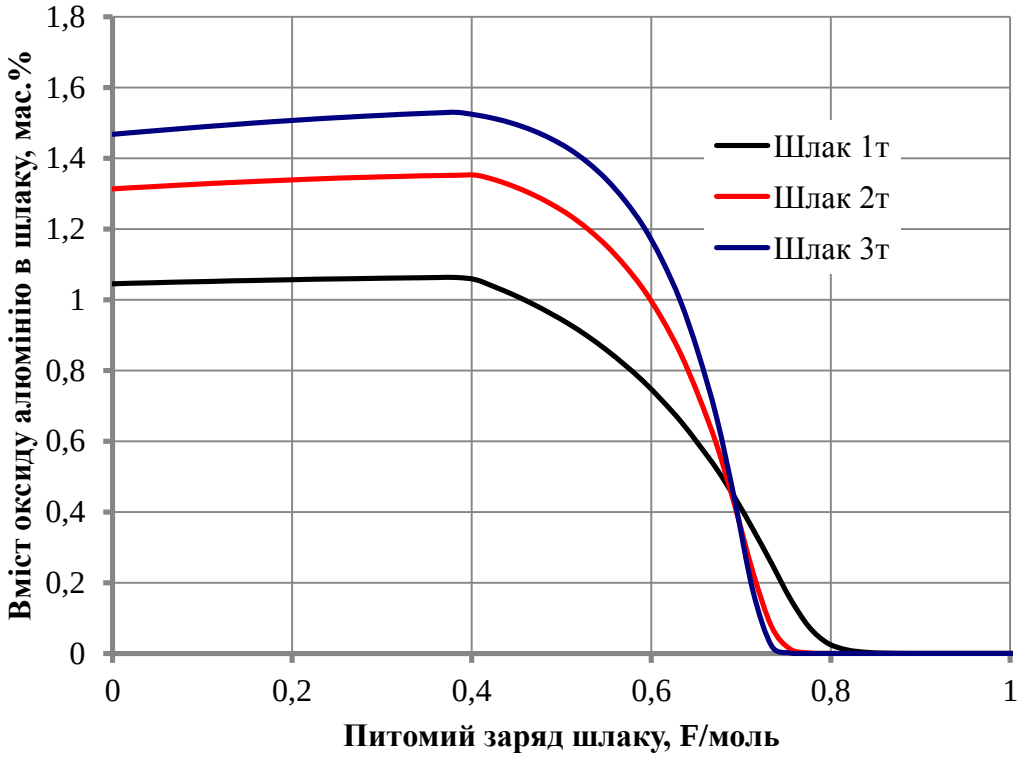


г)

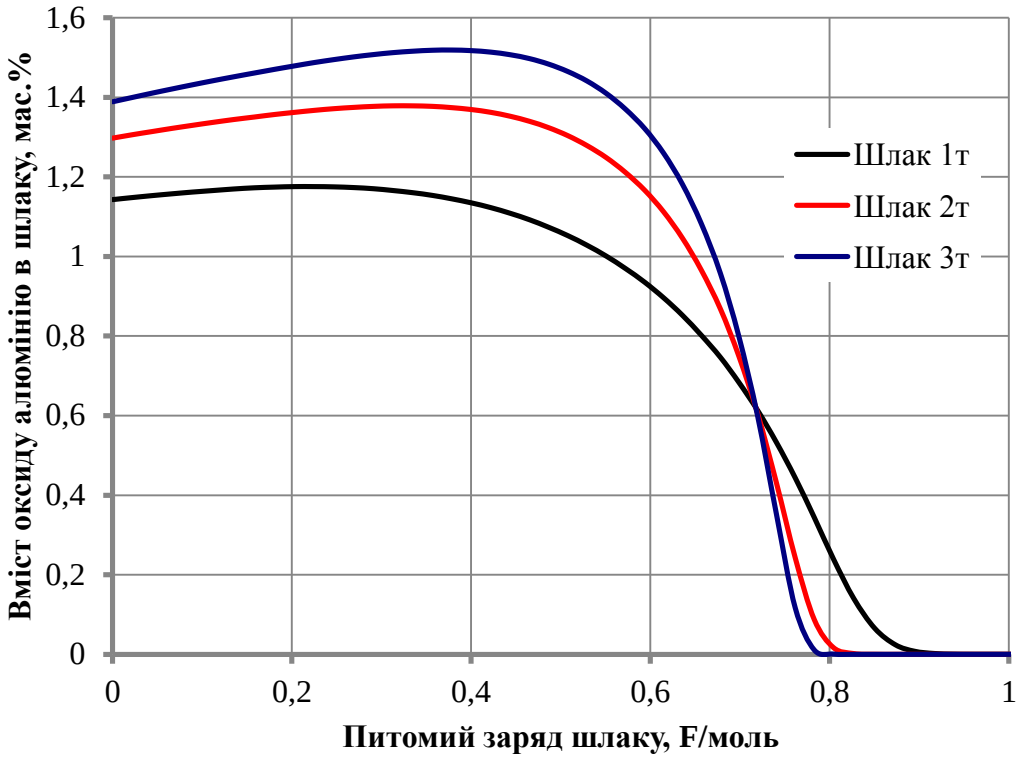
Рис 3.20 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст сірки в шлаку:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст оксиду алюмінію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

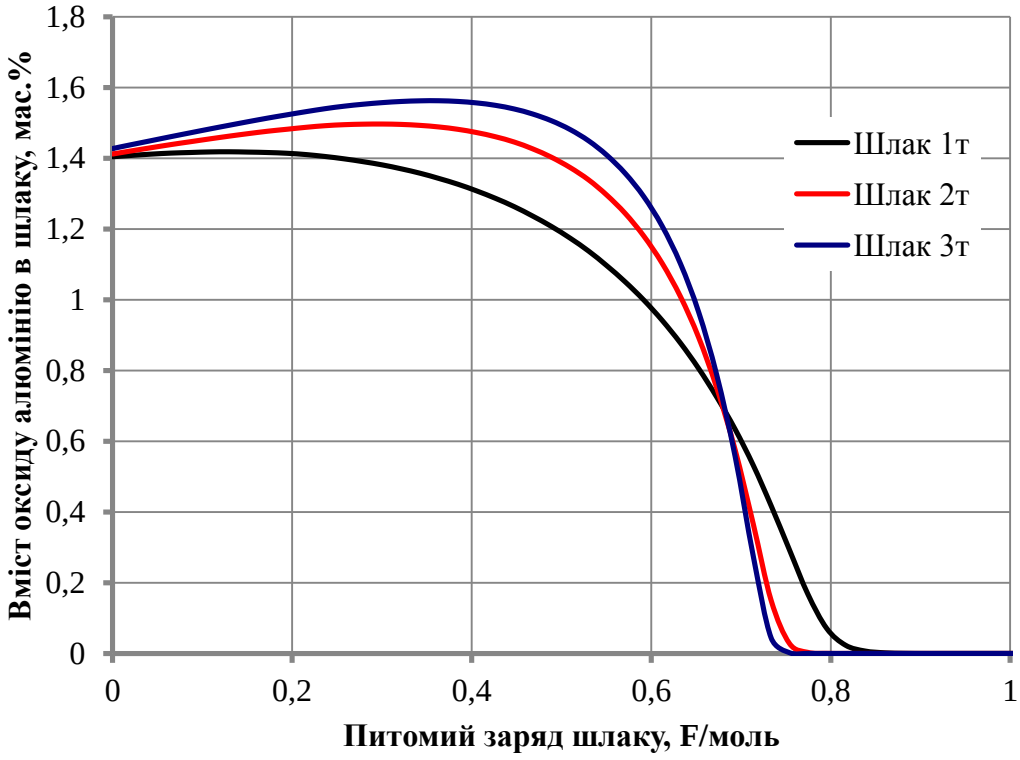
а)


1,8
1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст оксиду алюмінію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

б)

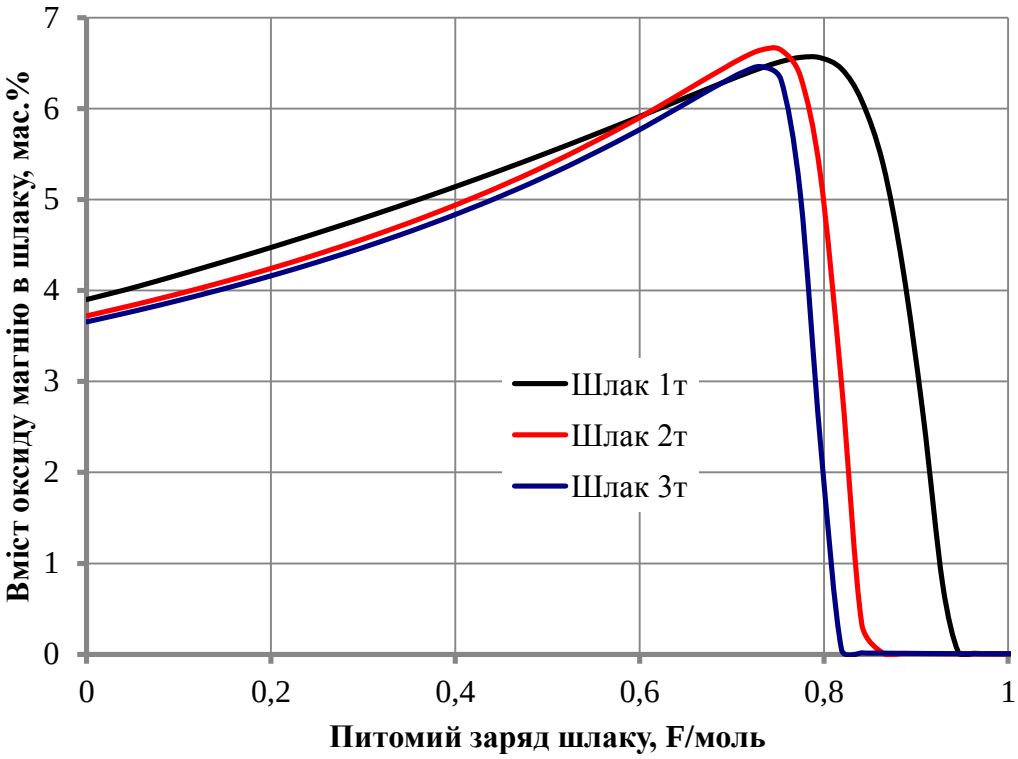


в)

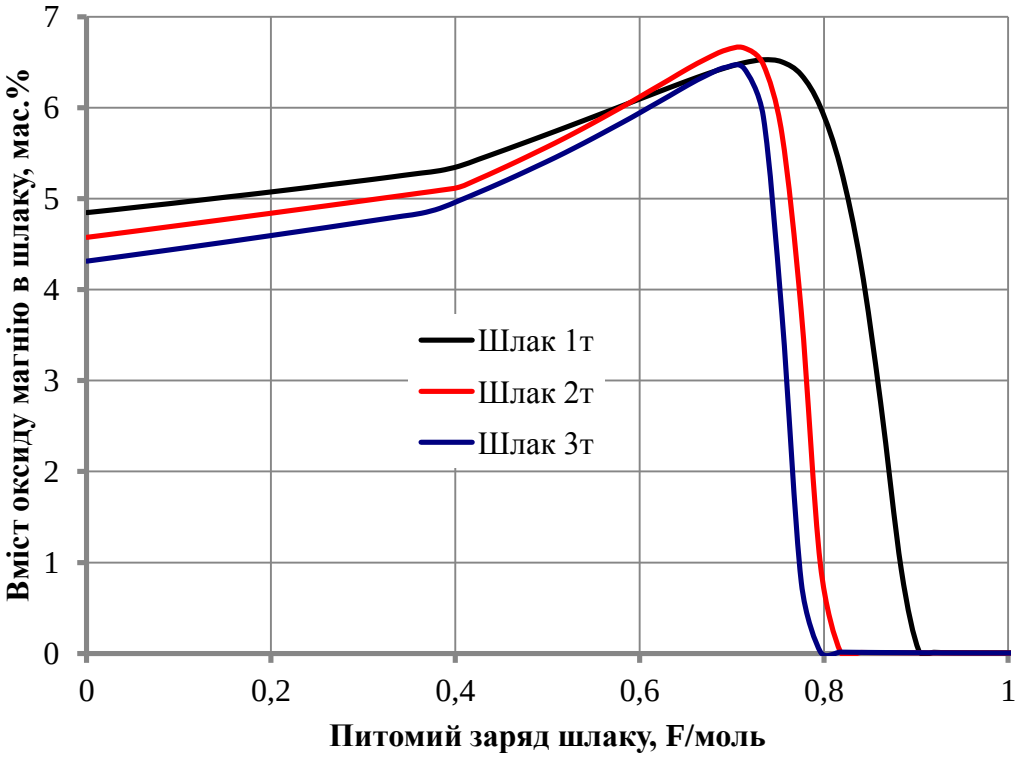


г)

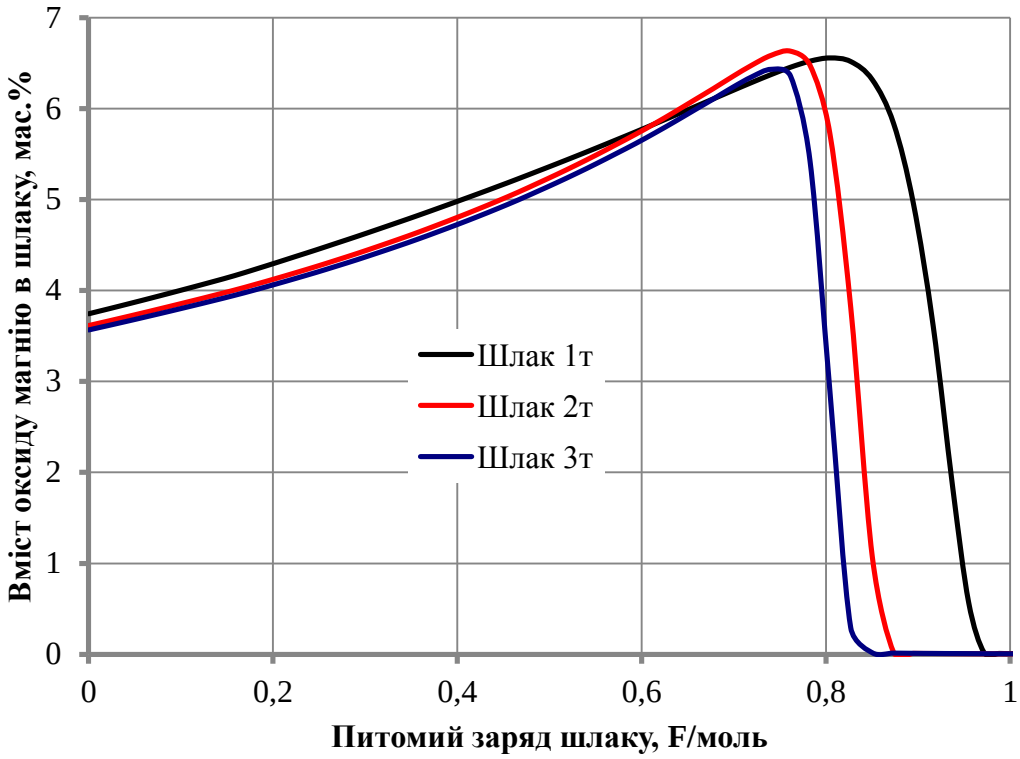
Рис 3.21 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст оксиду алюмінію в шлаку:
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


Вміст оксиду магнію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
1
2
3
4
5
6
7
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

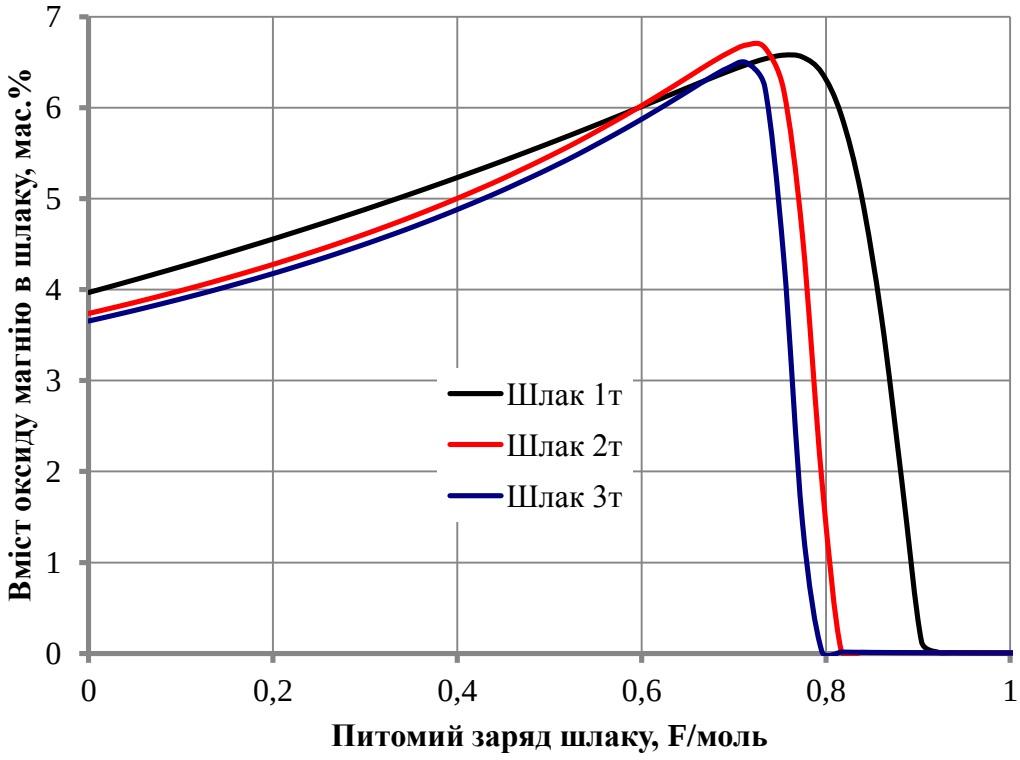
а)


Вміст оксиду магнію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
1
2
3
4
5
6
7
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

б)



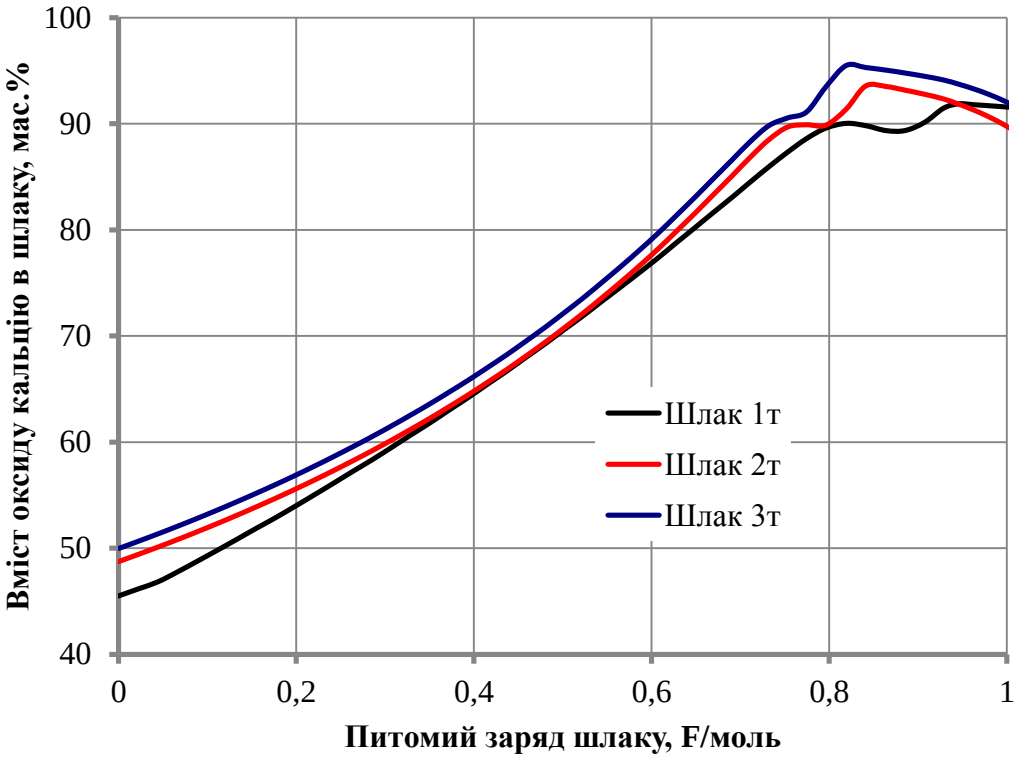
в)



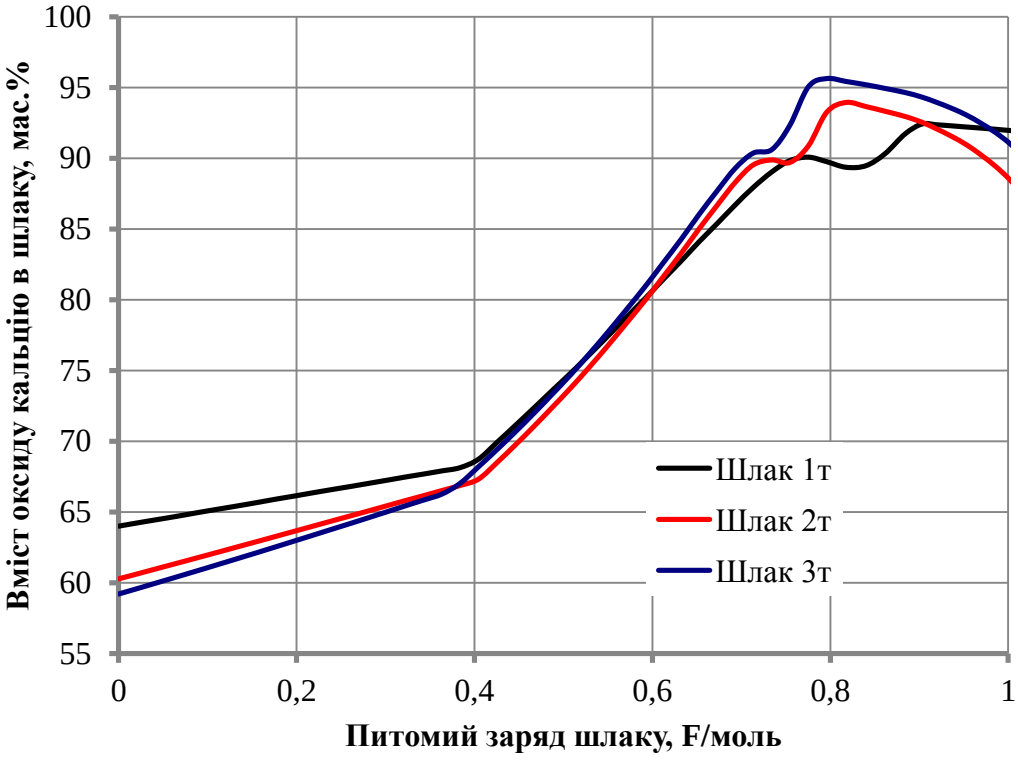
г)

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

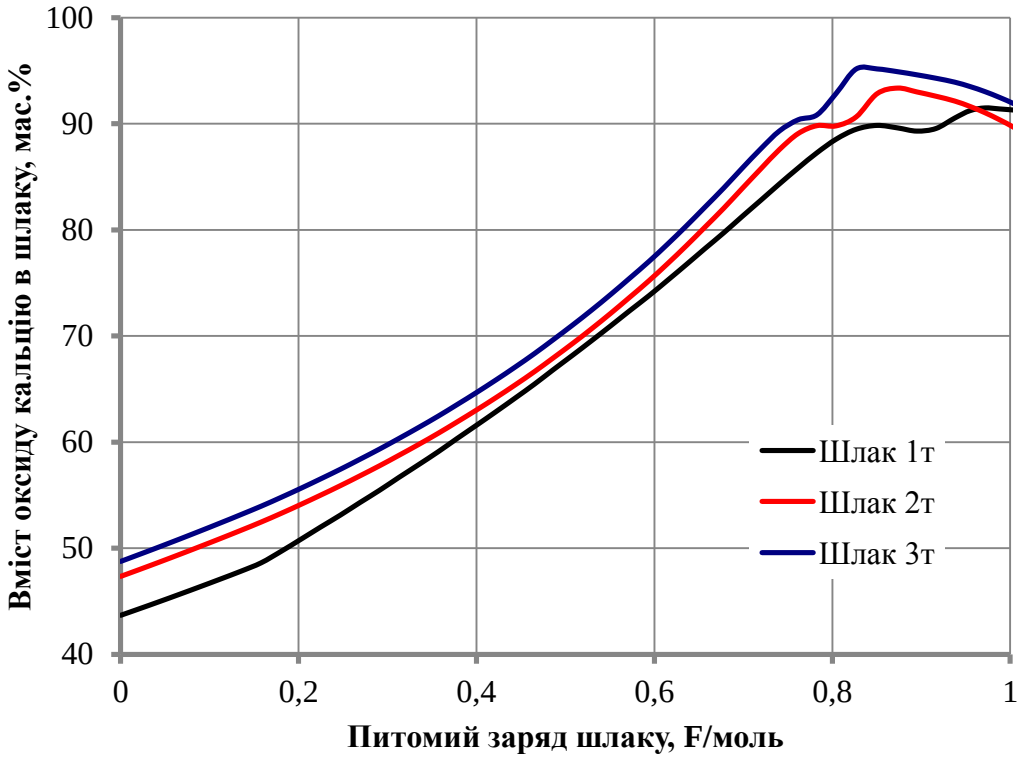
а) 12MnSi4-3; б) 30MnSi4-3; в) 9MnSi6-3; г) 14MnCrSi4-3-2


100
90
80
70
60
50
40
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст оксиду кальцію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

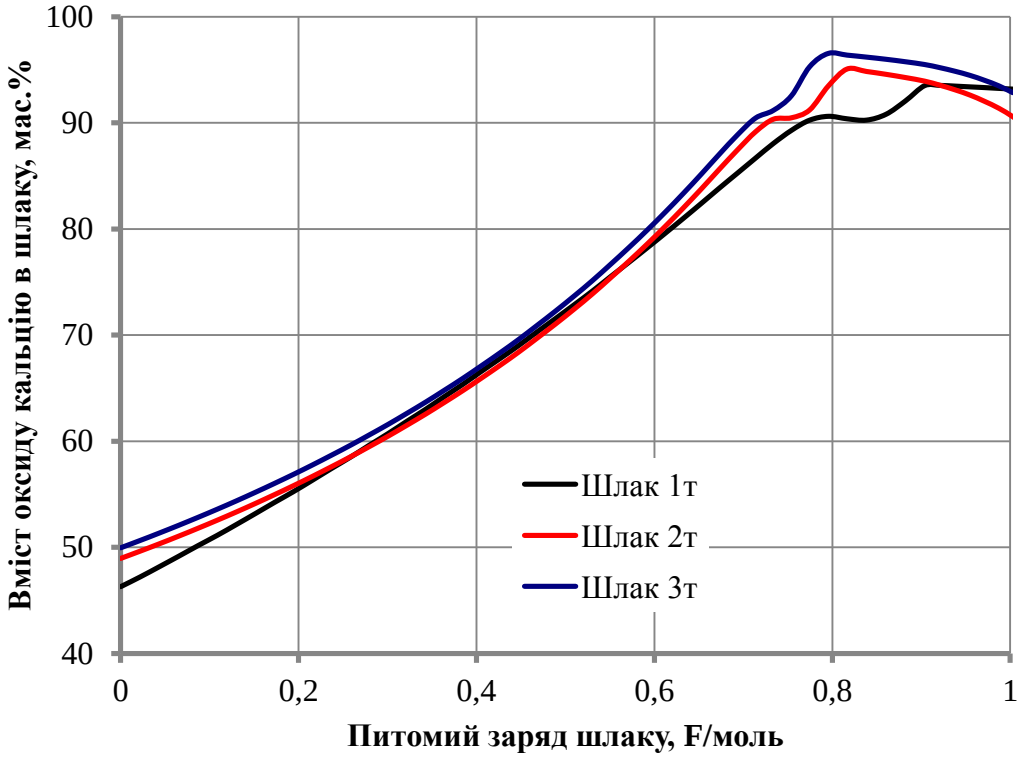
а)


100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст оксиду кальцію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

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 процеса ВЕЛР.

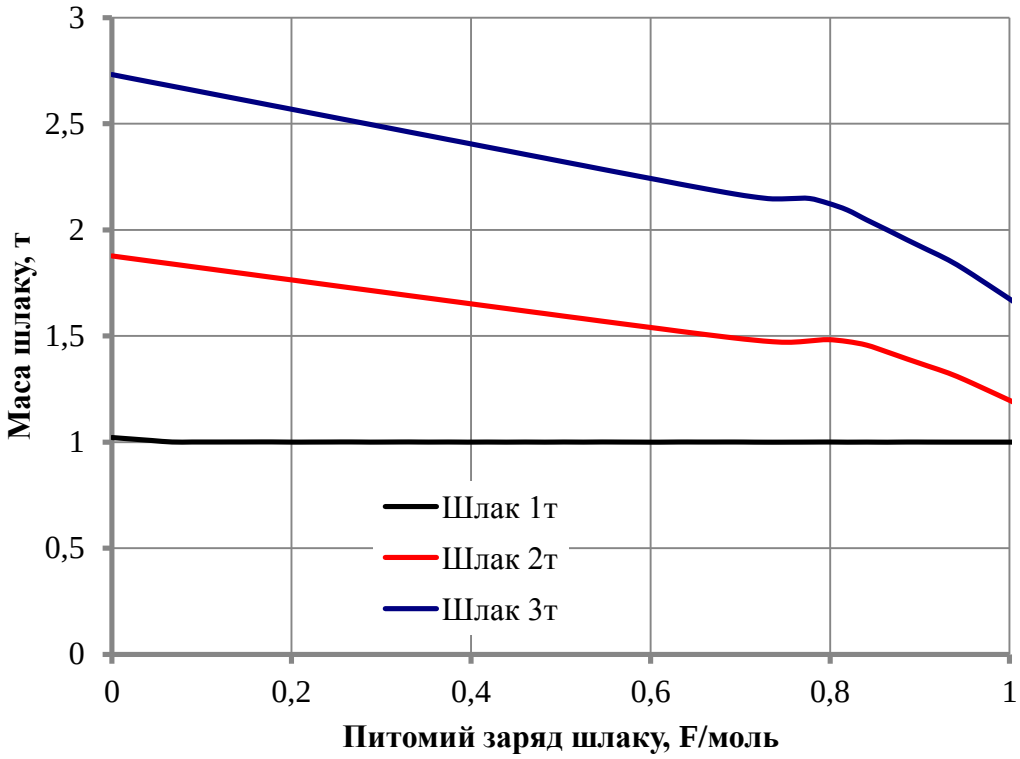
При підвищенні питомого заряду шлаку до рівня 0,85 F/моль вміст оксиду кальцію у шлаку підвищується з 50 до 90 мас.%, але це не означає, що його стає більше в абсолютних одиницях виміру, якщо не додавали вапно. Ріст відсотка вмісту оксиду кальцію зумовлений переходом елементів у метал. Надалі вміст оксиду 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 плавіковий шпат для розрідження.

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

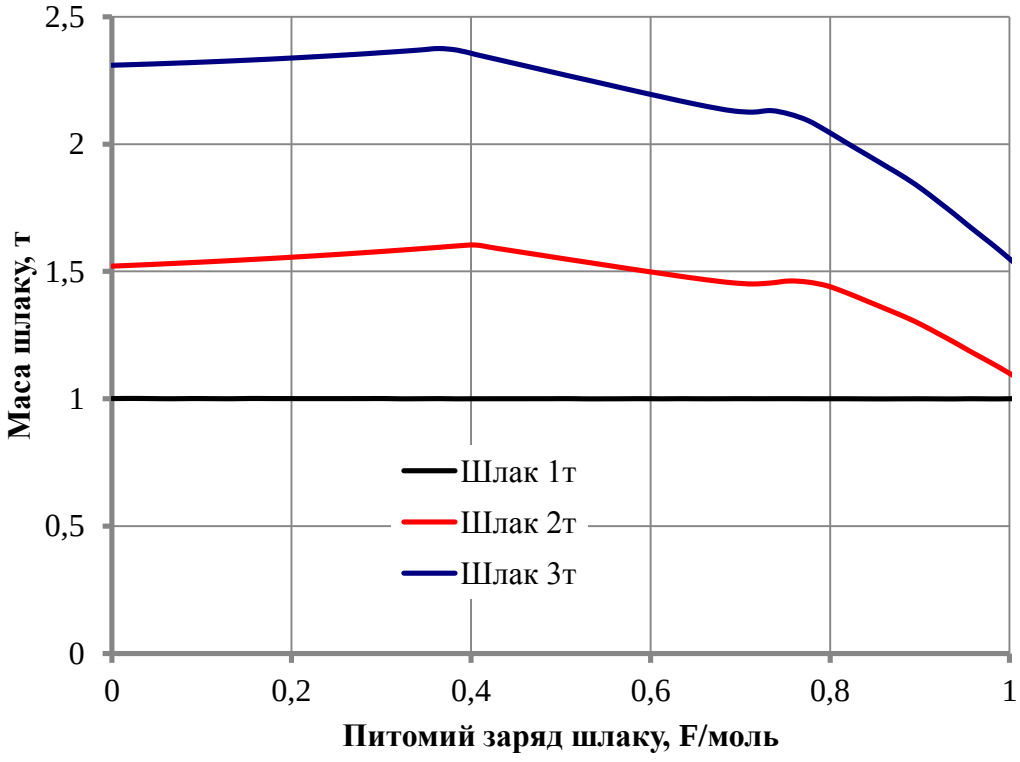
До 0,75 F/моль у шлаку зростає відсоток магнію за рахунок зниження вмісту елементів, що перейшли до металу в результаті відновлення. Надалі магній активно переходить до газової фази і частково в метал. Відтак його вміст у шлаку різко знижується. Кальцій також активно йде до газової фази і частково в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

3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку

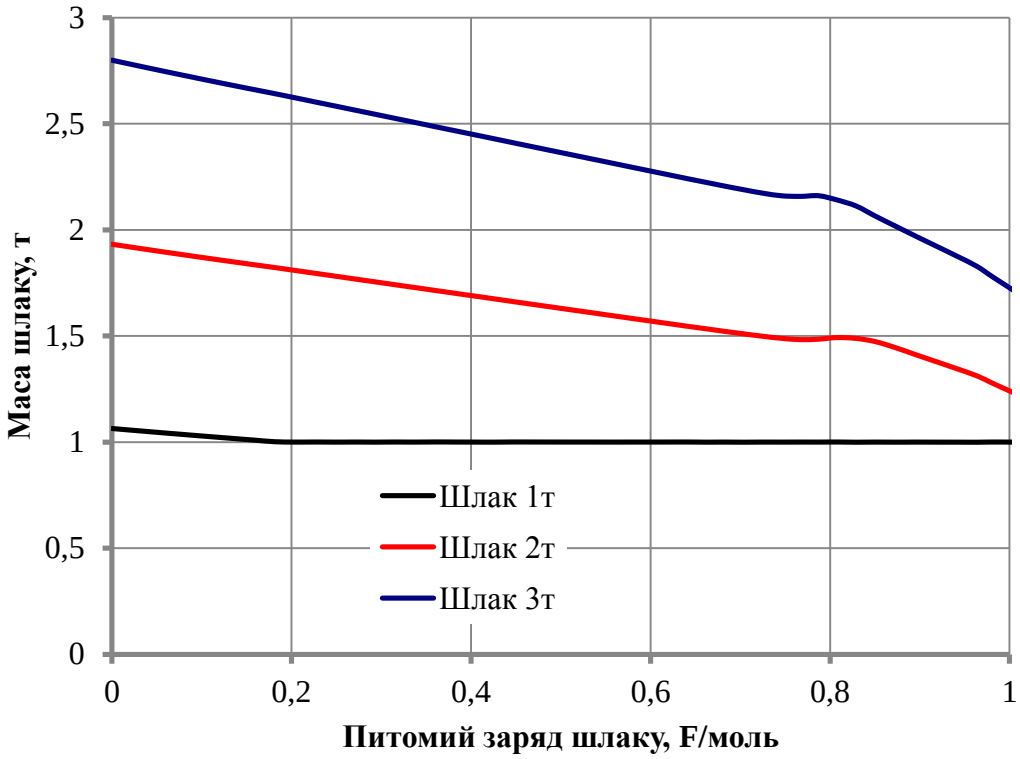
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на кінцеву масу шлаку. На рисунку 3.24 наведено відповідні результати розрахунків.


3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
Маса шлаку, т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

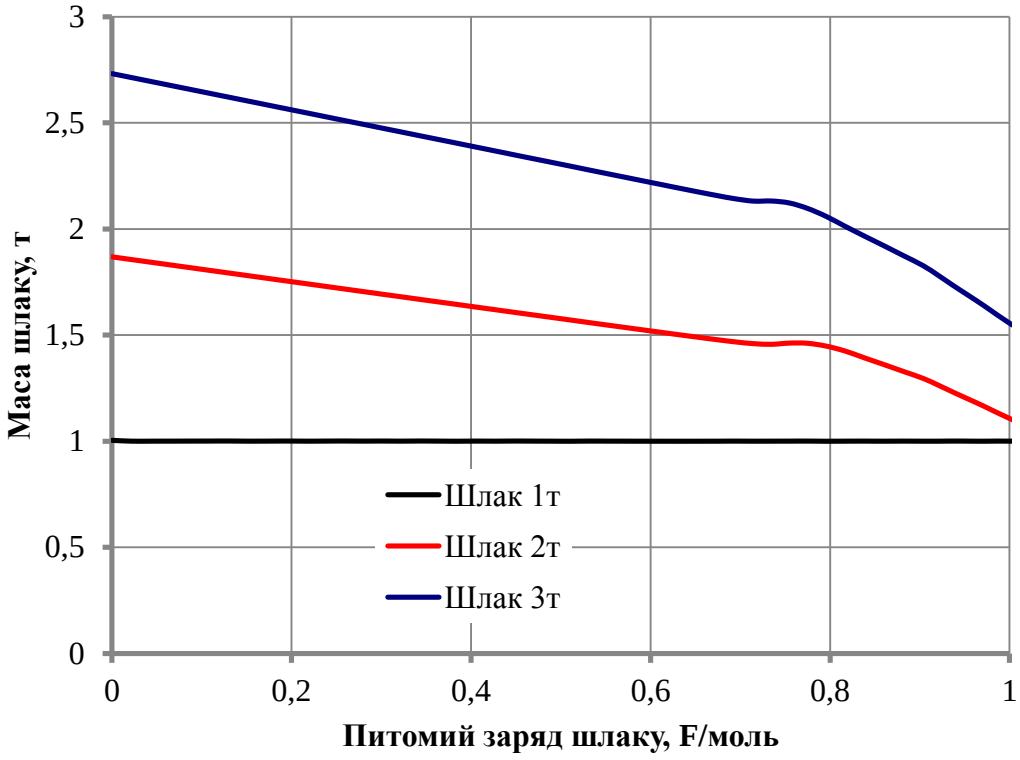
а)


2,5
2
1,5
1
0,5
0
Маса шлаку, т
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)



в)



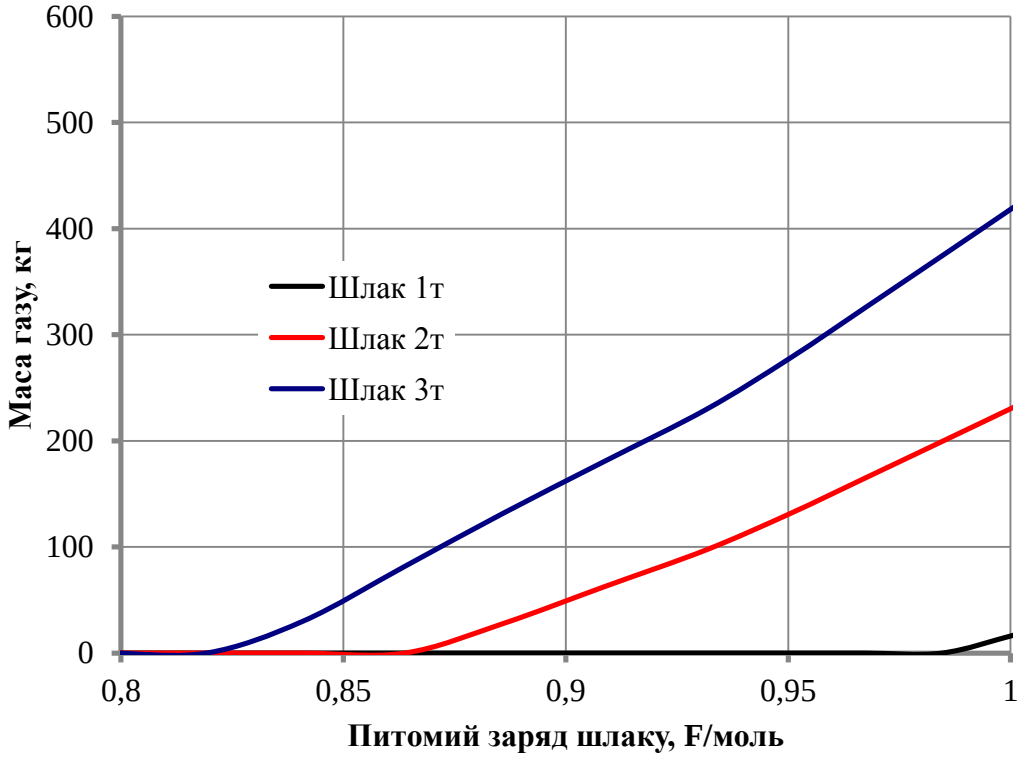
г)

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

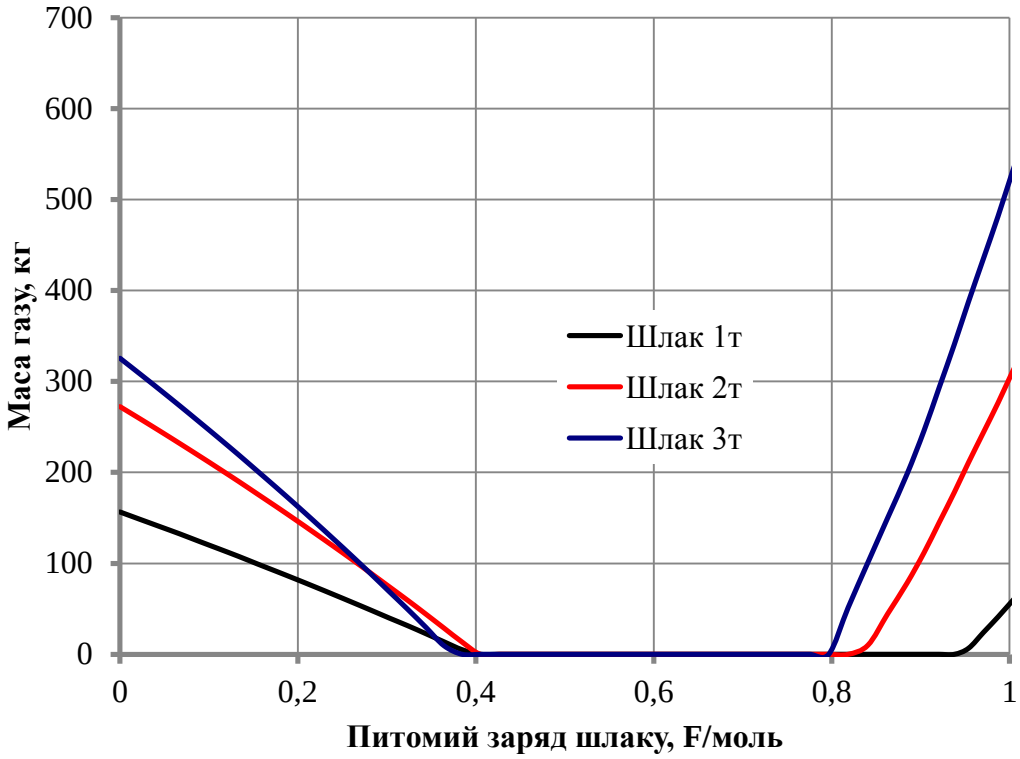
Дані, представлені на рис. 3.24 свідчать про те, що кінцева маса шлаку при легуванні сталі усіх марок системно знижується в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку за рахунок елементів, що відновилися і перейшли до металу. Виняток становить початкова маса шлаку 1 т, оскільки за умовами оптимізації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

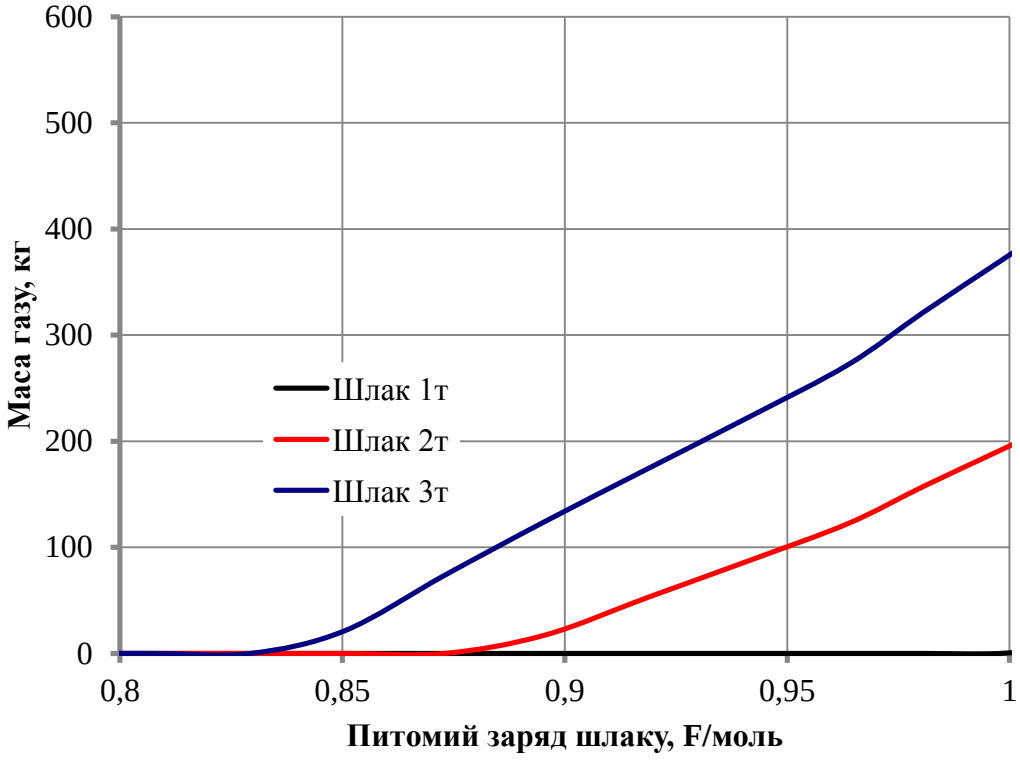
У експерименті було використано сталі марок 12MnSi4-3, 30MnSi4-3, 9MnSi6-3 та 14MnCrSi4-3-2. Досліджували вплив питомого заряду та маси шлаку на масу газової фази. На рисунку 3.25 наведено відповідні результати розрахунків.



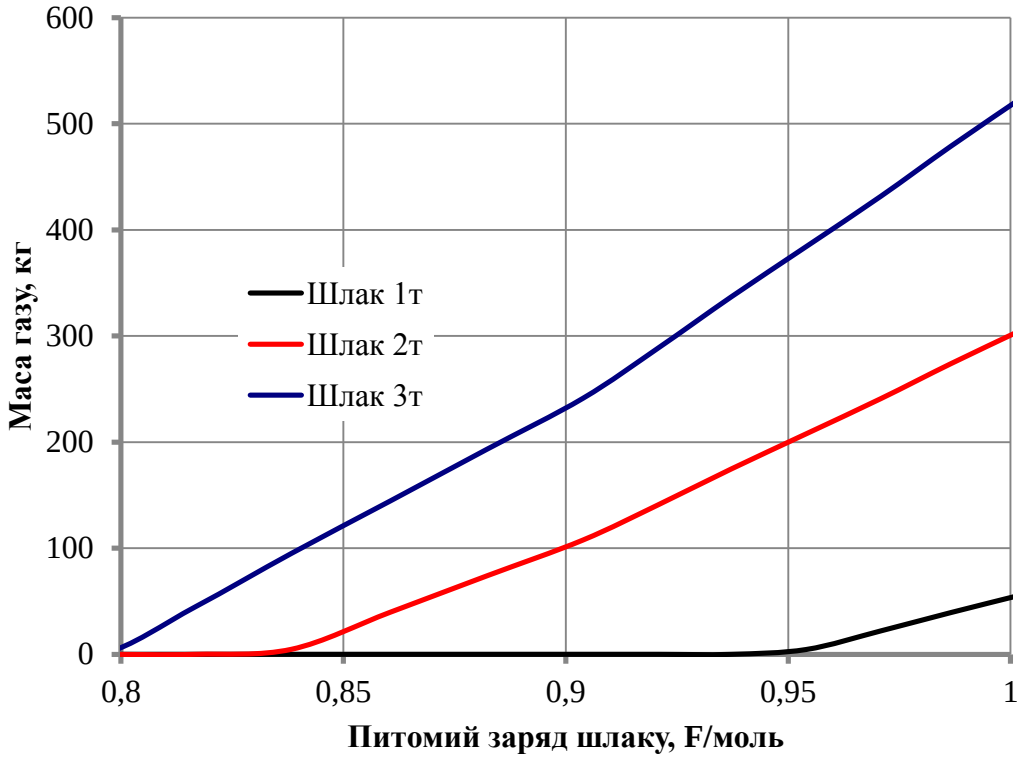
а)


700
600
500
400
300
200
100
0
Маса газу, кг
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)


600
500
400
300
200
100
0
Маса газу, кг
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0,8
0,85
0,9
0,95
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

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

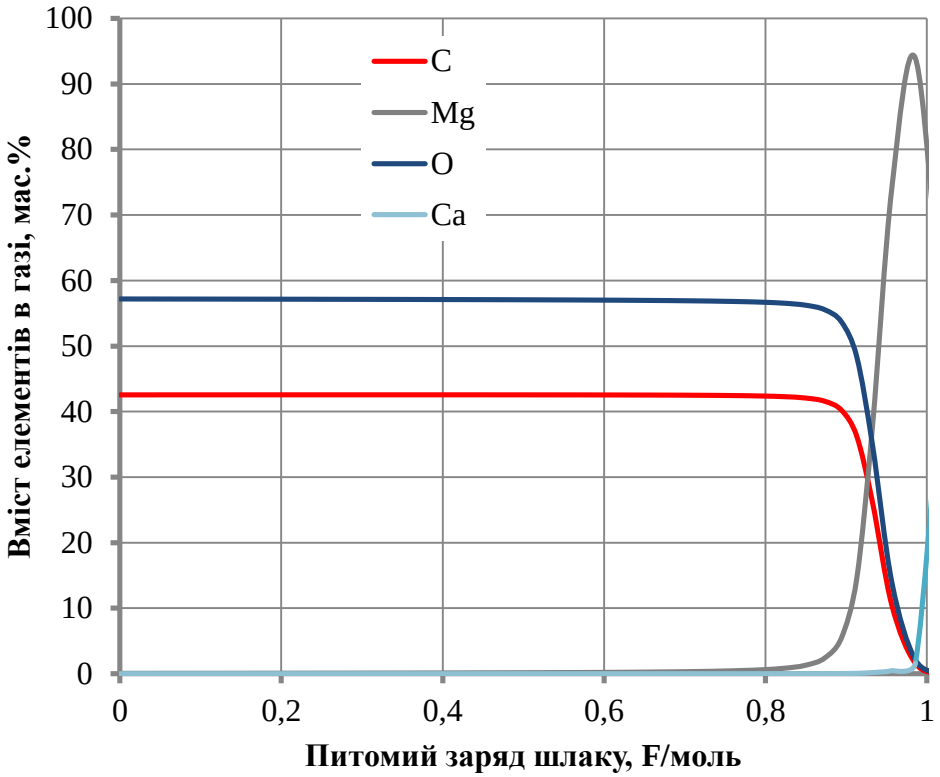
Дані, представлені на рис. 3.25 свідчать про те, що маса газової фази зростає при легуванні сталі усіх марок в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку до рівня 0,8 F/моль і вище. За цих умов відбувається випаровування із системи головним чином кальцію та магнію.

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.

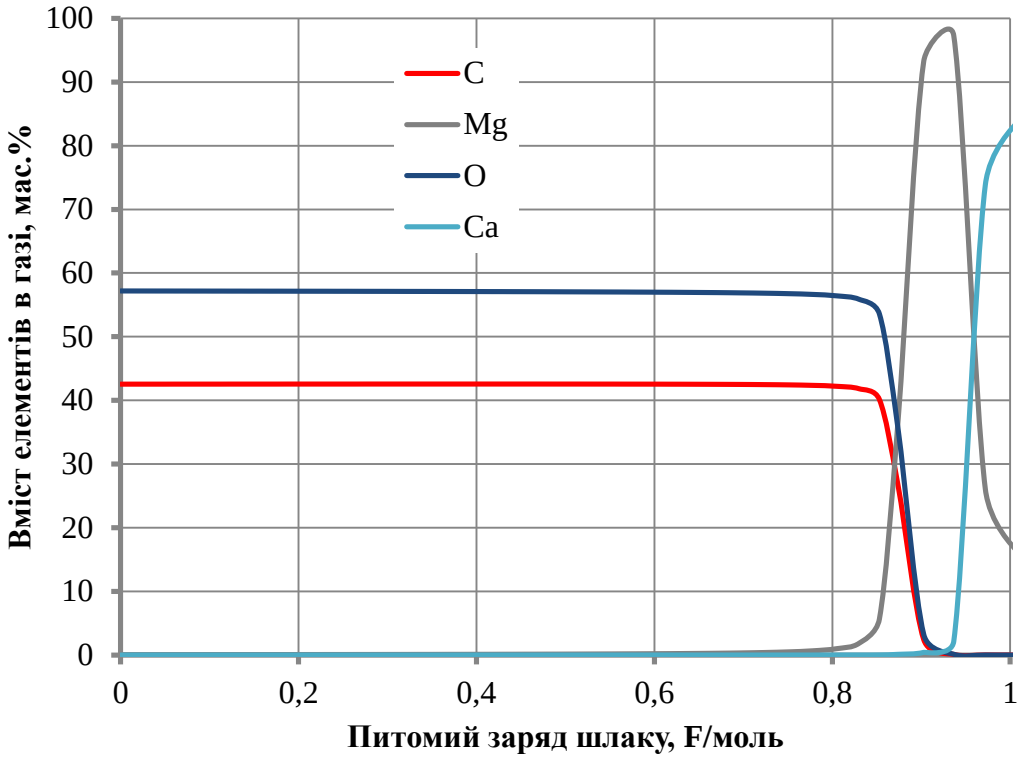
3.2.6 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газовій фазі

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

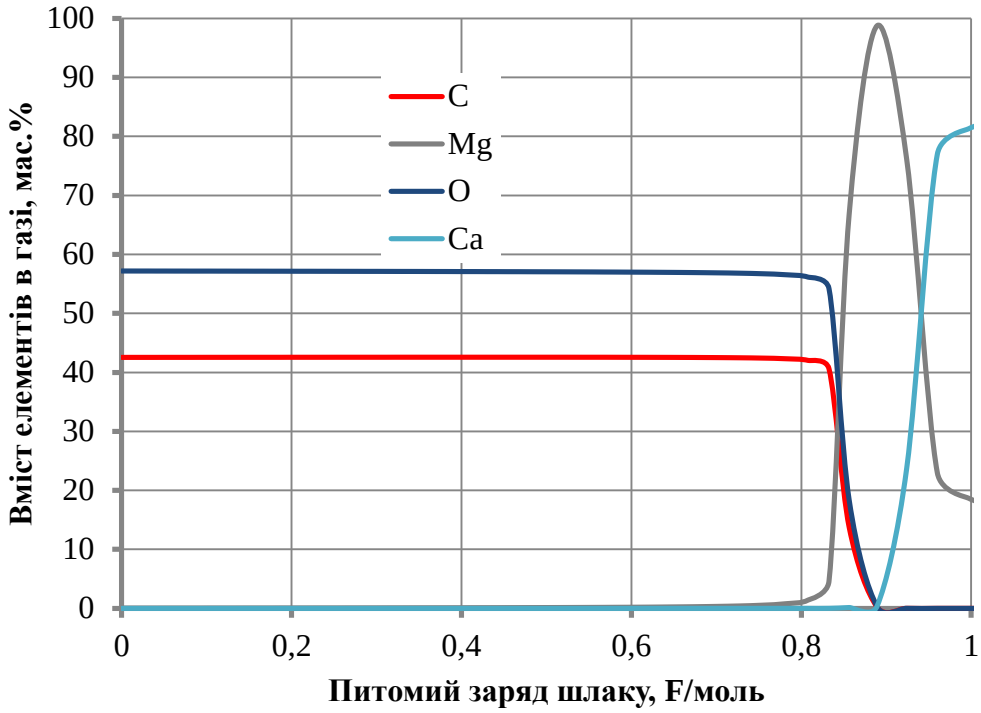
шлаку на хімічний склад газової фази за основними елементами. На рисунках 3.26–3.29 наведено відповідні результати розрахунків.



а)

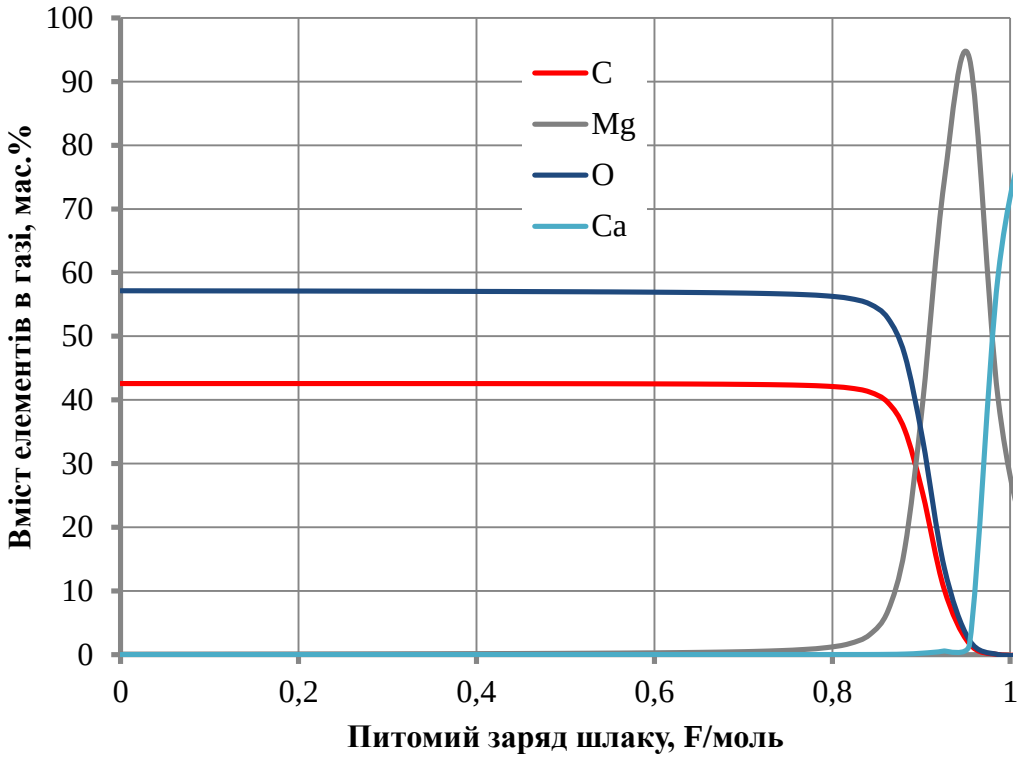


б)

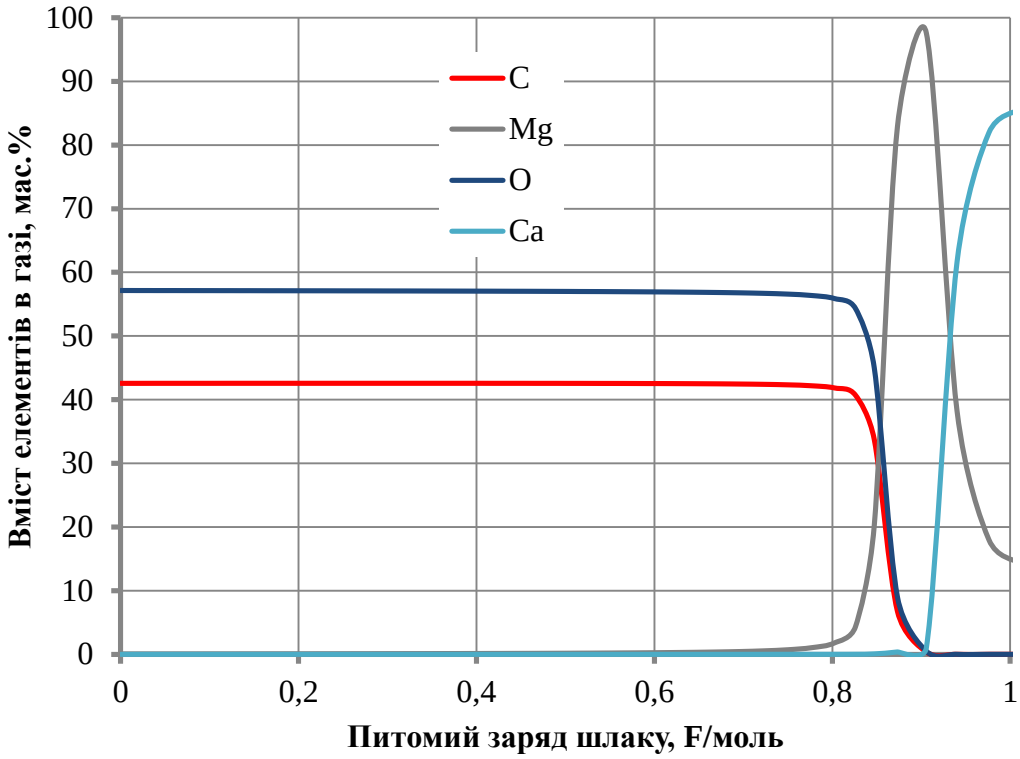


в)

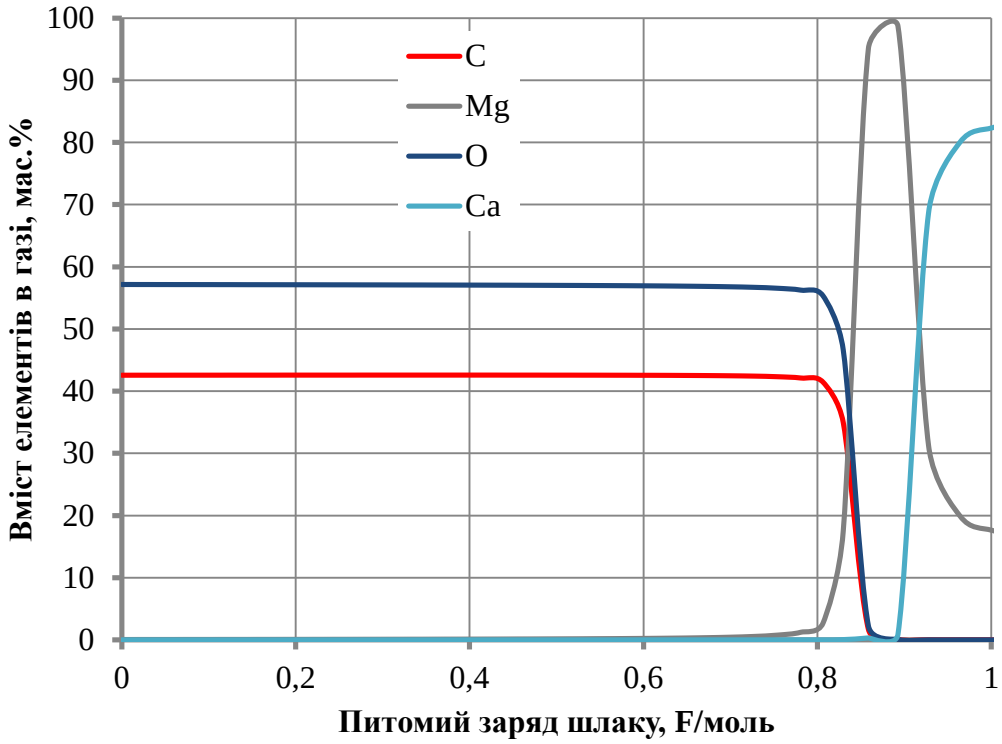
Рис 3.26 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 12MnSi4-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)



а)

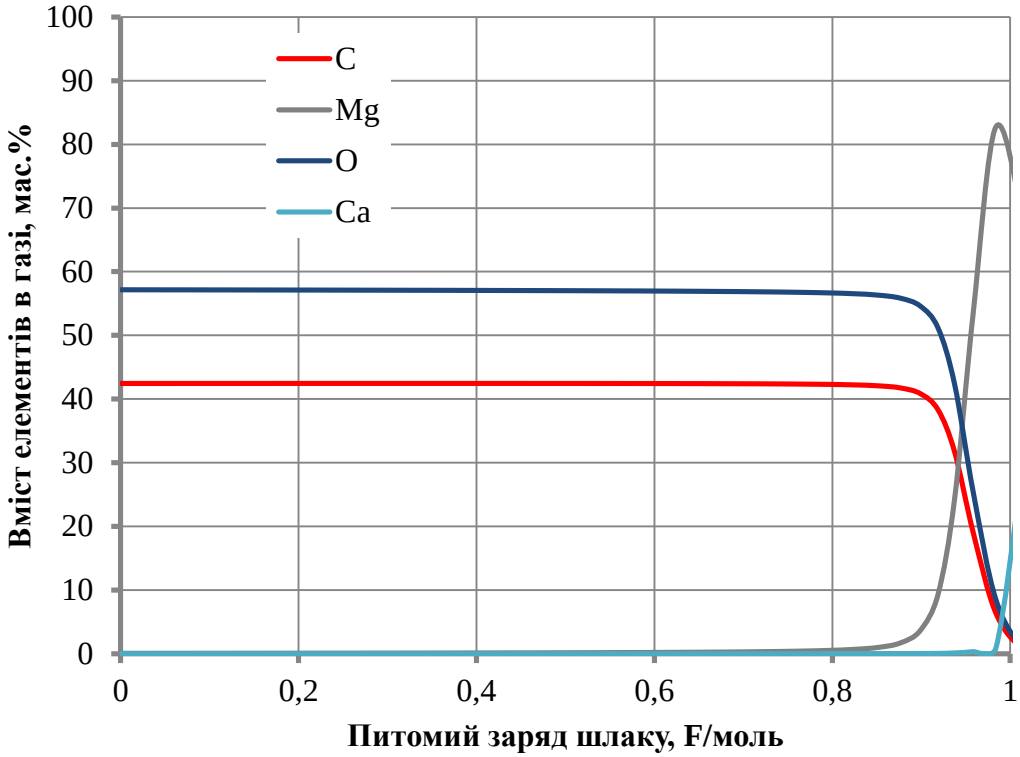


б)

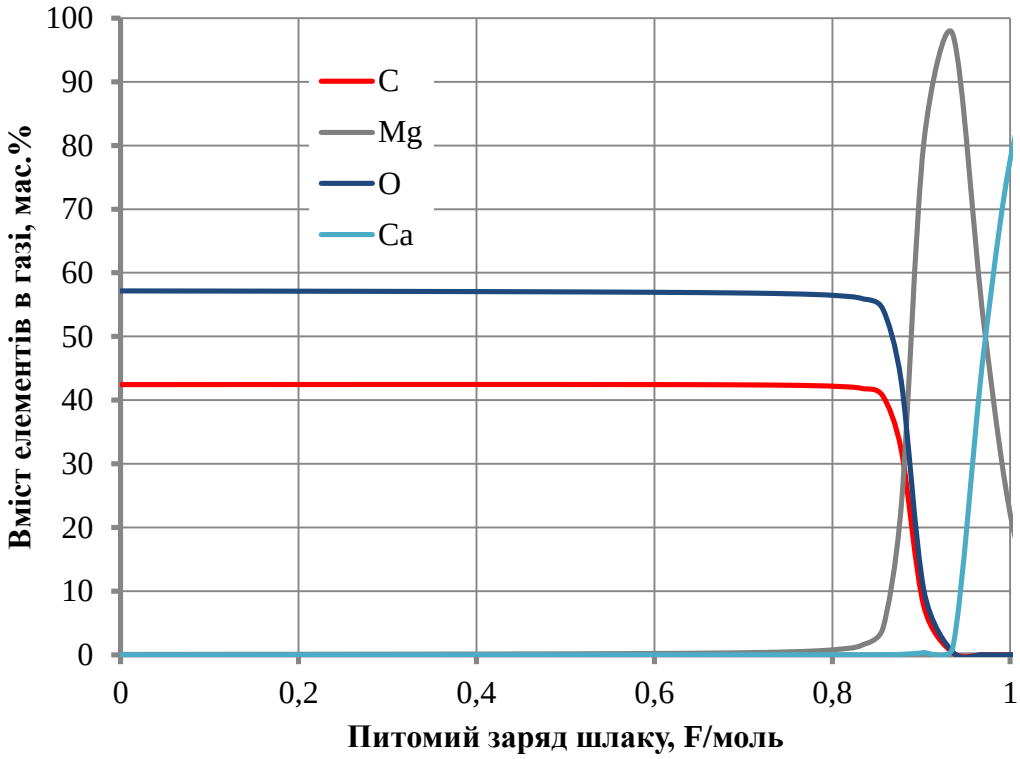


в)

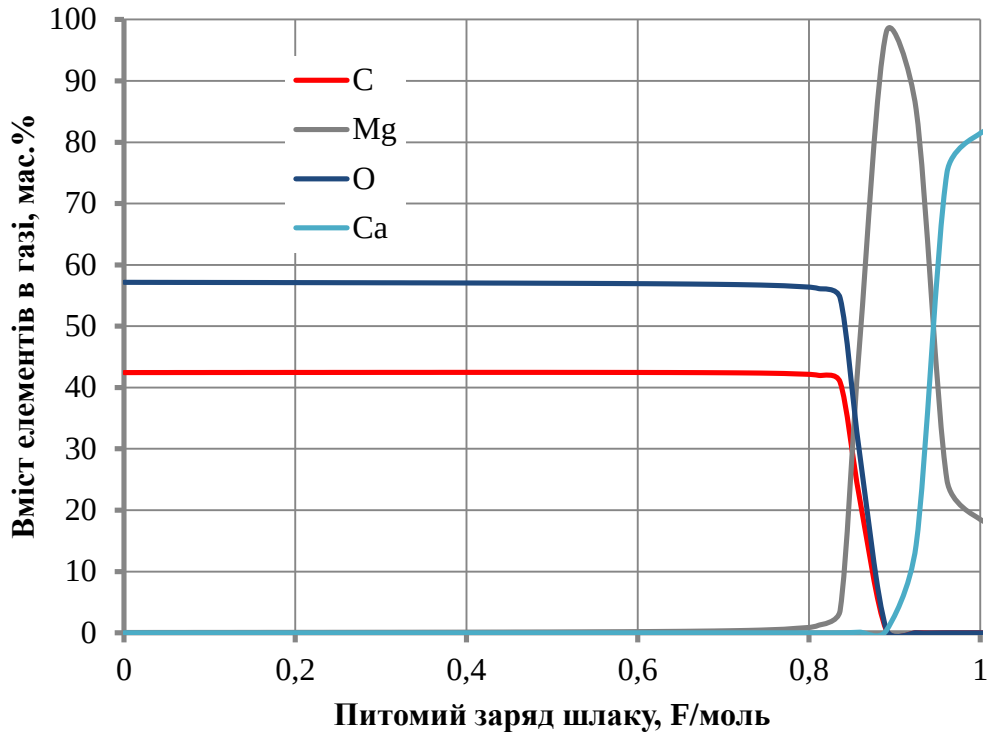
Рис 3.27 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 30MnSi4-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)


100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
C
Mg
O
Ca
Вміст елементів в газі, мас.%
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

а)

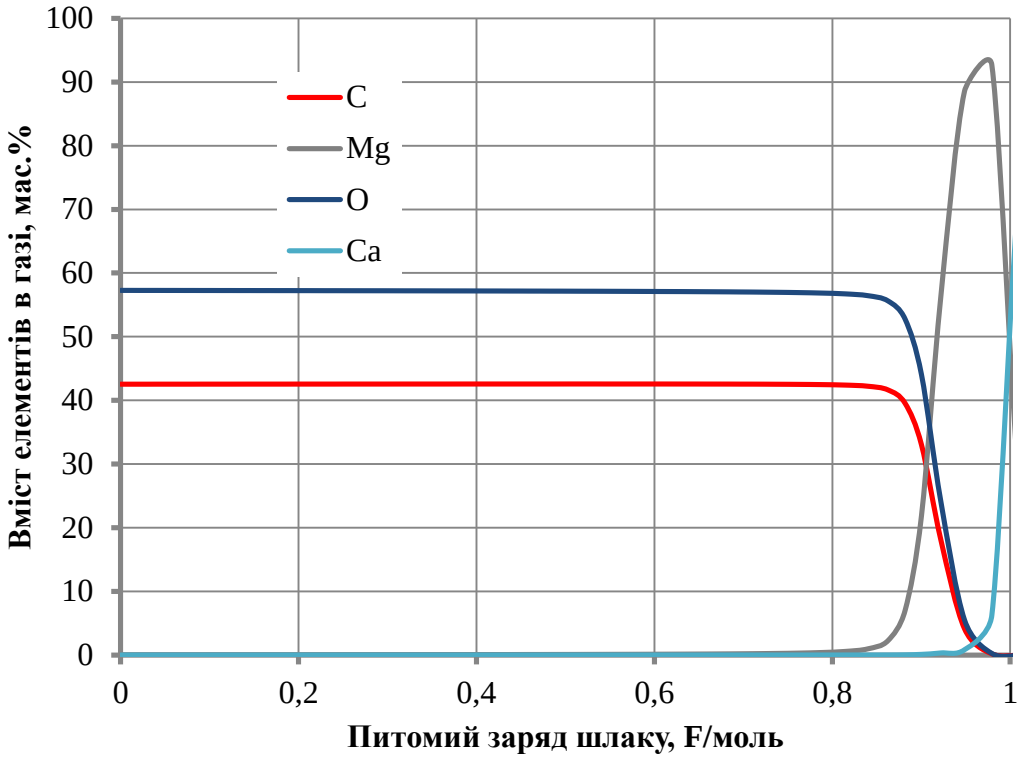

100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
C
Mg
O
Ca
Вміст елементів в газі, мас.%
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль

б)

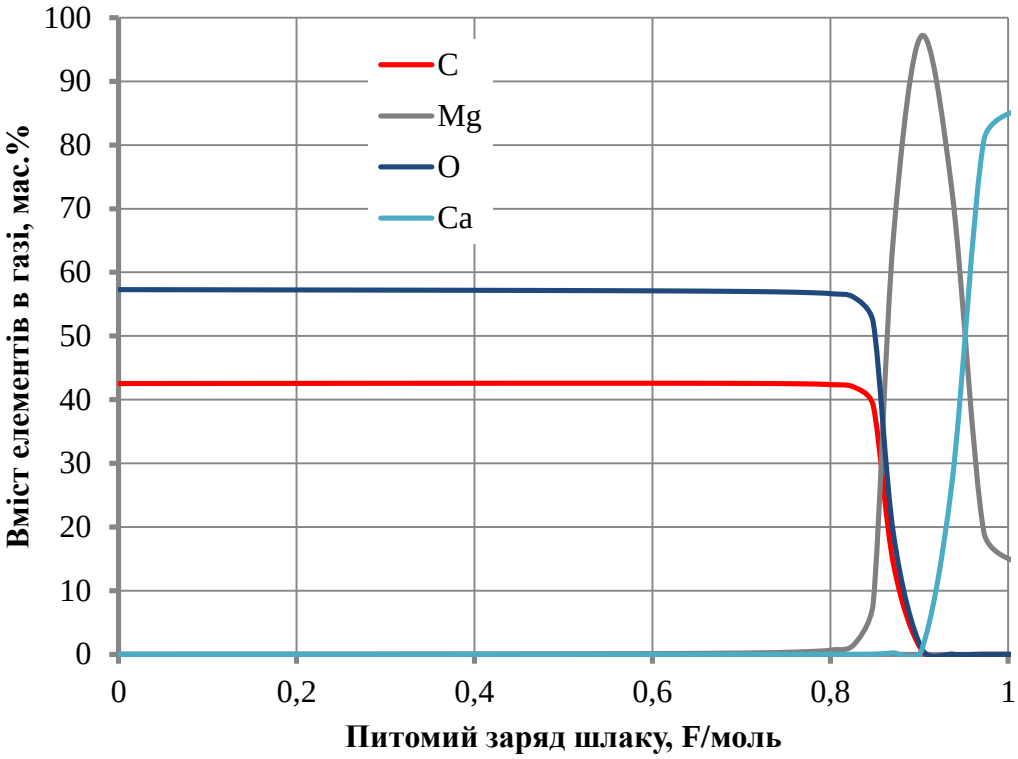


в)

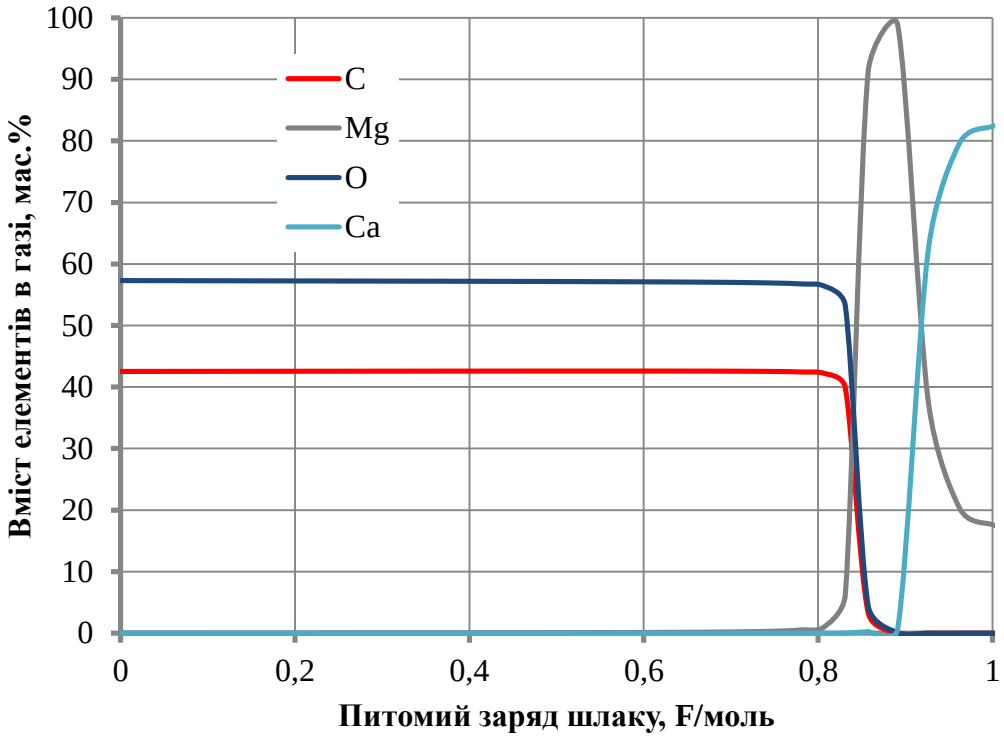
Рис 3.28 – Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів в газі при легуванні сталі 9MnSi6-3 при масі шлаку: 1 т (а); 2 т (б); 3 т (в)



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 ≥ 0,8 F/моль. Цей процес супроводжується інтенсивним газоутворенням. Першими випаровуються пари магнію, які досягають максимальної концентрації при питомому заряду шлаку ≥ 0,9 F/моль. Одночасно починає інтенсивно випаровуватись кальцій, максимум концентрації якого припадає на рівень питомого заряду шлаку ≥ 1,0 F/моль.

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. Організовують 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°С температуру зовнішнього повітря і бути не більше 28°С

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 проникає 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.

Природнє 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 – люксметрів.

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 ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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. Енциклопедія сучасної України/ред. кільк.: Дзюба І. М. та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001-2022.

3. Патон Б. Є., Медовар Б. І., Бойко Г. А. Електрошлакове лиття. Київ : Наукова думка, 1981. 192 с.

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

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

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

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

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

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

10. 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.

11. 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). С. 20-25.

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

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

14. Харченко О. В. Лаптєв 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.

15. Харченко О. В., Кириченко О. Г., Білоконь Ю. А. та ін. Термодинаміка та кінетика процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2015. Вип. 1 (33). С. 8-12.

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

17. 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. С. 1208-1218.

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

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

20. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп'ютерна програма «Excalibur». Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022 р.

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

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

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

24. 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.

25. Зайцев О. С. Застосування технології ВЕЛР для економії феросплавів та глибокого рафінування низьколегованої сталі. *Збірник наукових праць студентів, здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених «Молода Наука – 2025»*, Том 5, С. 317-318.

26. Харченко О. В., Зайцев О. С. Застосування технології ВЕЛР для економії феросплавів та глибокого рафінування низьколегованої сталі. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції ІННІ ім. Ю.М.Потебні ЗНУ "Інженерні інновації та розбудова національної економіки"*, 15–16 травня 2025 року, м. Запоріжжя, Україна, С. 457-458.