МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

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

Кваліфікаційна робота

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

на тему_____ Глибоке розкислення і десульфурація сталі з використанням технології ВЕЛР _____
_____
_____

Виконав: студент __4__курсу, групи *6.1362-м*

_Євтушенко Д.С._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності
___*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

Спеціалізація
_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма
_____*Металургія*_____
(шифр і назва)

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

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

Запоріжжя - 2026 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

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

Спеціальність *136 Металургія*
(шифр і назва)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*

Ю.О. Бєлоконь

"___" _____2026 року

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

Євтушенко Демид Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) *Глибоке розкислення і десульфурація сталі з використанням технології ВЕЛР*

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

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

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

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Визначення закономірностей та оптимальних режимів розкислення, легування і десульфурації низьколегованих сталей 12ГС, 14ХГС, 30ГС та 09Г2С за технологією ВЕЛР*

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

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання__*29.01.2026*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент __ _____ *Д.С. Євтушенко*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 115 сторінок, 32 рисунка, 3 таблиці, 27 джерел.

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

У загальній частині кваліфікаційної роботи розглянуто метод хімічних потенціалів Гіббса, особливості легування і рафінування сталі в установках ківш-піч, теоретичні передумови розробки технології вторинного електротермічного легування та рафінування (ВЕЛР) – нового методу позапічної обробки сталі, що базується на зміні рівноваги системи «метал-шлак-газ» під впливом позитивного електричного заряду, прикладеного до рідкого шлаку.

У технологічній частині роботі проведено аналіз практичного досвіду застосування технології ВЕЛР, представлено схему промислової установки ВЕЛР, розглянуто основні закономірності впливу заряду шлаку на термодинамічну рівновагу в системі «метал-шлак», кінетику відновлення хімічних елементів в процесі ВЕЛР, а також основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях.

У металургійній частині розглянуті можливості використання навчально-дослідницького програмного комплексу «Excalibur в якості інструмента обчислювально-експериментального дослідження термо-динамічної системи «метал-шлак-газ». Наведено об’єкт і методику дослідження. Досліджено можливість глибокого розкислення і десульфурації сталей 12ГС, 14ХГС, 30ГС та 09Г2С за технологією ВЕЛР. Підтверджено практичне значення теми роботи в металургійній галузі.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуто характеристики потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника промислового підприємства.

ABSTRACT

Bachelor's qualification work contains 115 pages, 32 figures, 3 tables, 27 sources.

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

The general part of the qualification work considers the Gibbs chemical potential method, the features of alloying and refining of steel in ladle-furnace installations, the theoretical prerequisites for the development of the technology of secondary electrothermal alloying and refining (SETAR) – a new method of out-of-furnace steel processing, which is based on changing the equilibrium of the "metal-slag-gas" system under the influence of a positive electric charge applied to liquid slag.

In the technological part of the work, an analysis of the practical experience of applying the SETAR technology is carried out, a diagram of an industrial SETAR installation is presented, the main patterns of the influence of the slag charge on the thermodynamic equilibrium in the "metal-slag" system, the kinetics of the reduction of chemical elements in the SETAR process, as well as the main parameters of SETAR during various technological operations are considered.

In the metallurgical part, the possibilities of using the educational and research software complex "Excalibur" as a tool for computational and experimental research of the thermodynamic system "metal-slag-gas". The object and methodology of the study are presented. The possibility of deep deoxidation and desulfurization of steels 12ГС, 14ХГС, 30ГС and 09Г2С using SETAR technology is investigated. The practical significance of the topic of work in the metallurgical industry is confirmed.

The section "Occupational health and technogenic safety" considers the characteristics of potentially dangerous and harmful factors affecting an employee of an industrial enterprise.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ 9
1.1 Загальна характеристика легування та рафінування сталі в установках пічь-ковш 9
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 20
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР 21
2.1 Схема промислової установки ВЕЛР 21
2.2 Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях .. 21
2.3 Основні закономірності впливу заряду шлаку 23
2.4 Кінетика відновлення елементів в процесі ВЕЛР 28
2.5 Висновки 31
3 МЕТАЛУРГІЙНА ЧАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО 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 39
3.2.1 Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість 39
3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі 53
3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку 76
3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку 97
3.2.5 Вплив питомого заряду шлаку на масу і склад газової фази .. 99

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 103
4.1 Забезпечення техногенної безпеки на підприємствах 103
4.2 Мікроклімат 106
4.3 Склад повітря робочої зони 106
4.4 Виробниче освітлення 107
4.5 Виробничий шум 108
4.6 Виробничі вібрації 108
4.7 Виробничі випромінювання 109
4.8 Технічні рішення системи протипожежного захисту 109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 112
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 113

ВСТУП

Мета і задачі роботи. Дослідити особливості глибокого розкислення і десульфурації сталей 12ГС, 14ХГС, 30ГС та 09Г2С з використанням технології ВЕЛР.

Об'єкт дослідження: модифікована ківш-піч в умовах конвертерного цеху, низьколегована сталь в рідкому стані з шаром пічного шлаку.

Предмет дослідження: вплив питомого заряду шлаку на вміст легуючих елементів і домішок кисню і сірки в сталі.

Методи дослідження: Аналіз хімічного складу сталей та обчислювальний експеримент.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна полягає у дослідженні особливостей глибокого розкислення та десульфурації сталей 14ХГС, 12ГС, 30ГС, 09Г2С та розширення результатів цього дослідження.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень особливостей глибокого розкислення та десульфурації сталей 14ХГС, 12ГС, 30ГС та 09Г2С можуть бути використані для більш ефективного використання металургійного обладнання, енергії, феросплавів та уникання використання реагентів, що підвищують вартість сталі.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, наведені в кваліфікаційній роботі бакалавра отримані автором особисто. Ним виконано постановку завдання дослідження, обрано методику обчислювально-експериментальних досліджень, проаналізовано та узагальнено результати роботи, сформульовано загальні висновки.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, загальної частини, технологічної частини, металургійної частини, загальних висновків, переліку джерел посилання. Загальний обсяг роботи становить 115 сторінок, 3 таблиці, 32 рисунка, 27 джерел посилання.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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

Новітні технології обробки металу як у сталеплавильних печах (конвертерах), так і поза ними, спричинили значне зростання обсягів виробництва сталі та сплавів із високою однорідністю властивостей. При цьому в готовій продукції суттєво зменшений вміст шкідливих газів, неметалевих включень та інших небажаних домішок. Ускладнення технологічних процесів, пов'язаних із цим, виправдовується досягненням високих показників якості та надійності металопродукції.

Методи позапічної обробки сталі умовно поділяються на прості, що передбачають застосування одного способу обробки, та комбіновані, за яких використовується кілька методів одночасно. До найпростіших методів належать такі: 1) обробка металу вакуумом; 2) продування інертним газом; 3) обробка синтетичним шлаком, рідкими або твердими шлаковими сумішами; 4) введення реагентів у глибину металу.

Основними недоліками простих методів є кілька факторів: а) потреба у надмірному перегріві рідкого металу в плавильному агрегаті, щоб компенсувати зниження його температури під час роботи в ковші; б) обмеженість впливу на метал (наприклад, здійснюється виключно десульфурація чи дегазація).

Найкращих результатів щодо покращення якості сталі досягають завдяки комбінованим або комплексним методам. У цих підходах передбачена послідовність кількох операцій у спеціально обладнаних агрегатах або їх комбінації. Для їх реалізації часто потрібно адаптувати конструкцію ковша і застосовувати складніше обладнання.

У світовій практиці все більшого поширення набуває так званий процес «ківш-піч», який являє собою один із найбільш сучасних і ефективних способів позапічної обробки сталі.

Агрегат ківш-піч, або установка ківш-піч, є важливим елементом технологічного процесу у поєднанні з конвертерами, мартенівськими та дуговими печами. Його основне завдання – доведення металу в ковші до необхідної температури та хімічного складу після випуску з плавильного обладнання.

Рафінування сталі в сталерозливному ковші за допомогою підігріву металу електричною дугою стало широко використовуватися в позапічній обробці сталі. Цей метод було розроблено в 1971 році японською компанією Daido Steel. Установка для реалізації даного процесу отримала назву "Агрегат ківш-піч" (АКП).

Зазвичай агрегат ківш-піч застосовується в комплексі з плавильними установками, де здійснюється виплавка металу. До таких установок належать кисневі конвертери, дугові печі та мартенівські печі, в яких виконується розплавлення феросплавів і металобрухту з мінімальними втратами. У цих агрегатах також проходить процес окислювального рафінування. Після завершення даного етапу метал зливають у сталерозливний ківш, намагаючись уникати потрапляння пічного шлаку. Перед випуском металу і під час цього процесу додають розкислювачі, шлакоутворювальні та легуючі матеріали.

Процес нагрівання металу на АКП здійснюється аналогічно робочому принципу дугових сталеплавильних печей, однак потужність трансформаторів в установках ківш-піч значно менша – вона варіюється в межах 100–160 кВА/т. Це зумовлено тим, що на АКП відсутня високовитратна стадія розплавлення брухту, і тепло використовується лише для підтримання необхідної температури металу та плавлення матеріалів. Крім того, зниження потужності теплопостачання обумовлено захистом кладки ковша від надмірного зношення вище рівня металу, оскільки діаметр ковша зазвичай менший, ніж у дугових печах. Середня питома витрата електроенергії на АКП становить близько 10% від загальних енерговитрат на виплавку сталі.

Агрегат ківш-піч оснащений спеціальними пристроями для подачі матеріалів у вигляді дроту (трайб-апарати) та системами для введення сипучих компонентів (бункерна естакада з ваговими дозаторами).

Під час обробки металу через днище ковша здійснюється продування інертним газом, таким як азот або аргон. Це забезпечує перемішування металу з метою рівномірного розподілу температури та хімічного складу. Окрім цього, продування сприяє видаленню неметалевих включень, покращуючи якість металу. Газ подається через пористі пробки, кількість яких варіюється від однієї до трьох у великотоннажних ковшах. Додатково може використовуватись електромагнітне перемішування для досягнення ще більшої ефективності процесу.

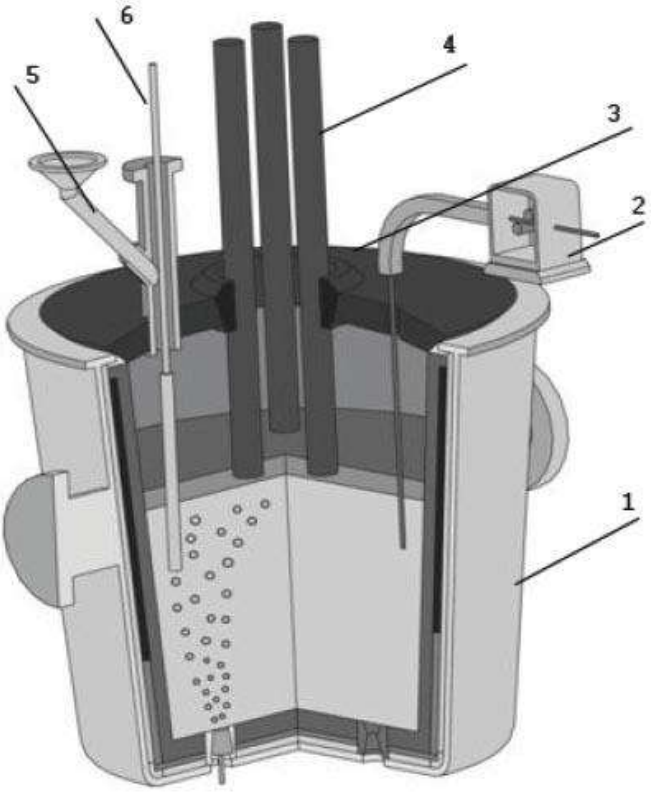


Рисунок 1.1 – Загальна схема агрегату ківш-піч:
1– сталерозливний ківш; 2 – трайб–апарат; 3 – склепіння;
4 – графітовані електроди; 5 – бункер подачі сипучих; 6 – аварійна фурма

Протягом останніх двадцяти років агрегати типу "ківш-піч" зазнали суттєвого вдосконалення як у конструкційних характеристиках, так і у технологічних процесах. Ці зміни дозволили досягти виняткових результатів

у підвищенні якості сталі, а також значного покращення енергоефективності та ресурсозбереження. Наприклад, середні витрати електродів під час обробки на таких установках складають близько 10 г/кВтг, тоді як споживання електроенергії – від 0,3 до 0,6 кВтг/т·град. Окрім того, практика підтверджує високу конкурентоспроможність агрегатів ківш-піч майже для всього діапазону місткості сталерозливних ковшів — від 12–15 до 350–360 тонн. Робота в штатному технологічному режимі дозволяє нагрівати сталь у ковші зі швидкістю 4–5°С на хвилину.

Сучасні агрегати типу "ківш-піч" мають усталену технологічну архітектуру та конструкцію, яка охоплює такі основні елементи: систему для нагрівання металу електричними дугами, бункерні механізми подачі феросплавів і матеріалів для рафінування сталі (дозатори), пристрої для перемішування металу інертними газами, механізми для подачі порошкового дроту, кришку, що накладається на ківш перед обробкою тощо.

Після випуску металу з плавильного агрегату подальші операції щодо корекції хімічного складу і температури сталі виконуються безпосередньо у ковші. Така модель забезпечує ефективність виробничого процесу та максимальну гармонізацію стадій плавки й розливання сталі. Важливо зазначити, що завдання глибокого рафінування та прецизійного розкислення особливо актуальні для виробництва великих зливків.

Загалом, при обробці сталі у ковші проводяться такі операції: гомогенізація металу за хімічним складом і температурою, корекція хімічного складу за допомогою внесення легуючих добавок, усунення шкідливих домішок (зокрема, сірки, водню, азоту, а в деяких випадках і вуглецю), доведення температури до регламентованого значення, рафінування сталі від неметалевих включень, досягнення стабільних властивостей продукції від плавки до плавки, а також контроль і управління складом шлаку тощо [1].

Розглянемо детальніше деякі з перелічених вище процесів.

Легування в металургії полягає у введенні в металеві сплави додаткових компонентів, які забезпечують формування заданого хімічного складу, структури і необхідних фізичних, хімічних та механічних властивостей [2]. По суті, легування є процесом створення сплавів з унікальними характеристиками.

Ця технологія дає змогу отримувати матеріали зі значно покращеними властивостями порівняно з чистими металами. Завдяки легуванню сплави стають міцнішими, стійкішими до зносу, високих температур, корозії тощо. Зазвичай процедура застосовується до розплавлених сплавів, а іноді – до твердих.

Взаємодія атомів легувальних елементів із основним металом, їхній розмір, електрохімічні властивості змінюють фазові умови рівноваги, сприяють утворенню твердих розчинів і хімічних сполук, впливають на температури твердофазових перетворень, а також визначають фазово-структурний стан і характеристики сплавів. Завдяки цьому створюють низку якісних матеріалів, таких як леговані сталі й чавуни, а також сплави кольорових металів.

Існують різні види легування, зокрема об'ємне та поверхневе. Крім того, практикується комплексне легування, що передбачає одночасне введення кількох елементів, і іонне легування, при якому атоми вводяться усередину твердого сплаву через бомбардування його поверхні іонами. Останній метод використовується для покращення електропровідності напівпровідників.

Для легування сталей застосовуються такі елементи: хром, нікель, манган, кремній, вольфрам, молібден, титан, ванадій, кобальт, ніобій, мідь і бор. Сталі класифікуються за вмістом легувальних компонентів: низьколеговані (до 2,5%), середньолеговані (2,5–10%) та високолеговані (понад 10%). У легованих чавунах використовуються хром, нікель, алюміній, ванадій і титан. Сплави інших металів отримують за допомогою таких компонентів: олово, цинк, свинець, залізо тощо для міді; кремній, магній,

цинк та цирконій для алюмінію; алюміній, цинк та цирконій для магнію; олово та цинк для свинцю. Легувальні елементи додаються в різних кількостях і комбінаціях переважно у вигляді спеціальних сплавів — феросплавів [3].

Рафінування металів – це процес очищення первинних (чорнових) металів від домішок. Метали, видобуті з природної сировини, зазвичай містять 96–99% основного елемента, а решту складають домішки. Внаслідок цього вони мають знижені фізико-хімічні та механічні властивості, що унеможливлює їх широке застосування в промисловості. Однак, деякі домішки можуть мати значну цінність. Наприклад, вартість золота і срібла, які вилучаються під час рафінування міді, повністю компенсує витрати на процес очищення. Існує три основні методи рафінування: пірометалургійний, електролітичний і хімічний. Вони ґрунтуються на різниці фізичних і хімічних властивостей елементів, таких як температура плавлення, щільність чи електронегативність. Для досягнення високого ступеня чистоти металів нерідко комбінують кілька способів рафінування.

Очищення сталі від домішок проводиться як у сталеплавильних агрегатах, так і поза ними. Процес рафінування безпосередньо в агрегатах призводить до збільшення часу плавки, що знижує їх продуктивність та підвищує собівартість виробництва сталі.

Позаагрегатне рафінування вимагає застосування додаткового обладнання, такого як ковші або спеціальні печі. Цей вид очищення здійснюють у розплаві за допомогою операцій, як-от вакуумування, продування інертними газами, перемішування зі синтетичними флюсами або переплав у спеціальних печах із застосуванням електрошлакових, вакуумно-дугових, вакуумно-індукційних чи плазмових технологій.

Поряд зі сталлю рафінуванню також піддаються сплави кольорових металів для покращення їх характеристик. У процесі виготовлення виливків необхідно очищати метали та сплави від небажаних газів, шкідливих елементів і неметалевих включень. Для цих цілей застосовують шлаки,

порошкове вдування, продування аргоном, електрошлаковий або електроннопроменевий переплав. Серед різних методів найбільш широкого застосування набуло саме очищення металу за допомогою шлаку.

Проблема використання установок типу "ківш-піч" для вторинного легування та рафінування сталі неодноразово порушувалась під час досліджень. Одним із важливих моментів є аналіз розподілу сірки між металом і шлаком у процесі електрошлакового переплаву за допомогою постійного струму. Зокрема, було встановлено, що коефіцієнт розподілу сірки (S)/[S] значно змінюється – більш ніж удвічі – при зміні полярності напруги на електродах [4]. Проте відсутність достатньо точних фізико-хімічних моделей багатокомпонентних систем «метал-шлак-газ» ускладнює керування цим процесом. В результаті технологічні вдосконалення залишаються здебільшого на емпіричному рівні й обмежуються окремими випадками – конкретним типом агрегату, технологією виплавки, маркою сталі або складом шлаку.

1.2 Теоретичні передумови розробки технології ВЕЛР

У роботі О. Г. Пономаренка [5] вперше було запроваджено електрохімічну поправку, або електронний внесок, до логарифма активності шлаку у вигляді додаткового члена $\mu\nu_i$, де ν_i визначає валентність елемента i у шлаку. У цій та наступних публікаціях активно обговорювався фізичний зміст параметра μ. Зокрема, пропонувалося називати його «рівнем Фермі електронів у шлаку» [5] або «окислювально-відновним потенціалом» системи «метал-шлак» [6]. В іншій роботі стверджувалося [7], що ця величина є по суті не чим іншим, як невизначеним множником Лагранжа, що виникає при розв'язанні задачі мінімізації енергії Гіббса для системи «метал-шлак» за умови електронейтральності шлакової фази.

Згодом було встановлено, що вимога електронейтральності є важливою передумовою для забезпечення коректності рівняння Гіббса-Дюгема, якщо у вираз для активності додається електронний внесок [8]. Введення цієї

електрохімічної поправки $\mu\nu_i$ значно підвищило прогностичні можливості фізико-хімічних моделей для системи «метал-шлак», що дозволило адаптувати їх до сучасних вимог, які пред'являються до інтелектуального ядра автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП) у металургійній промисловості.

Системи управління, створені на основі вказаних принципів, були впроваджені на низці металургійних підприємств, таких як Молдавський металургійний завод [8] і «Запоріжсталь» [9], а також інших. Однак відсутність ентальпійної складової в існуючих фізико-хімічних моделях обмежувала точність моделювання й прогнозування сталеплавильних процесів.

Включення в модель системи «метал-шлак-газ» ентальпійного теплового балансу з розрахунком кінцевої температури та використанням нової термодинамічної моделі конденсованих розчинів [8] фактично завершило теоретичну розробку базового каркасу фізико-хімічної моделі. Це дало змогу не лише створювати повністю автоматизовані системи управління для сучасних металургійних процесів, але й відкривати перспективи застосування нових технологічних рішень. Зокрема, стала можливою розробка таких інноваційних процесів, як вторинне електротермічне легування та рафінування металу під час його обробки в ковші-печі.

1.3 Крива електричної нейтральності

Ключовим аспектом теорії ВЕЛР є поняття кривої електронейтральності (КЕ), характерний вигляд якої представлено на рисунку 1.2.

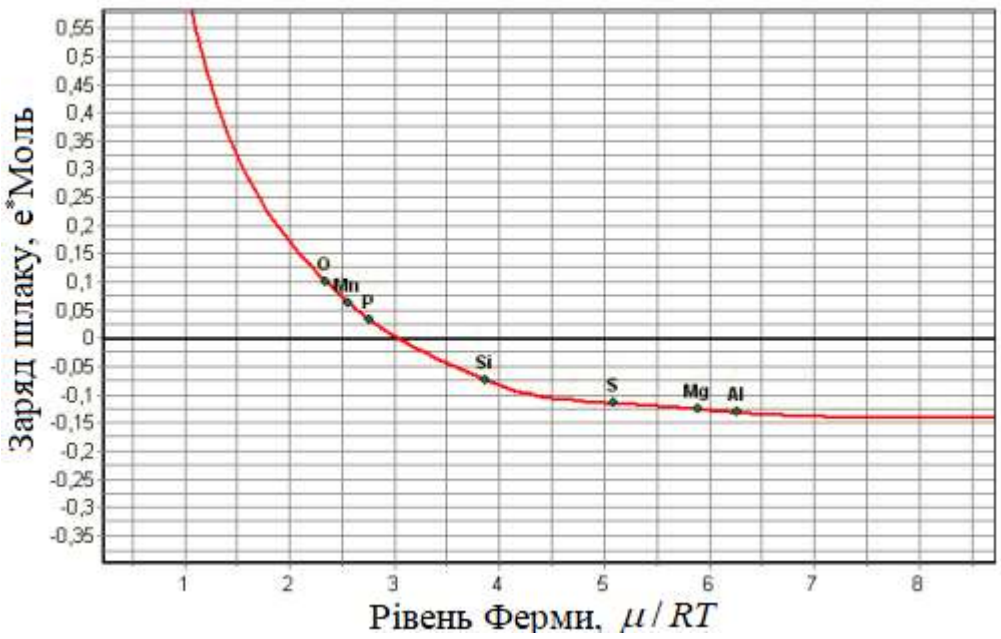


Рисунок 1.2 – Фрагмент кривої електронейтральності

У координатах "Заряд шлаку, e*Ммоль – Рівень Фермі електронів у шлаку" крива електрохімічного потенціалу будується як неявна функція, що визначаються рівняннями, які описують стан термодинамічної системи "метал-шлак-газ" [10].

Розташування точок окремих хімічних елементів відносно осі абсцис демонструє здатність шлаку в конкретних умовах поглинати або віддавати хімічний елемент. Якщо точка елемента з позитивною валентністю розташована нижче цієї осі, то елемент має тенденцію переходити до шлаку. У протилежному випадку хімічний елемент схильний переходити до металу або газу. Для елементів із негативною валентністю перехід до шлаку відбувається тоді, коли відповідна точка розташована вище осі абсцис.

Взаємне розташування точок елементів на кривій електронейтральності відображає послідовність процесів окислення чи відновлення елементів при зміні окислювально-відновного потенціалу термодинамічної системи.

Графік, наведений на рисунку 1.2, демонструє, що фосфор, марганець і сірка мають тенденцію переходити до металу, тоді як кремній, магній і алюміній залишаються у шлаку. У процесі збільшення ступеня розкислення першочергово відновлюється кремній, після чого сірка починає взаємодіяти

зі шлаком, а згодом відновлюються магній і алюміній. При зростанні ступеня окислення спочатку піддається окисленню фосфор, а за ним – марганець.

Таким чином, використання кривої електронейтральності дозволяє оцінити здатність елементів до окислення або відновлення в конкретних умовах хімічної рівноваги. Розуміння якісних і кількісних характеристик КЕ, а також вміння маніпулювати ними за допомогою зовнішнього електричного поля відкривають можливості для організації принципово нового процесу високотемпературного електротермічного відновлення (ВЕЛР) у промисловій практиці.

Значення ординат елементів на діаграмі кривої електронейтральності дають змогу оцінити необхідний рівень напруги для створення відновлювальних або окислювальних умов, враховуючи задану геометричну конфігурацію шлакового шару та його електропровідність. Оскільки електричний опір шлаків має кінцеву величину, проведення ВЕЛР потребує певних енергетичних затрат. Проте утворений у процесі тепловий ефект частково компенсує витрати електроенергії, яка подається на електроди для підігріву.

Попередні розрахунки свідчать, що для відновлення одного моля кремнію зі шлаку методом ВЕЛР потрібно суттєво менше електроенергії порівняно з її кількістю для виробництва еквівалентного об’єму кремнію у вигляді феросиліцію. Це включає не лише витрати на отримання феросплаву, а й його доставку на завод, введення у розплав та нагрівання до необхідної температури – навіть із врахуванням екзотермічної реакції. Аналогічна економія енергії спостерігається і при відновленні марганцю та алюмінію.

1.4 Теоретичні основи ВЕЛР

Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» із використанням методу хімічних потенціалів Гіббса [12, 13] стало основою розробки теоретичних підходів та технології ВЕЛР. У низці досліджень, які ґрунтуються на теоретичних і практичних результатах, було показано

потенціал ВЕЛР для ефективного легування та рафінування рідкої сталі [14-18]. Зокрема, застосування ВЕЛР для обробки низьколегованої сталі в модернізованих установках типу ківш-піч забезпечує такі основні переваги:

1. Зниження витрат на дорогі феросплави, синтетичні шлаки та порошкові модифікатори.

2. Утилізація таких побічних продуктів, як звичайні конвертерні, мартенівські та доменні шлаки.

3. Можливість виконання десульфурації та дефосфорації без використання реагентів, які підвищують вміст неметалевих включень у сталі.

4. Ефективне введення високоактивних легуючих добавок із максимальною засвоюваністю.

5. Зменшення рівня газовиділення та пилоутворення порівняно з традиційними методами легування і розкислювання сталі.

Однією з важливих особливостей технології ВЕЛР є суттєве скорочення маси шлаку під час проведення позитивного процесу, тобто такого, в якому електричний заряд шлаку має позитивне значення. Теоретичні розрахунки показали, що цей ефект супроводжується не лише переходом аніонів у метал, але й утворенням газової фази за умови збільшення заряду шлаку понад певний критичний рівень.

Зростання заряду шлаку сприяє не тільки зниженню вмісту сірки, кисню та неметалевих включень у металі до рекордно низьких значень, але й формуванню модифікованої сталі з підвищеним вмістом кальцію та магнію. Проте ці елементи у більшості марок сталі зустрічаються у надзвичайно малих кількостях і зазвичай не мають нормативних обмежень, зазвичай становлячи лише тисячні частки відсотка.

Експериментальні дослідження [15] підтвердили зменшення маси шлаку та супутнє інтенсивне газоутворення під час процесу. Водночас питання маси, тиску та складу газової фази залишаються невирішеними. Зазначено також, що газоутворення може негативно позначатися на інтенсифікації позитивного процесу ВЕЛР, адже частина цінних легуючих

елементів, таких як марганець, кальцій і магній, переходить у газову фазу та безповоротно втрачається, що знижує ефективність процесу.

1.5 Вибір питомої величини заряду шлаку

Під час аналізу впливу заряду шлаку на процес ВЕЛР виникає потреба у визначенні відповідної питомої величини універсальної незалежної змінної. Найбільш доцільним вибором видається використання відношення заряду шлаку, вираженого у Фарадеях, до кількості молів шлаку. Оскільки один Фарадей (F) відповідає заряду одного моля електронів, запропонована змінна дає можливість визначити кількість елементарних зарядів, що припадають на один атом (іон) шлаку, враховуючи знак заряду. Ця змінна отримала назву питомого заряду шлаку, позначається літерою q та має одиницю вимірювання F/моль.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛР

2.1 Схема промислової установки ВЕЛР

На рис. 2.1 представлено схему найпростішої промислової установки ВЕЛР [14, 19]. Постійна напруга від джерела 6 подається на рідкий шлак 3 через спеціально сформовані графітовані електроди 5. Передбачається, що метал у ковші-печі постійно перемішується за допомогою продувки інертним газом.

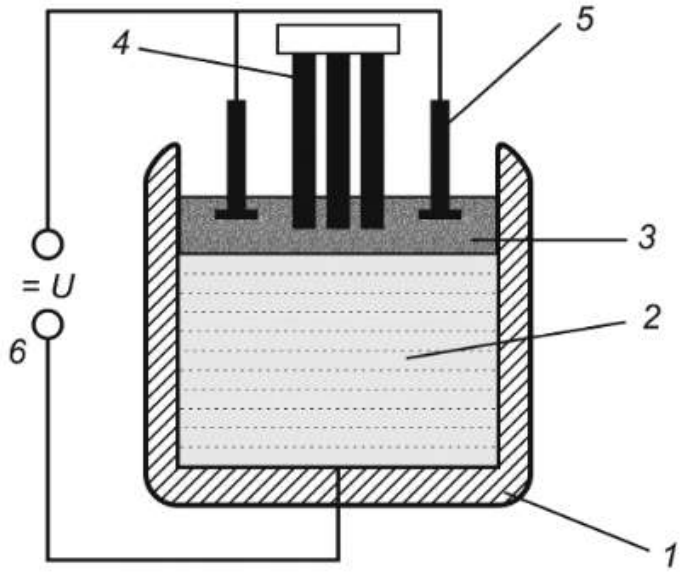


Рисунок 2.1 – Принципова схема промислової установки ВЕЛР:
1 – кожух установки ківш-піч; 2 – розплав металу; 3 – рідкий шлак;
4 – електроди підігріву; 5 – електроди ВЕЛР; 6 – джерело постійної напруги

2.2 Основні параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях

У таблиці 2.1 представлено ключові параметри ВЕЛР для різних технологічних операцій, зокрема питомий заряд шлаку, оптимальні характеристики шлаку і металу, а також досягнуті результати.

Таблиця 2.1 – Ключові параметри ВЕЛР при різних технологічних операціях

Технологічна операція	Питомий заряд шлаку, F/моль	Оптимальні параметри шлаку та металу	Досягаємий результат
Легування Mn, Si, Cr, Al	0,5…0,8	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 10\%(MnO)$ $(SiO_2),(Cr_2O_3)$ $\geq 5\%(Al_2O_3)$	$\Delta[Mn] = 0{,}15,...0{,}30\%$ $\Delta[Si] = 0{,}10,...0{,}50\%$ $\Delta[Cr] = 0{,}15,...0{,}30\%$ $\Delta[Al] = 0{,}01...0{,}10\%$
Окислювальне рафінування, зневуглецювання	-4,5 … -2,0	$\geq 0{,}1\%(C)$	$\leq 0{,}03\%(C)$ $\leq 0{,}005\%(Si)$
Розкислення	0,4…0,5	$\leq 20\%(FeO)$	$\leq 0{,}003\%(O)$
Дефосфорація	-2,0…-1,5	$\leq 0.2\%(P_2O_5)$ $\leq 0.1\%(Si)$	$\leq 0{,}005\%(P)$
Десульфурація	0,6…0,8	$\leq 20\%(FeO)$ $\leq 0{,}3\%(S)$	$\leq 0{,}003\%(S)$
Легування Ca, Mg	0,8…1,2	$\leq 20\%(FeO)$ $\geq 20\%(CaO)$ $\geq 5\%(MgO)$	$0{,}035....0{,}35\%(Ca)$ $0{,}020....0{,}030\%(Mg)$

Термодинамічне моделювання електрошлакових реакцій ВЕЛР на основі методу хімічних потенціалів Гіббса підтверджує високу ефективність цього процесу та демонструє хорошу відповідність із раніше отриманими результатами експериментальних досліджень. Залежно від полярності електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може використовуватись як для розкислення, легування і десульфурації, так і для окислювального рафінування та зневуглецювання рідкої сталі.

Встановлено, що у ході процесу ВЕЛР зміна питомого заряду шлаку, як у позитивному, так і в негативному напрямку, впливає на утворення газової фази. Обсяг газового виділення залежить від зовнішнього тиску: при атмосферному тиску в позитивному процесі значна частина кальцію переходить у газову фазу, що обмежує його можливий вміст у сталі до рівня не більше 0,04%. Проте підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа при

питомому заряді шлаку q ≥ 1 F/моль дозволяє збільшити максимальний вміст кальцію у сталі до 0,35%.

Технологія ВЕЛР відкриває перспективи використання металургійних шлаків для легування сталі лужноземельними металами, що дає змогу відмовитися від коштовного порошкового дроту, значно знижуючи витрати на виробництво.

2.3 Основні закономірності впливу заряду шлаку

Метою дослідження є встановлення основних закономірностей впливу заряду шлаку на систему «метал-шлак-газ» у процесі обробки електротермічного легування і рафінування. Для отримання результатів застосовували термодинамічне моделювання з врахуванням ймовірного утворення та виділення газової фази. У межах дослідження також передбачається визначення маси, тиску та складу газової фази, а також розробка технологічних підходів для зменшення втрат легувальних елементів із одночасним підвищенням позитивного заряду шлаку. Крім того, необхідно встановити оптимальні параметри процесу ВЕЛР для виробництва низьколегованих сталей.

Об'єктом термодинамічного моделювання виступає розкислена рідка сталь марок 09Г2С, 12ГС і 30ГС, нагріта до температури 1600 °С і вкрита шаром рівноважного шлаку. Маса металу в розглянутій системі приймається рівною 150 тонн, а початкова маса шлаку – 1,5 тонни. Шлак має типовий склад, характерний для закінчення конвертерної плавки: 20% FeO, 20% SiO_2, 10% MnO, 45% CaO, 3% MgO, 1,5% Al_2O_3, 0,3% S та 0,2% P_2O_5.

Додатково досліджено вуглецевий напівпродукт зі складом: 0,05% C, 0,001% Si, 0,12% Mn, 0,035% S і 0,015% P, який використовується для отримання низьколегованих сталей.

Як видно з рис. 2.2, при зміні величини питомого заряду шлаку для кожної з досліджуваних марок сталі існує зона стабільного металу, у якій газовиділення повністю відсутнє. Зі збільшенням зовнішнього тиску ця зона

розширюється. Така закономірність може розглядатися як ключовий елемент технології, спрямованої на зниження втрат аніонів у газовій фазі в умовах сприятливого процесу. Коли питомий заряд шлаку перевищує 1 F/моль, криві тиску газової фази для всіх марок сталі проявляють схожі тенденції: вони виходять на горизонтальну ділянку при значенні 180 кПа. Це свідчить про те, що підвищення зовнішнього тиску до показника 200 кПа дозволяє повністю усунути газовиділення.

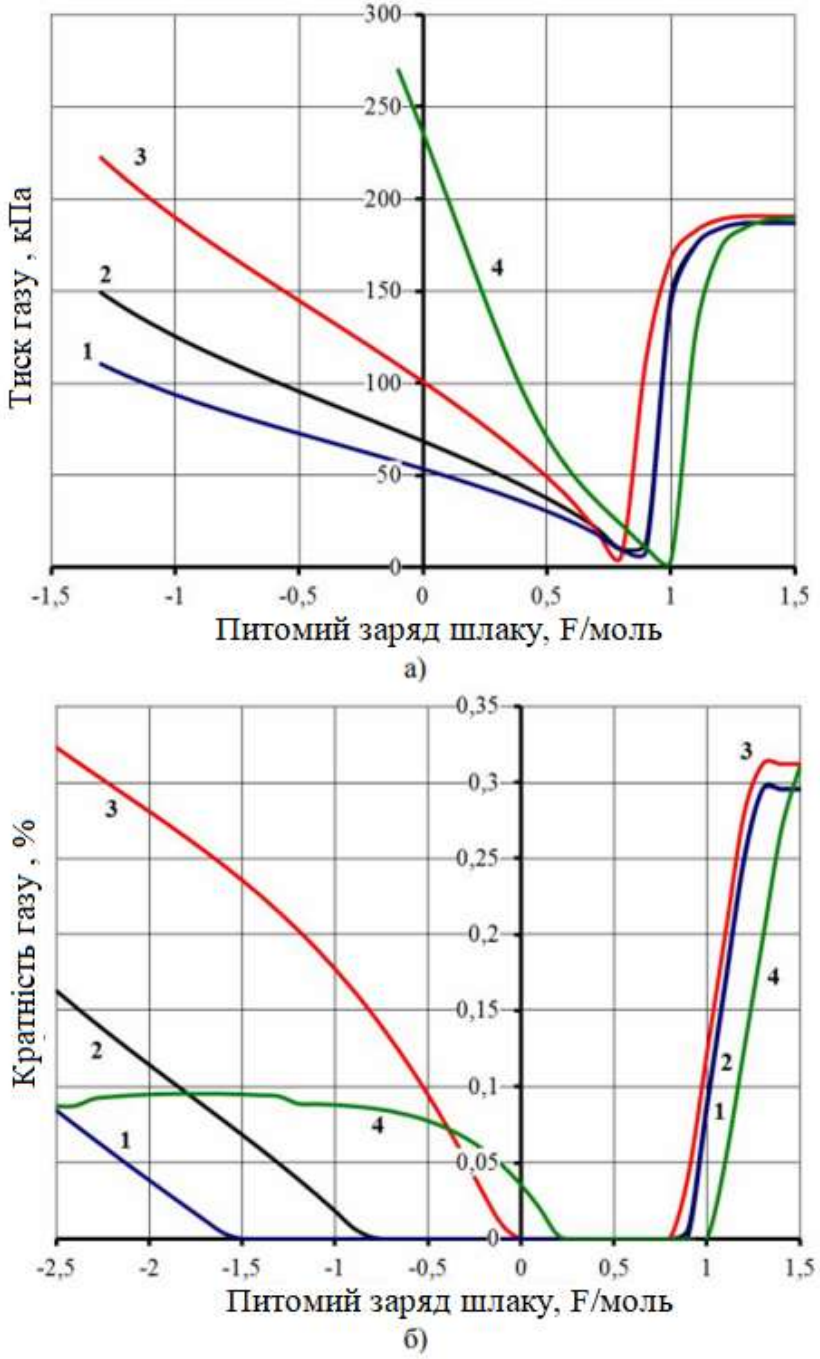


Рисунок 2.2 – Вплив питомого заряду шлаку на тиск (а) та кратність (б) газової фази: 1 – 09Г2С, 2 – 12ГС, 3 – 30ГС, 4 – напівпродукт

Усі криві на рис. 2.2 мають характерні мінімуми в інтервалі q = 0,7..0,8 F/моль, в якому 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 гілці кожної кривої і парціальний тиск пари Ca і Mg в їх правих частинах.

Надання шлаку негативного заряду дозволяє здійснити окислювальне рафінування, під час якого катіони кисню переходять до металу, а аніони, зокрема фосфору, потрапляють до шлаку. У цьому процесі спостерігається збільшення маси шлаку і підвищення температури розплаву внаслідок окислення заліза та інших домішок. Також утворюється газова фаза, в якій переважає моноксид вуглецю (CO), що виникає через окислення вуглецю в рідкому металі.

Замість традиційного методу введення лужноземельних металів у сталь за допомогою дорогого порошкового дроту та трайб-апаратів, технологія ВЕЛР пропонує ефективніше рішення. Вона дозволяє використовувати кальцій і магній, що вже містяться в металургійних шлаках.

При звичайному атмосферному тиску відносно високий парціальний тиск пари кальцію обмежує його вміст у сталі, який не перевищує 0,04% для всіх досліджуваних марок. Однак підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа дозволяє збільшити вміст кальцію в сталі до 0,30–0,35%. У таких умовах основна частина кальцію з шлакової фази переходить у металеву фазу, а не в газову.

Також варто зазначити практично лінійну залежність між вмістом кальцію в сталі та питомою кількістю шлаку на висхідних ділянках кривих при підвищеному тиску. Це відкриває можливість точного регулювання необхідної концентрації кальцію в сталі – від мінімальних слідів до

максимального рівня в 0,35%. Якщо необхідно перевищити цей рівень, слід збільшити частку CaO в складі шлаку та масу самого шлаку.

Якщо концентрація кальцію в сталі зростає одночасно зі збільшенням позитивного заряду шлаку, варіюючись від незначних значень до максимальної межі, то вміст магнію демонструє іншу динаміку. На певному етапі він досягає максимальних показників у межах 0,020–0,026%, що приблизно відповідає мінімальному тиску утворення газової фази. Проте при подальшому збільшенні заряду шлаку вміст магнію починає помітно знижуватись і стабілізується на рівні 0,01%, коли питомий заряд шлаку q перевищує 1,25 F/моль. Це явище пояснюється переходом частини магнію в газову фазу. Підвищення зовнішнього тиску до 200 кПа не впливає на максимальну концентрацію магнію в сталі. Для забезпечення вищого вмісту магнію необхідним є збільшення частки MgO у складі шлаку.

Примітно, що навіть використовуючи нелегований напівпродукт та конвертерний шлак, можна отримати модифіковану сталь з високим рівнем кальцію і магнію, а також із мінімальними концентраціями сірки та кисню.

Теоретично процес ВЕЛР дозволяє практично повністю видалити сірку і кисень із металу завдяки зміщенню рівноваги між металом, шлаком і газом. Однак перенасичення шлакової фази киснем і сіркою робить її термодинамічно нестабільною, що може призвести до її випаровування ще до повного видалення сірки. Розв'язання питання про термодинамічну стабільність електронейтральної шлакової фази є складним завданням, що потребує додаткових досліджень, включаючи аналіз функції стабільності ψ [20-21].

Далі буде розглянуто рівноважну термодинаміку та кінетику процесу вторинного електротермічного легування і рафінування металу.

Основним завданням є створення модифікованої моделі рівняння термодинамічної рівноваги для системи «метал-шлак-газ» у контексті процесу ВЕЛР, вирішення системи кінетичних диференціальних рівнянь для опису траєкторії досягнення рівноваги в системі "метал-шлак" під час ВЕЛР

стали марки 14ХГС та проведення аналізу факторів, що впливають на властивості шлакової складової в системі "метал-шлак", представленої як електролітичний конденсатор.

У разі прикладання електричної напруги до шлаку, що виконує функцію одного електрода, і металу, який виступає другим електродом, система "метал-шлак" набуває характеристик електролітичного конденсатора. У таких умовах зміщення осі абсцис на графіку електронейтральності (рис. 2.3) буде прямо пропорційним значенню прикладеної напруги та ємності конденсатора. В ідеальному конденсаторі струмовий витік практично відсутній, однак у випадку ВЕЛР він має місце, виступаючи ключовим фактором для процесу електролізного відновлення, тобто згідно з законом Фарадея.

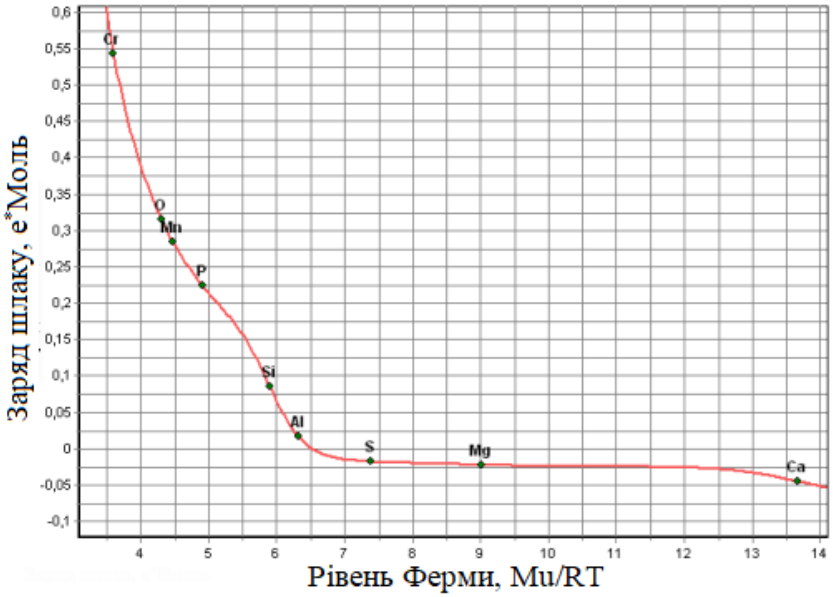


Рисунок 2.3 – Фрагмент кривої електронейтральності при доданому заряді до шлаку 0,05 од. Фарадея при ВЕЛР сталі 14ХГС

Для аналізу електролізної компоненти ВЕЛР необхідно визначити вольтамперну характеристику системи «метал-шлак», яка при низьких значеннях струму та напруги може мати значну нелінійність.

Система рівнянь, що описує термодинамічну рівновагу в умовах ВЕЛР для системи «метал-шлак», відрізняється від традиційної моделі, наведеної,

наприклад, у роботі [11]. Головною відмінністю є те, що в рівнянні електронейтральності права частина містить заряд шлаку Q, який виражається 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 становлять систему «метал-шлак».

Перетворення шуканих величин, таких як кількість молів елементів у металі та шлаку, до фазових змінних *Y* і μ, дозволяє спростити початкову систему з *k*+1 нелінійних рівнянь до двох рівнянь відносно невідомих *Y* та μ:

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

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

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 *i*-го елемента в системі; μ – окислювально-відновний потенціал системи (рівень Фермі); A_i – логарифми консолідованих (або ефективних) констант рівноваги "метал-шлак" по *i*-му елементу.

2.4 Кінетика відновлення елементів в процесі ВЕЛР

Для опису кінетики процесу ВЕЛР використовувалась автономна динамічна система з 2*k* диференціальних рівнянь, які визначають зміну кількості молів у металі та шлаку. При цьому незалежними можуть бути або *k* рівнянь для чисел молей у металі, або *k* рівнянь для чисел молей у шлаку.

Характер кінетики відновлення елементів із позитивною валентністю та їхнього переходу в метал відзначається загальною монотонністю, за винятком кальцію (див. рис. 2.4). Елементи переважно відновлюються майже

одночасно під час наближення до стану рівноваги, причому останнім відновлюється алюміній. Щодо вмісту кальцію, він змінюється за складною траєкторією із перегинами та локальним мінімумом.

Окрім цього, спостерігається повна відповідність з експериментальними даними: відбувається десульфурація металу і поступове зниження рівня сірки в ньому. Вміст кисню в металі також зменшується до рівноважного показника 0,007% без будь-яких помітних аномалій.

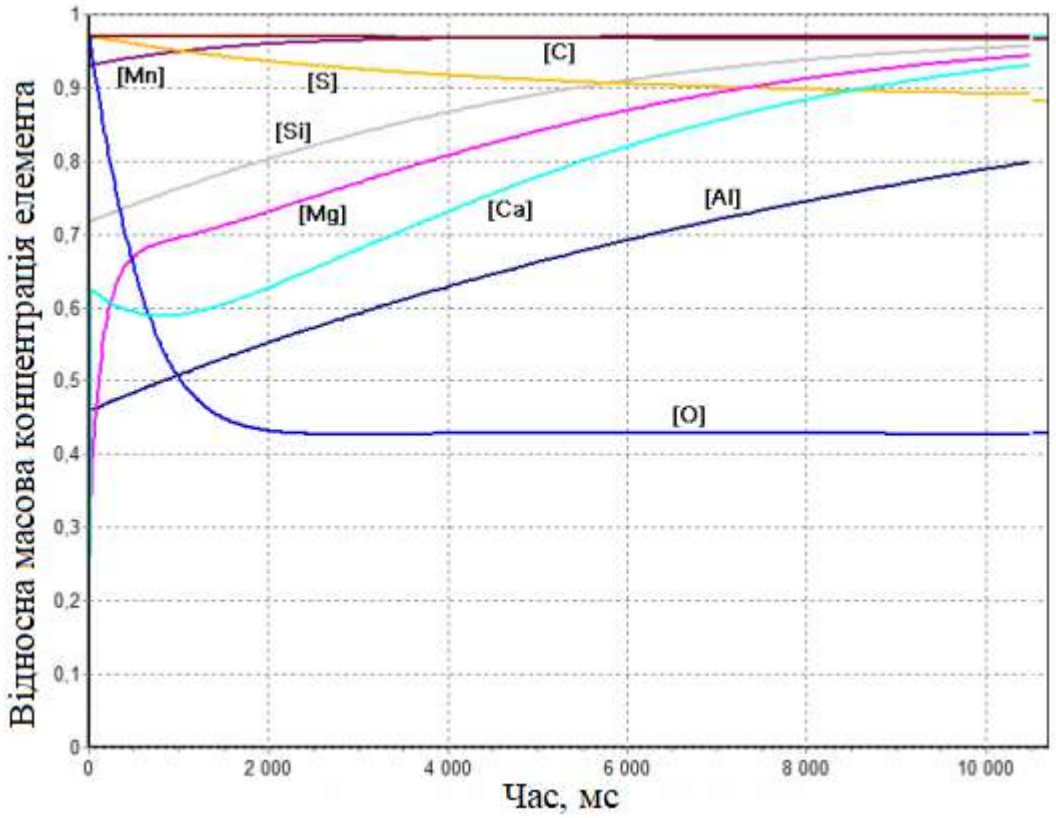


Рисунок 2.4 – Траєкторії руху до рівноваги концентрації елементів у металі в процесі ВЕЛР стали 14ХГС

У шлаку загалом спостерігається протилежна картина, що проілюстровано на рисунку 2.5. Одночасно відзначається зростання концентрації кисню та сірки. У стані рівноваги шлак набуває електричного заряду, який підтримується за допомогою зовнішнього джерела постійного струму. Проведений експеримент показав, що через електролізну складову маса відновлених елементів, таких як кремній та алюміній, перевищує кількість, розраховану виключно за рівноважним станом у системі «метал-

шлак». Це сприяє підвищенню ефективності процесу ВЕЛР, хоча водночас потребує додаткового споживання електроенергії.

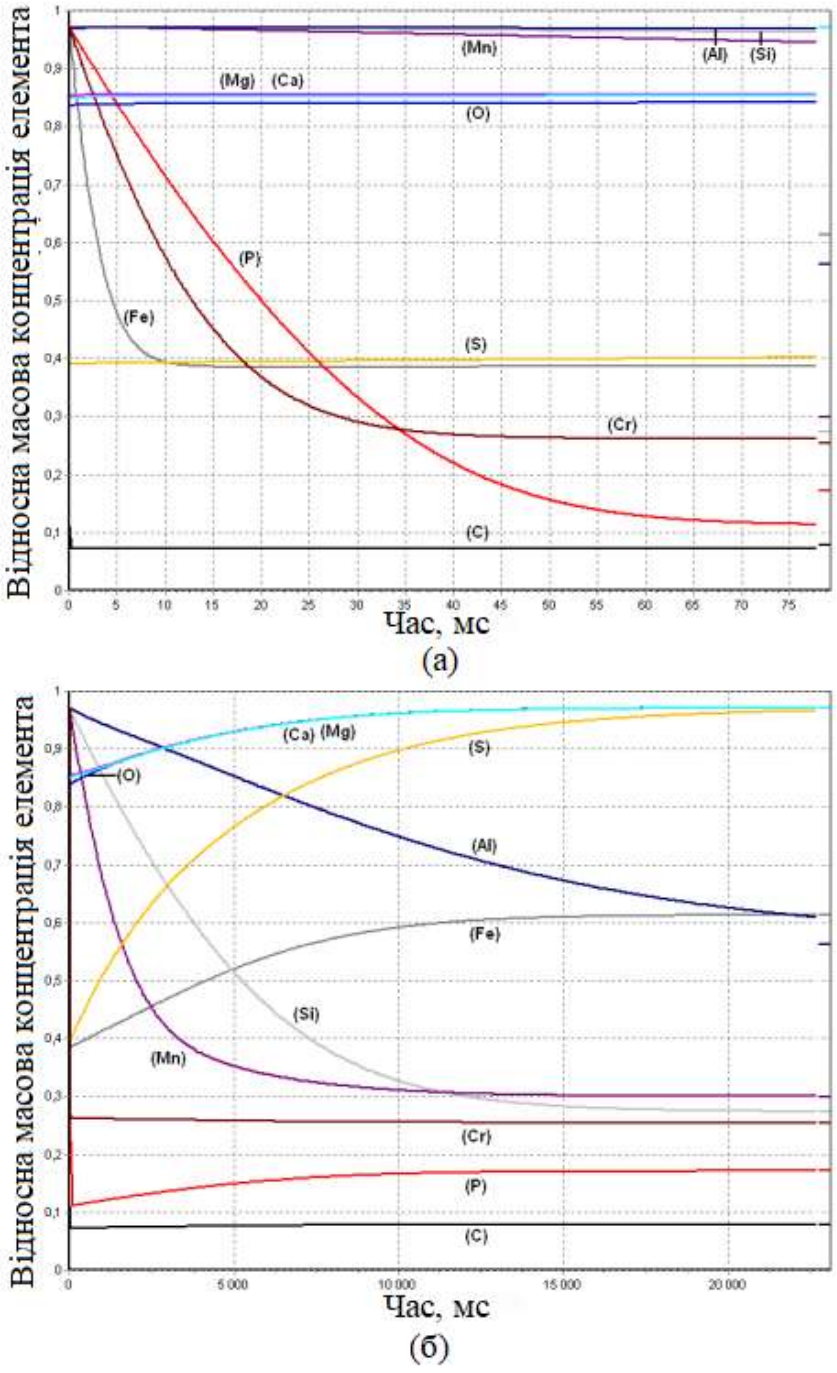


Рисунок 2.5 – траєкторія руху до рівноваги концентрацій елементів у шлаку ВЕЛР сталі 14ХГС за витримкою 80мс (а) и 23с (б)

У таблиці 2.2 наведено початкові та кінцеві концентрації елементів у металі (сталь 14ХГС) та шлаку, які відповідають показникам, зображеним на графіках на рис. 2.4 і 2.5. Представлені дані демонструють найбільш помітне збільшення вмісту кремнію в металі на 0,19%, що супроводжується

зменшенням його концентрації в шлаку на 12,66%. Також відзначається більше ніж дворазове підвищення вмісту алюмінію та магнію у металі, яке досягає рівня 0,009% і $2 \cdot 10^{-4}$ % відповідно. Зниження вмісту кисню до показника 0,007% свідчить про ефективне очищення металу від оксидних неметалевих включень. Вміст сірки у металі скорочується незначно — всього на 0,003%, проте її концентрація у шлаку збільшується більш ніж удвічі, з 0,15 до 0,39%. Як підтверджує аналіз рис. 2.3, для подальшого суттєвого зменшення концентрації сірки в металі необхідно додатково збільшити позитивний заряд шлаку на 0,04 F.

Таблиця 2.2 – Початкові та кінцеві концентрації елементів металу та шлаку в процесі ВЕЛР стали 14ХГС

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	$1 \cdot 10^{-4}$	0,64	0,016	Сл..
М кін	97,4	0,14	0,75	0,96	0,009	0,026	0,027	$2 \cdot 10^{-4}$	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	$7 \cdot 10^{-4}$	2,67	0,008	46,6	42,7

Однією з ключових характеристик процесу ВЕЛР за позитивного заряду шлаку є значне зменшення його маси (на 31% для сталі 14ХГС). Цей фактор слід обов'язково враховувати при розробці промислових установок ВЕЛР.

2.5 Висновки

1. Встановлено, що підвищення позитивного чи негативного питомого заряду шлаку у процесі ВЕЛР впливає на утворення газової фази. Обсяг виділення газів залежить від рівня зовнішнього тиску. При атмосферних умовах у позитивному процесі значна частина кальцію переходить у газову фазу, через що його концентрація в сталі не перевищує 0,04%. Проте

підвищення тиску до 200 кПа за питомого заряду шлаку 1 F/моль дає змогу збільшити вміст кальцію в сталі до 0,35%. Завдяки технології ВЕЛР для легування сталі лужноземельними металами можна використовувати дешевші металургійні шлаки замість дорогого порошкового дроту.

2. Системи рівнянь, отримані в межах дослідження, описують термодинамічну рівновагу процесу ВЕЛР і кінетичні траєкторії прогресії системи «метал-шлак» до стану рівноваги. Числові розрахунки демонструють зміну концентрацій хімічних елементів у металі та шлаку, що відкриває можливість проектування ефективного технологічного процесу ВЕЛР. Проведено аналіз чинників, які впливають на заряд шлаку в системі «метал-шлак», розглянутій як електролітичний конденсатор. Це дозволяє визначити необхідні параметри для процесу ВЕЛР сталі з мінімальним вмістом кисню та сірки.

3. Термодинамічне моделювання технології ВЕЛР, здійснене із застосуванням методу хімічних потенціалів Гіббса, підтвердило високу ефективність цього процесу та задовільну відповідність експериментальним результатам, отриманим раніше. Залежно від величини електричного заряду, прикладеного до шлаку, ВЕЛР може слугувати як для розкислення, легування та десульфурації сталі, так і для проведення більш складних операцій, таких як окислювальне рафінування чи видалення надлишків вуглецю з рідкої сталі.

3 МЕТАЛУРГІЙНА ВАСТИНА. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ І РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОЦЕСІ ВЕЛР

3.1 Програмний комплекс «Excalibur» в дослідженні електрохімічного легування і рафінування сталі у процесі ВЕЛР

Існує багато методів проведення плавлення, легування, позапічної обробки та рафінування сталі. Кожен із цих підходів має забезпечувати заданий хімічний склад металу, відповідний температурний та шлаковий режим, а також враховувати допустимі параметри металургійного обладнання, таких як сталеплавильні агрегати, ковші, дозатори, фурми тощо.

Серед численних можливих варіантів досягнення поставленої мети, які відрізняються як кількісними, так і якісними характеристиками, бажано обрати один оптимальний варіант. Цей підхід повинен бути або найменш витратним, або найпродуктивнішим. Зважаючи на значну складність фізико-хімічних моделей, велику кількість хімічних елементів і шихтових матеріалів, що залучені до розрахунків, використання спеціалізованих комп'ютерних програм видається єдиним ефективним способом отримати оптимальне рішення.

Однією з перших комп'ютерних програм, створених для оптимізації процесу легування сталі, стала програма «Форвард» [21]. Подальшим кроком у розвитку програмного забезпечення для металургійних розрахунків стала розробка системи «Оракул» [22], яка вперше враховувала неметалеву частину шихти під час розрахунку рівноваги. Проте істотним недоліком обох програм була їхня неспроможність враховувати теплові ефекти та диференціальні коефіцієнти засвоєння. Програма «Excalibur» стала першою, де у повному обсязі реалізовано як пряму, так і зворотну задачі, що працюють у взаємозв’язку. Алгоритм прямої задачі базується на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази [8] із подальшими її удосконаленнями [12; 13], забезпечений ентальпійним

тепловим балансом [10] і враховує кінетичне запізнення [23]. У свою чергу, алгоритм зворотної задачі використовує універсальний метод фазових операторів [24], спеціальним випадком якого є диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) у металі [11].

Промислова реалізація одного з варіантів програми – системи управління плавкою та позапічною обробкою «Гіббс»® – була впроваджена на БМЗ у 2004 році [9].

За своїми функціональними можливостями програма «Excalibur» суттєво перевищує попередньо розроблені програми термодинамічного моделювання системи «метал-шлак-газ» [25; 26].

Основні переваги програми:

- Проведення комплексного термодинамічного розрахунку кінцевої температури системи на основі ентальпійного теплового балансу.

- Виконання термодинамічного аналізу рівноваги в багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» із урахуванням теплоти, яка вивільняється чи поглинається під час хімічних реакцій.

- Розрахунок і представлення всіх інтегральних і парціальних термодинамічних функцій компонентів системи, включаючи усі фази та окремі хімічні елементи, з орієнтацією на єдиний стандарт.

- Можливість визначення парціального тиску всіх атомарних і молекулярних компонентів газової фази.

- Розрахунок динамічної взаємодії фаз у сталеплавильному агрегаті з наочним відображенням результатів, ґрунтуючись на принципах нерівноважної термодинаміки й розв’язанні динамічних систем диференціальних рівнянь.

- Комплексний розрахунок процесу плавлення в дуговій сталеплавильній печі, включаючи: динаміку плавлення брухту, масу і хімічний склад металу, шлаку та газової фази, зміни температури на різних етапах технологічного процесу з урахуванням кінетичних затримок,

параметри скачування шлаку, теплові втрати та геометричні характеристики печі.

- Детальне врахування теплової енергії енергоносіїв, теплових втрат, а також контроль температури та агрегатного стану матеріалів.

У контексті повного та точного розв'язання зворотної задачі термодинамічного моделювання програма «Excalibur» забезпечує:

- Постановку та гарантоване дотримання комплексу односторонніх і двосторонніх обмежень з оптимізації, що стосуються хімічного складу та маси кінцевих продуктів (металу, шлаку, газів), маси вихідних матеріалів, витрат енергоносіїв і досягнення кінцевої температури системи.

- Оптимізацію кількості різних легувальних і шихтових матеріалів (незалежно від їх агрегатного стану) та витрат енергоносіїв із врахуванням критеріїв мінімальної сумарної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату.

- Застосування матричної алгебри фазових операторів разом із швидкодійним алгоритмом двоїстого симплекс-методу для забезпечення високої ефективності розрахунків.

- Обчислення консолідованої матриці впливу додаткових матеріалів і енергоносіїв на масу, склад фаз і температуру системи.

- Практичну імплементацію принципу ситуаційного управління процесами завдяки оперативній генерації альтернативних варіантів легування, розкислення та позапічної обробки сталі в умовах відсутності розв'язку зворотної задачі в початковому вигляді.

- Врахування невизначеностей у вхідних даних і розрахунках шляхом встановлення відповідних довірчих інтервалів у форматі «нижня межа – верхня межа».

Результатами розрахунків прямої задачі є визначення маси та складу металу, шлаку й газу, парціального тиску всіх компонентів газової фази та кінцевої температури системи. Склад фаз може бути представленим у різних форматах: масові відсотки, молекулярні відсотки, кілограми чи кіломолі.

Додатково обчислюються об’єм виділеного газу, основність шлаку, окисно-відновний потенціал системи (рівень Фермі електронів у шлаку), хімічні потенціали, парціальні ентальпії змішування всіх елементів у всіх фазах, а також тепловий ефект хімічних реакцій.

Усі отримані величини забезпечуються довірчими інтервалами, що визначаються діапазоном "нижня межа" – "верхня межа". Для зворотної задачі додатково обчислюються оптимальні маси матеріалів, які забезпечують виконання всіх оптимізаційних обмежень, заданих для процесу плавлення.

Зазвичай розрахунки для прямої та зворотної задач виконуються за період у межах 0,01–1,0 сек. Задачі, пов'язані з кінетикою процесів, моделюванням плавки в дуговій сталеплавильній печі (ДСП), а також пошуком альтернативних рішень для зворотної задачі, займають трохи більше часу – від 0,01 до 2 хвилин. Основні результати більшості розрахунків відображаються на головній формі (рисунок 3.1).

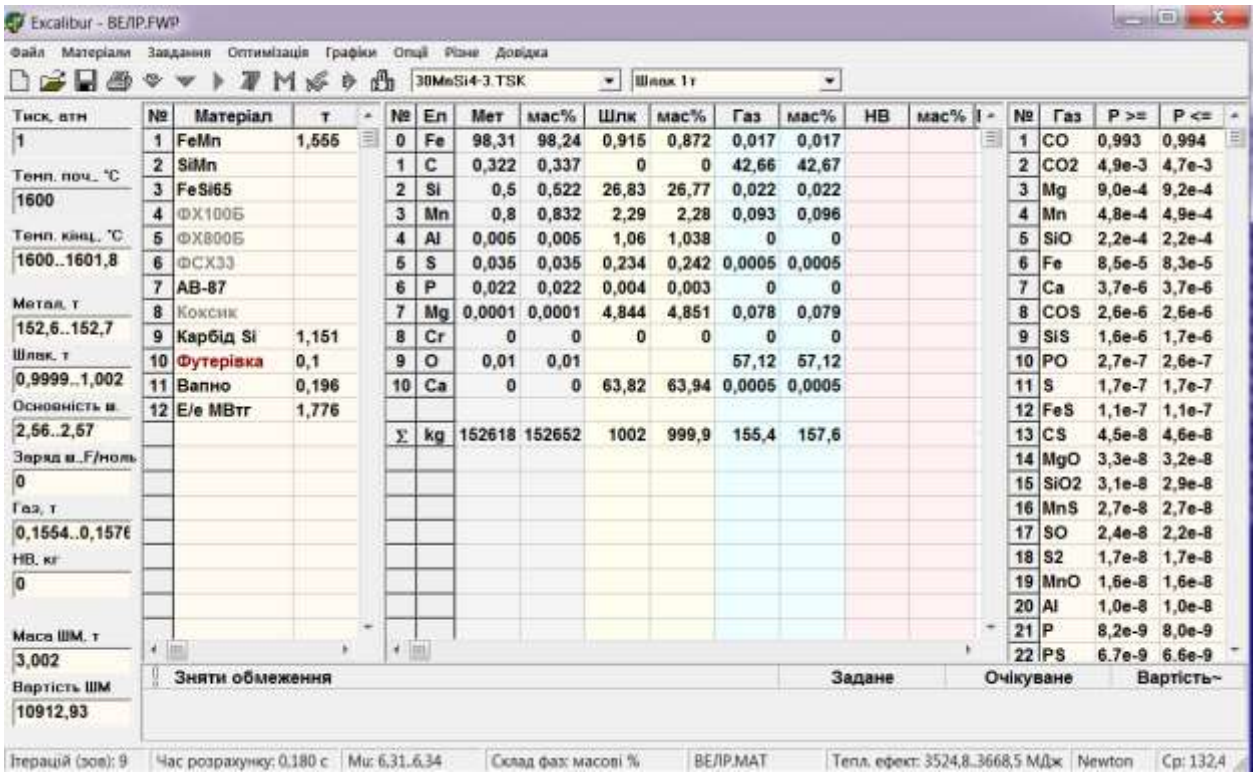


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд головної форми «Excalibur»

Програма оснащена інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, який забезпечує зручну роботу навіть за мінімального рівня теоретичних знань у галузі металургії чорних металів та інформатики. Таблиці матеріалів, елементів і газів мають контекстне меню, що додатково підвищує комфорт користування. У разі, якщо результати розрахунків прямої або зворотної задачі показують перевищення вмісту будь-якого елемента в металі чи шлаку поза межами, заданими параметрами плавки, відповідне значення у таблиці виділяється червоним кольором для наочного відображення відхилень.

Користувач може налаштовувати вихідні дані та оптимізаційні обмеження за допомогою редагованих таблиць і полів. Обмеження (односторонні та двосторонні) застосовуються до таких компонентів, як метал, шлак, газ, а також до всіх доступних і недоступних матеріалів та енергоносіїв. Зокрема, тут задається хімічний склад, діапазон мас металу та шлаку, початкова температура, температура навколишнього середовища, необхідний склад металу й шлаку, потрібні маси металу, шлаку й газу, а також обмеження на кінцеву температуру металу. Крім цього, можна вказати величину теплових втрат у мегаджоулях. Для кожного матеріалу є можливість визначити рекомендовані маси, обов’язкові (фіксовані) маси, а також задати верхню та/або нижню межу використання матеріалу в тоннах чи відсотках від загальної маси всіх матеріалів.

Редактор завдань, головну форму якого показано на рис. 3.2, дозволяє вводити до 100 різних завдань на плавку, які можна зберігати у файлах. В межах форми редактора робота з файлами завдань і окремими завданнями здійснюється через контекстне меню. На головній формі передбачено швидке перемикання між файлами завдань та окремими завданнями за допомогою двох випадаючих списків, розташованих у верхній частині форми.

Моделювання процесів у ДСП на основі розроблених алгоритмів прямого та зворотнього завдання з урахуванням теплоти хімічних реакцій та ентальпійного теплового балансу дозволяє виконати проектування технологій електросталеплавильного виробництва на якісно новому рівні, так

як алгоритми, по суті, є інтелектуальним ядром верхнього рівня систем управління технологічними процесами ДСП.

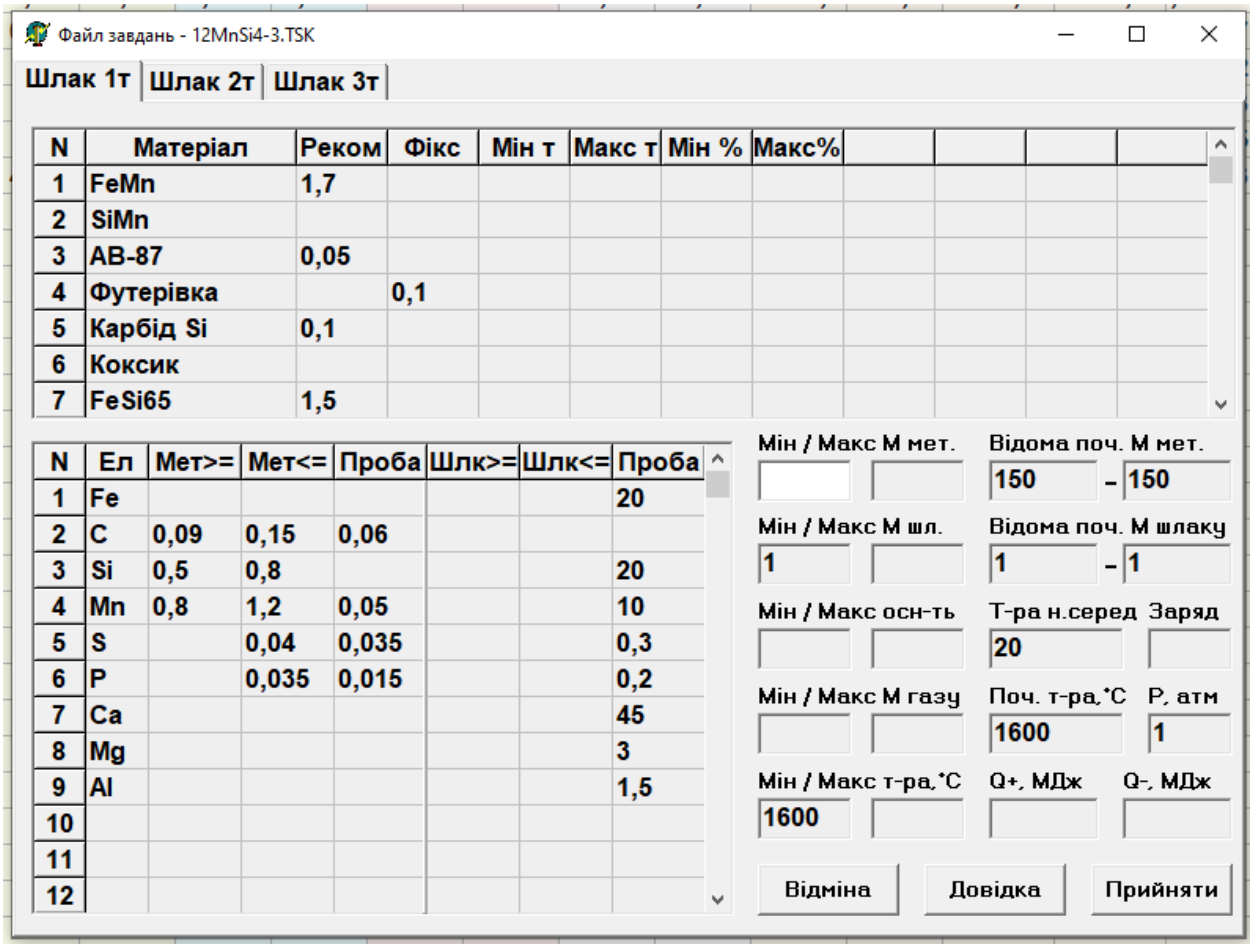


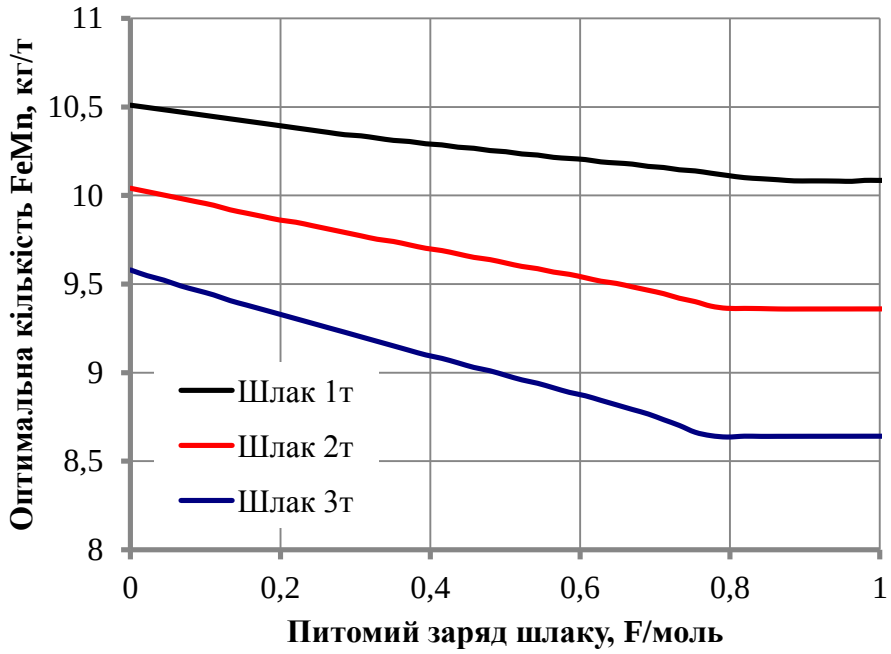
Рисунок 3.2 – Форма редактору завдання на плавку

Висновки. Програма «Excalibur» дозволяє виконувати термодинамічне моделювання системы «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу та може бути використана у якості навчальної програми для студентів металургійних спеціальностей. Вона також може служити інструментом дослідження при розробці нових технологій, так як дозволяє моделювати різноманітні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурації та дефосфорації сталі [27].

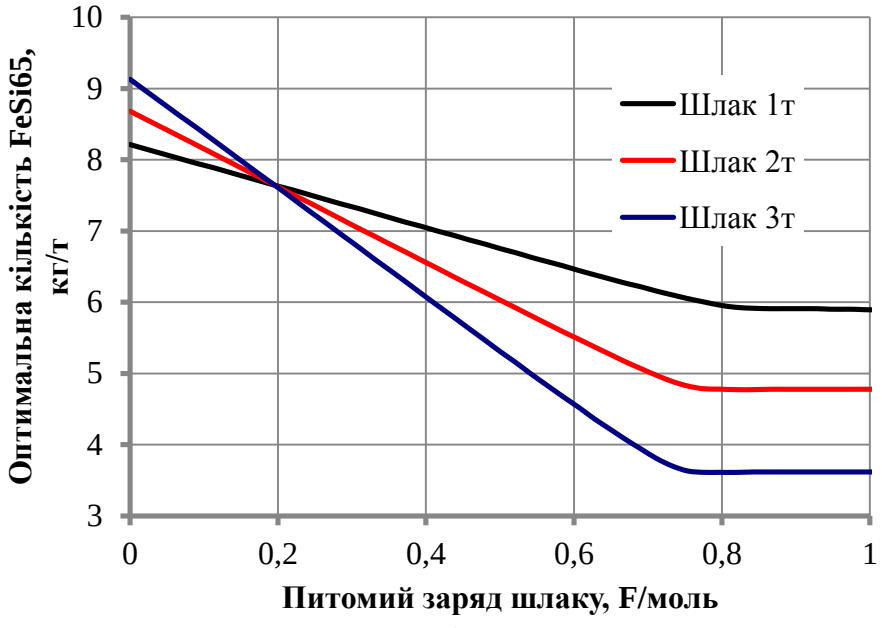
3.2 Обчислювальний експеримент

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

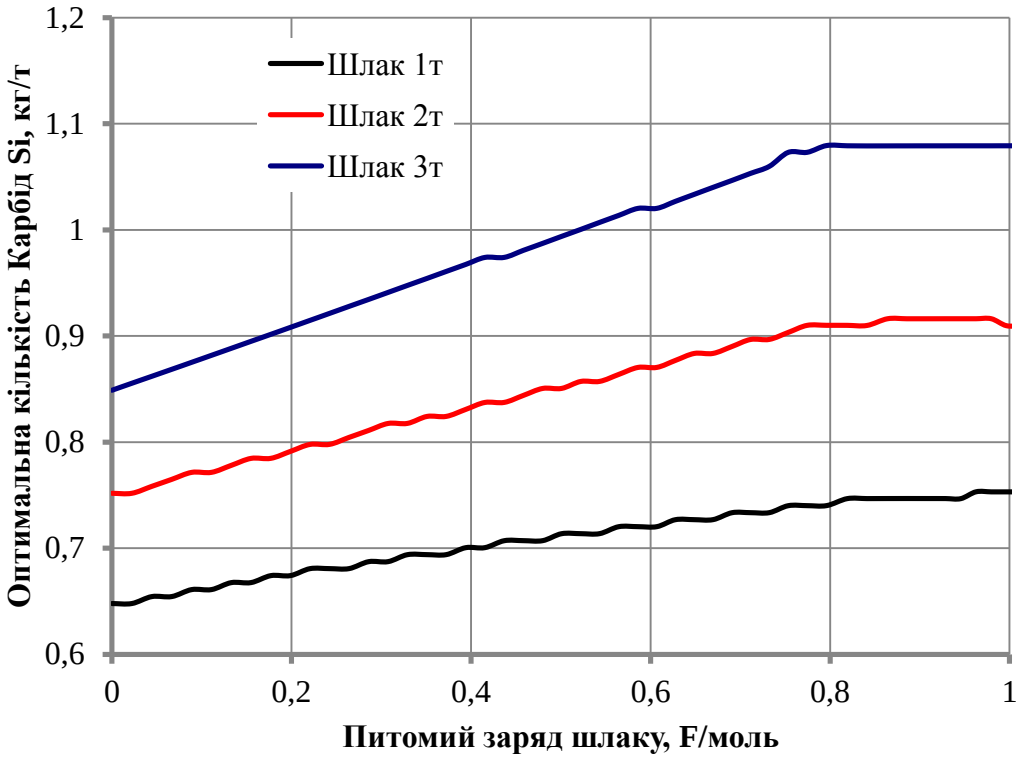
У ході експерименту було використано сталі марок 30ГС, 14ХГС, 09Г2С та 12ГС. Основним завданням було дослідити вплив питомого заряду та маси шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів, а також оцінити їх загальну вартість. На рисунках 3.3–3.6 представлено результати проведених розрахунків.



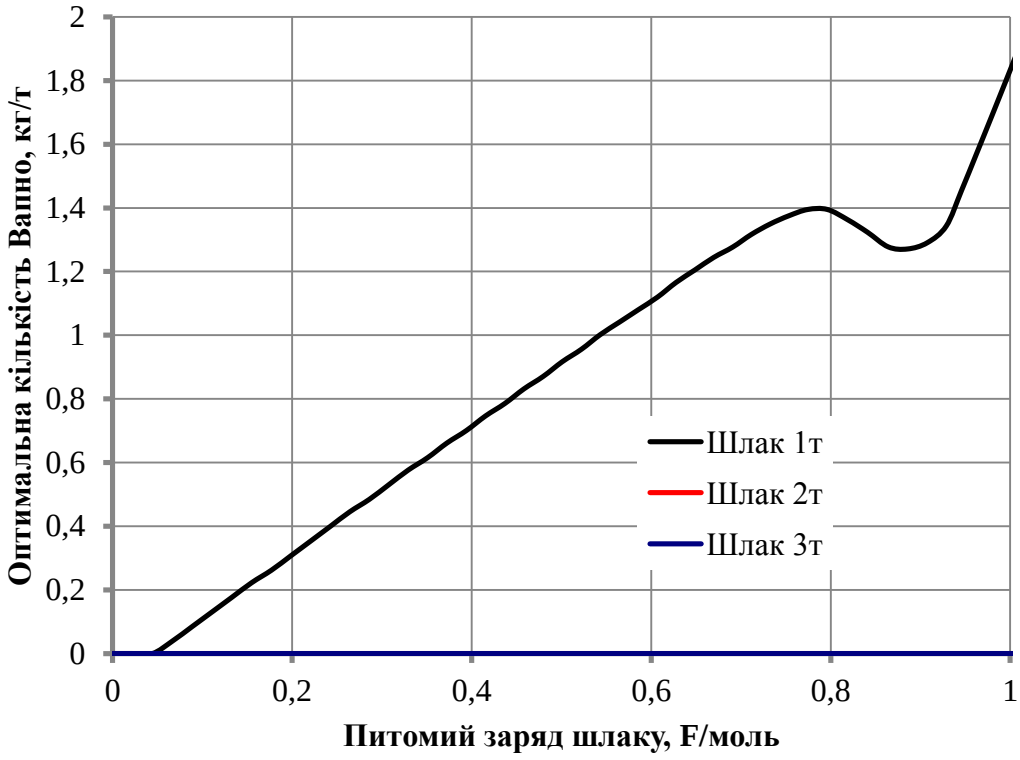
а)



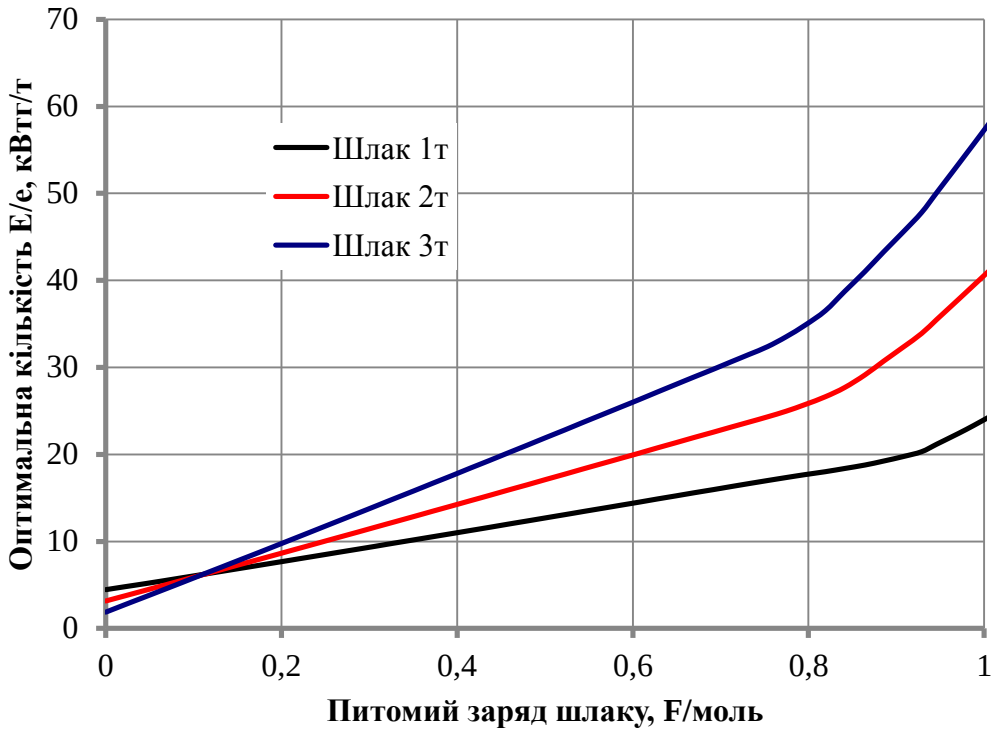
б)


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
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

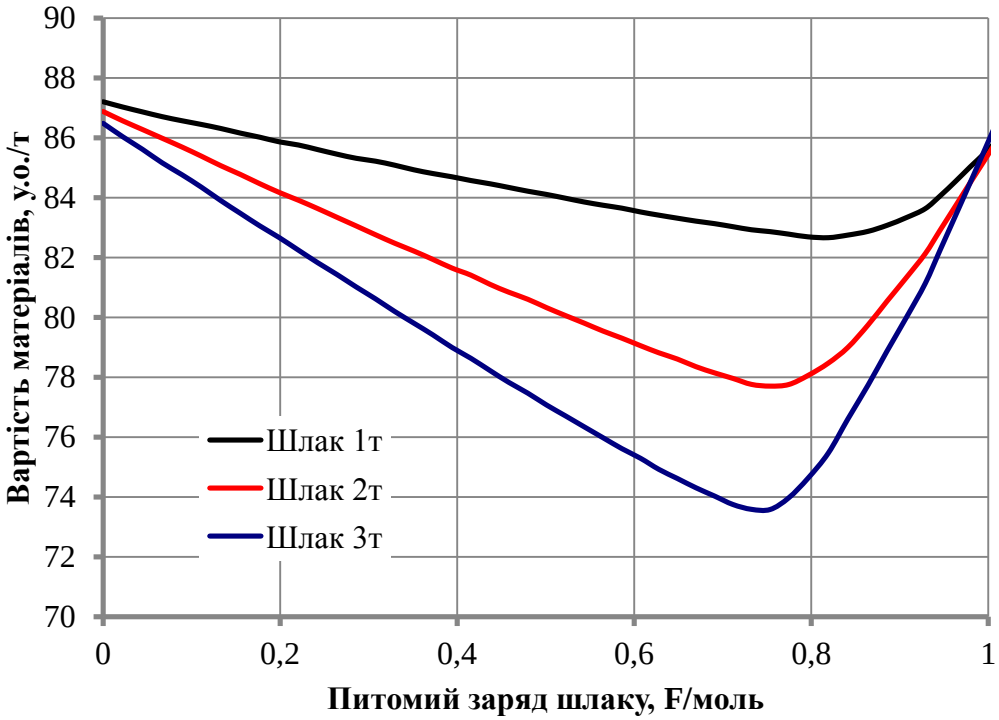
в)


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
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
Питомий заряд шлаку, F/моль

г)

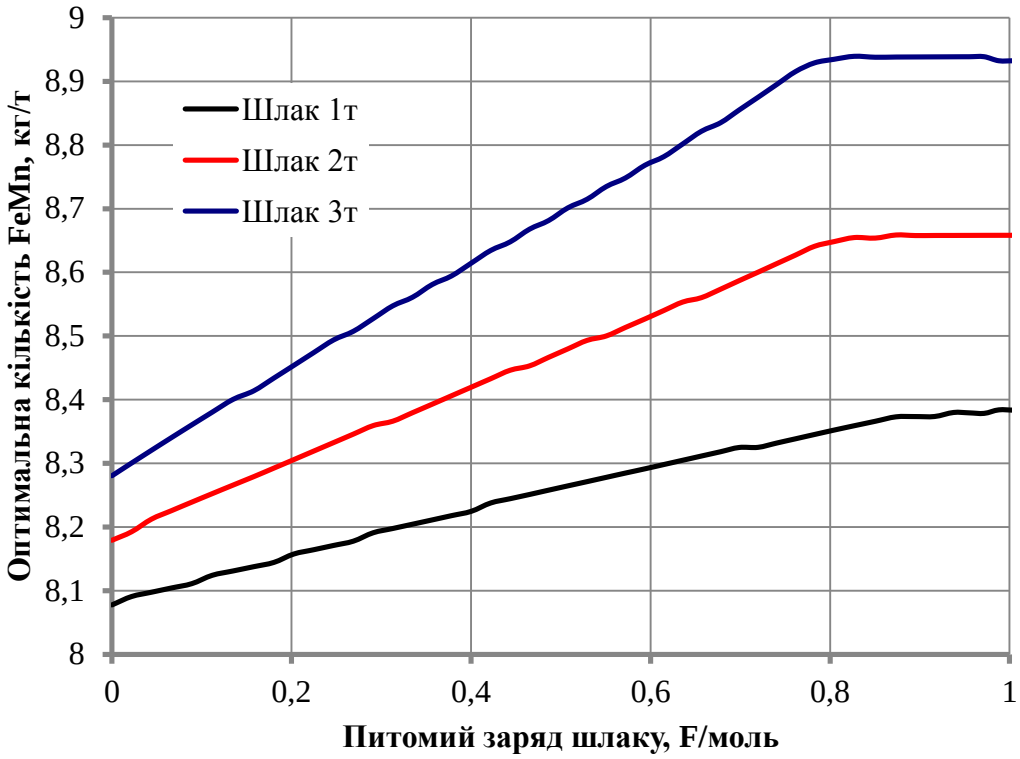


д)

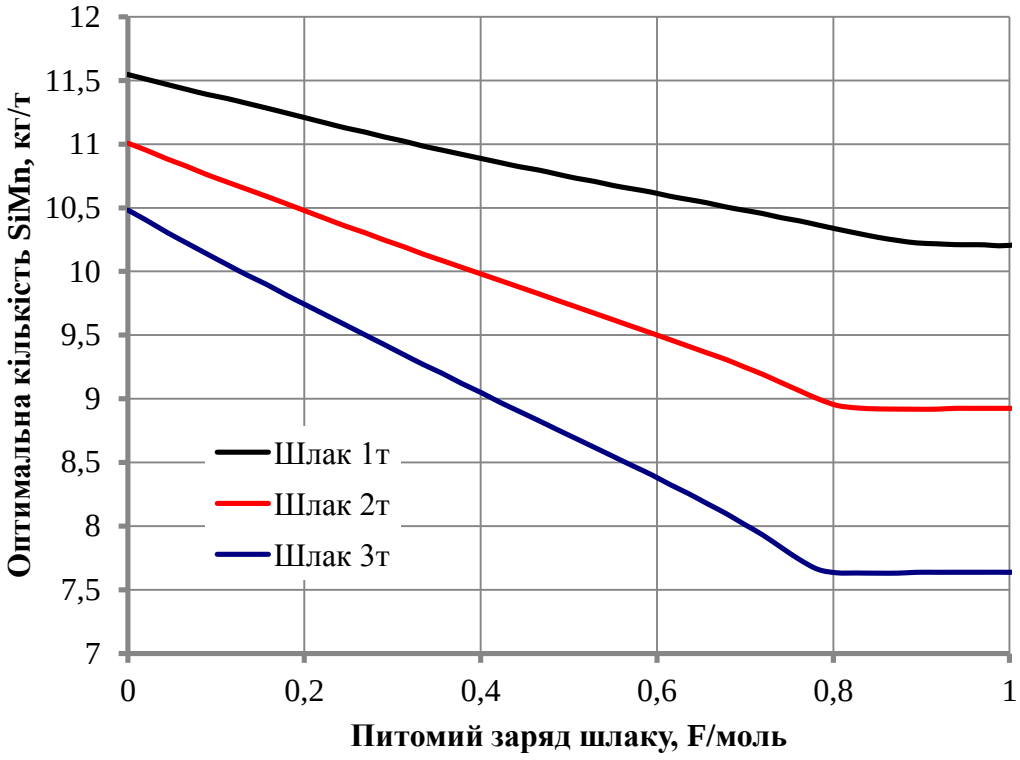


е)

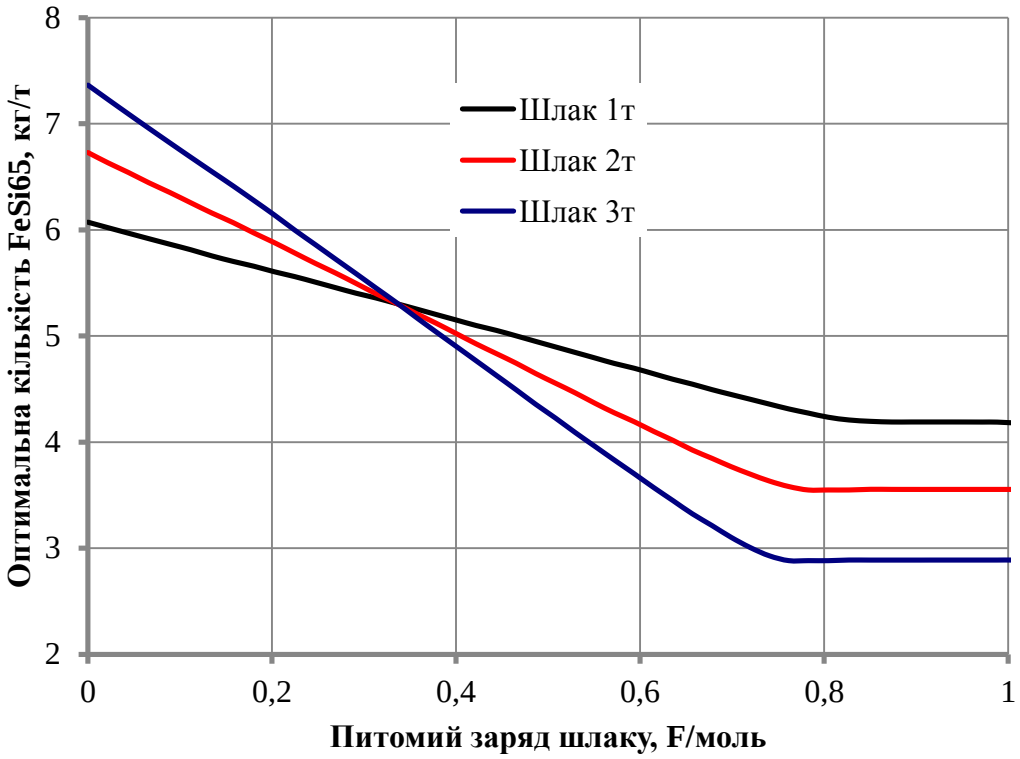
Рисунок 3.3 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 12ГС: FeMn (а); SiMn (б); FeSi65 (в); вапно (г); електроенергія (д); вартість матеріалів (е)


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

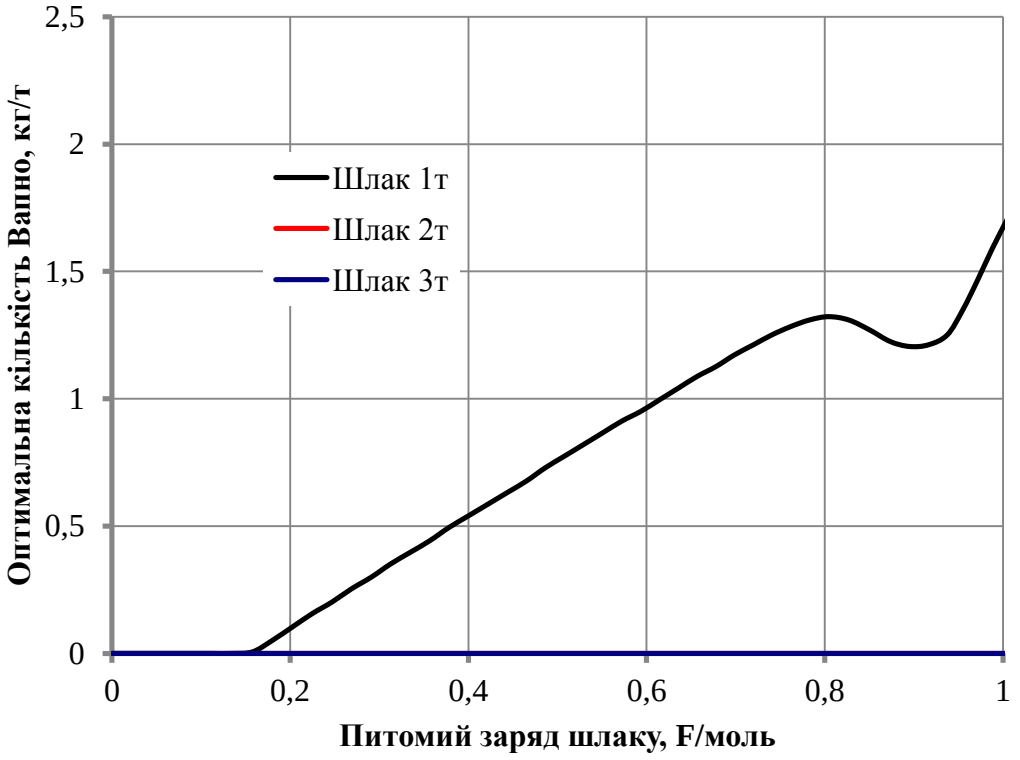
а)


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

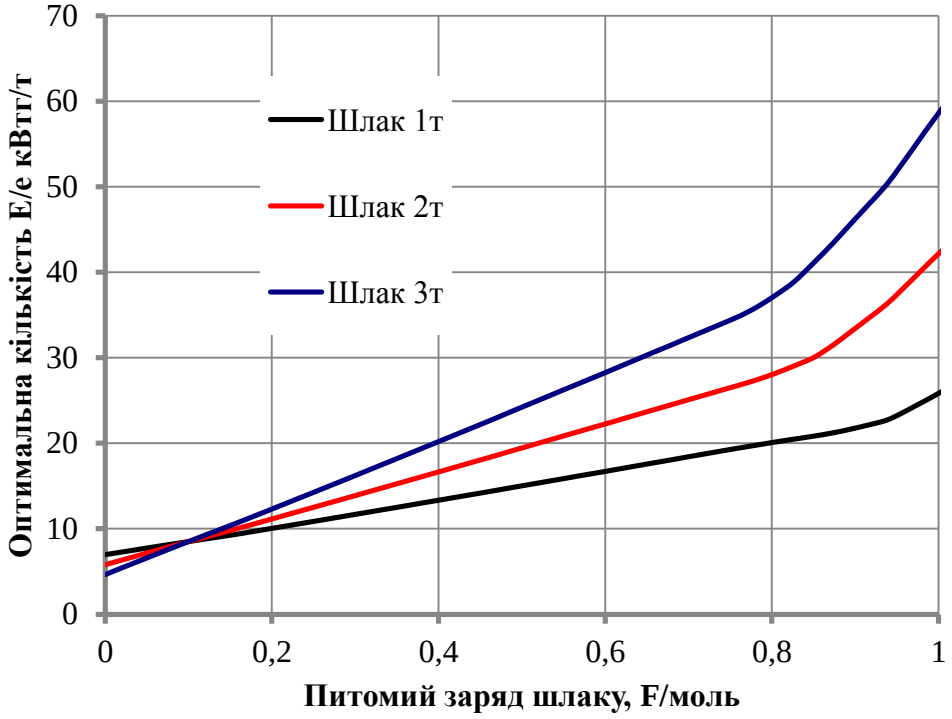
б)


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

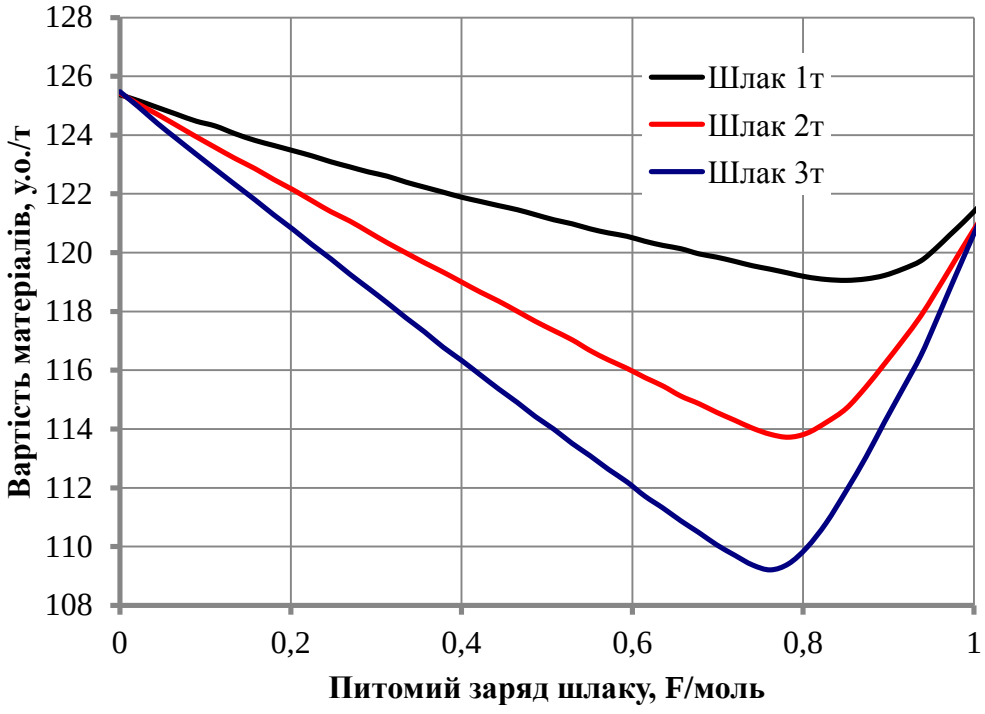
в)


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)

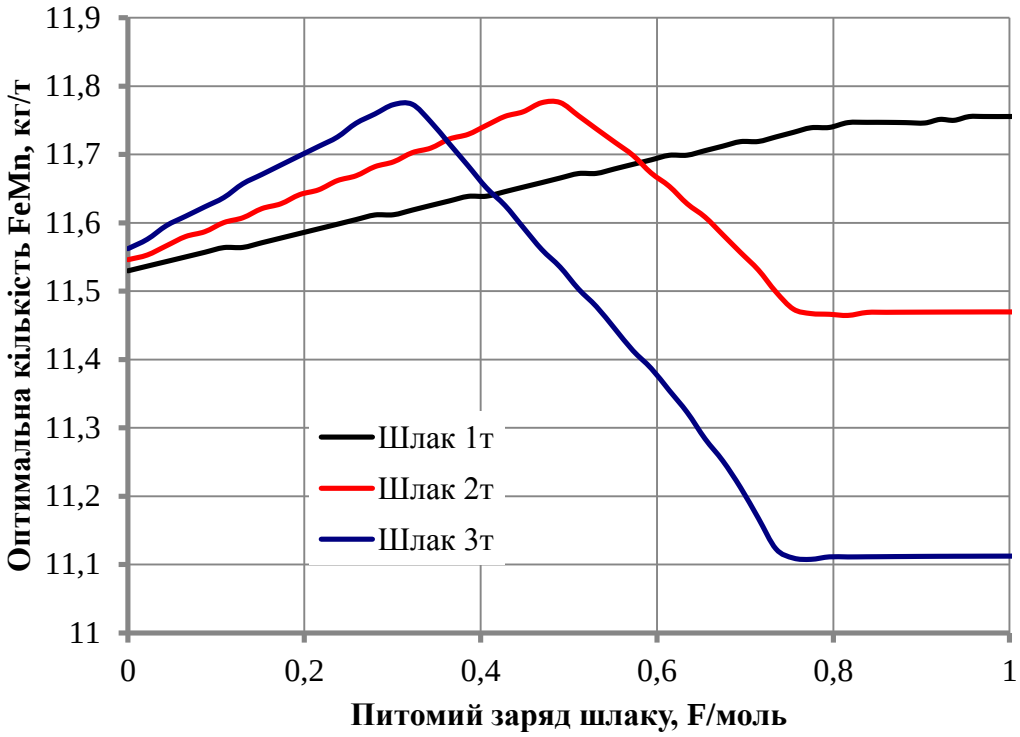


д)

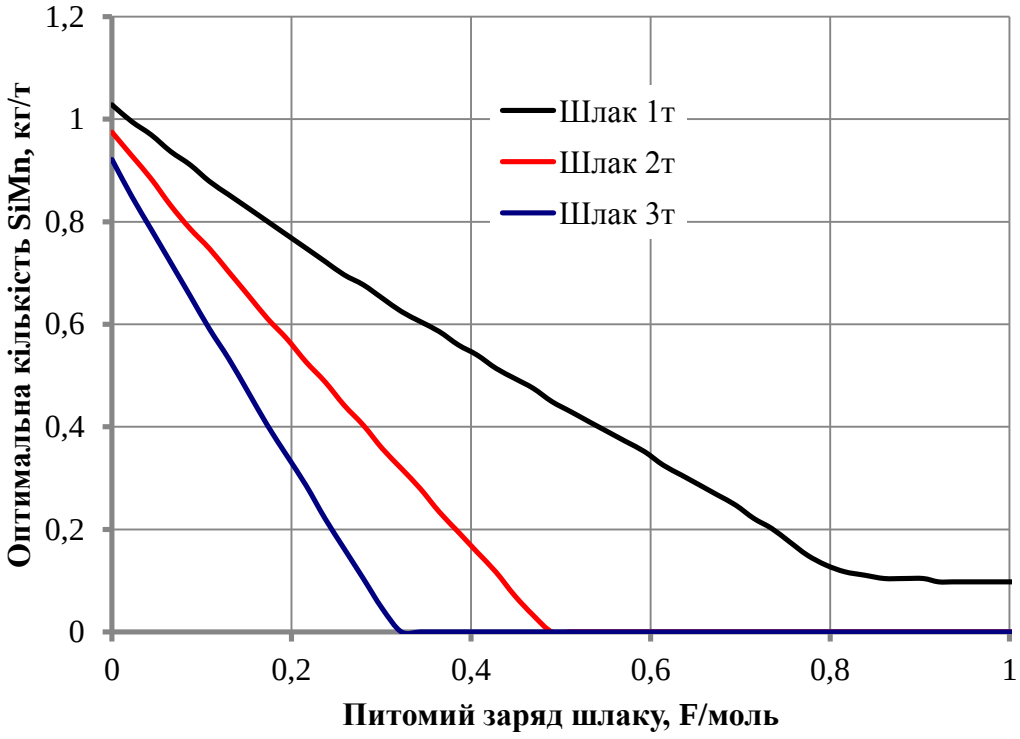


е)

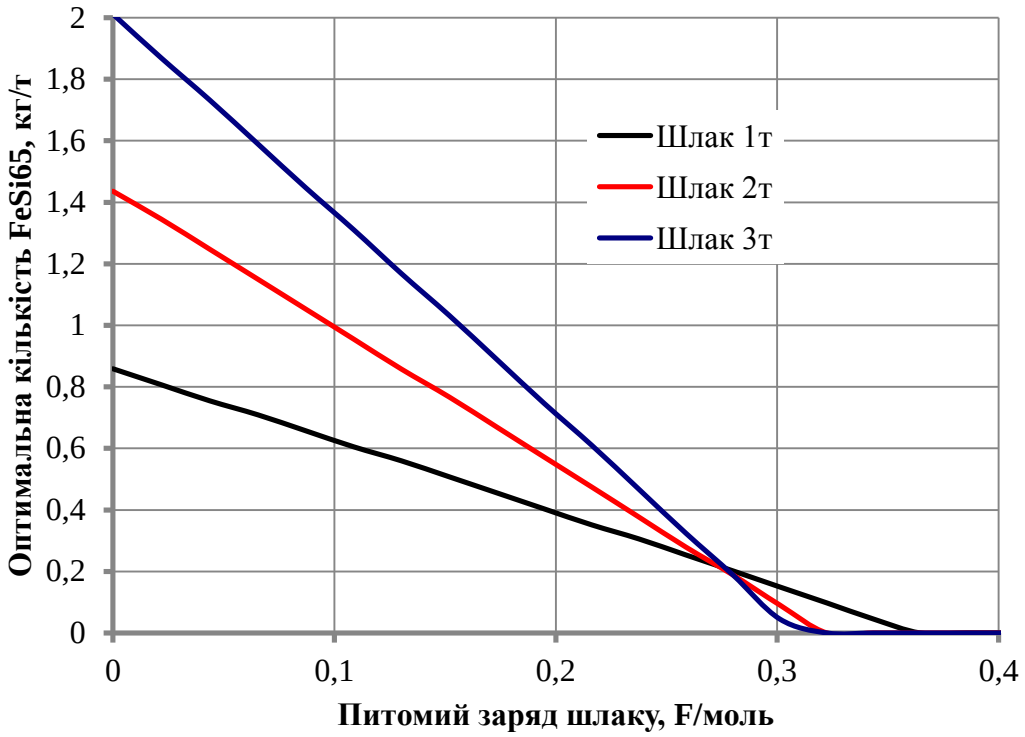
Рисунок 3.4 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 09Г2С: FeMn (а); SiMn (б); FeSi65 (в); вапно (г); електроенергія (д); вартість матеріалів (е)


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

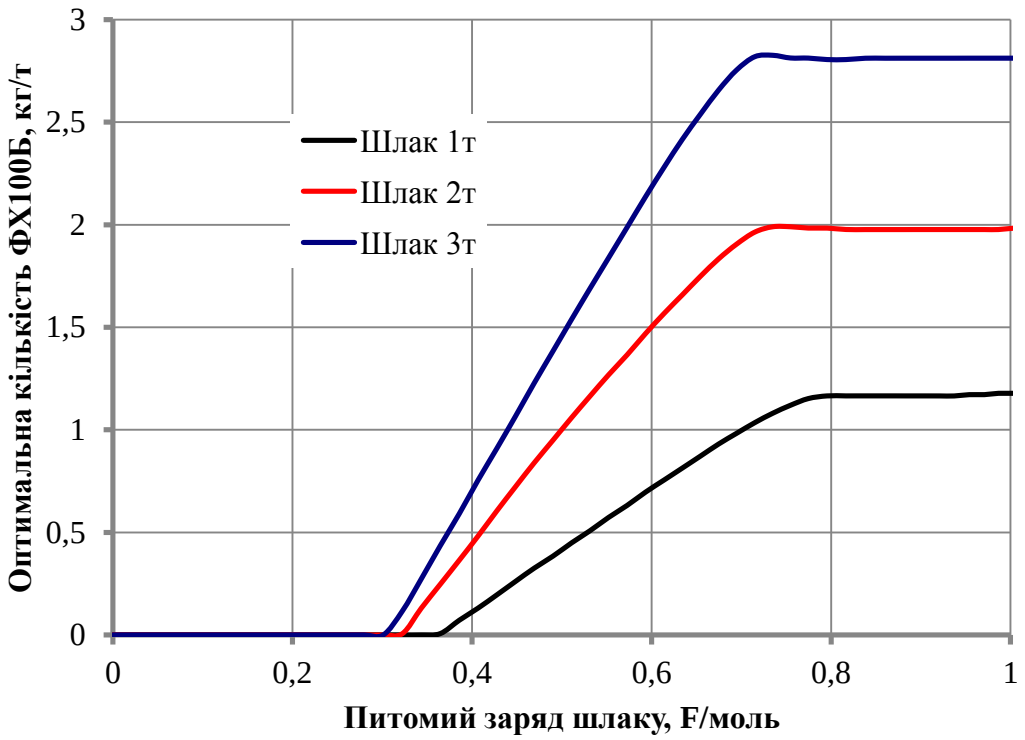
а)


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

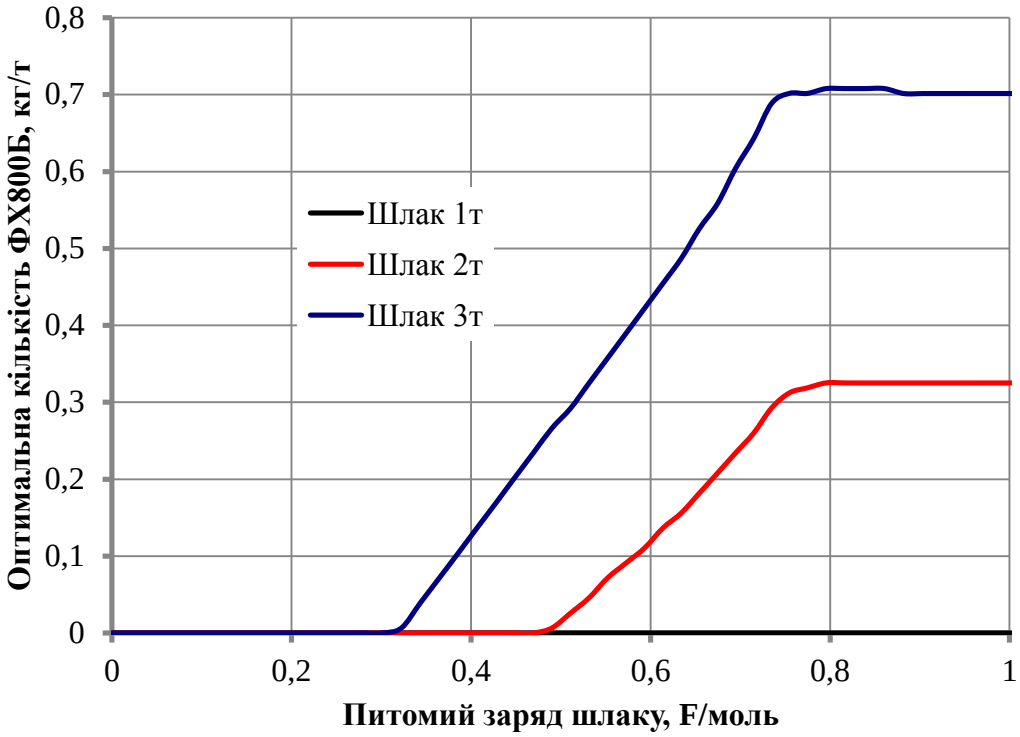
б)


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

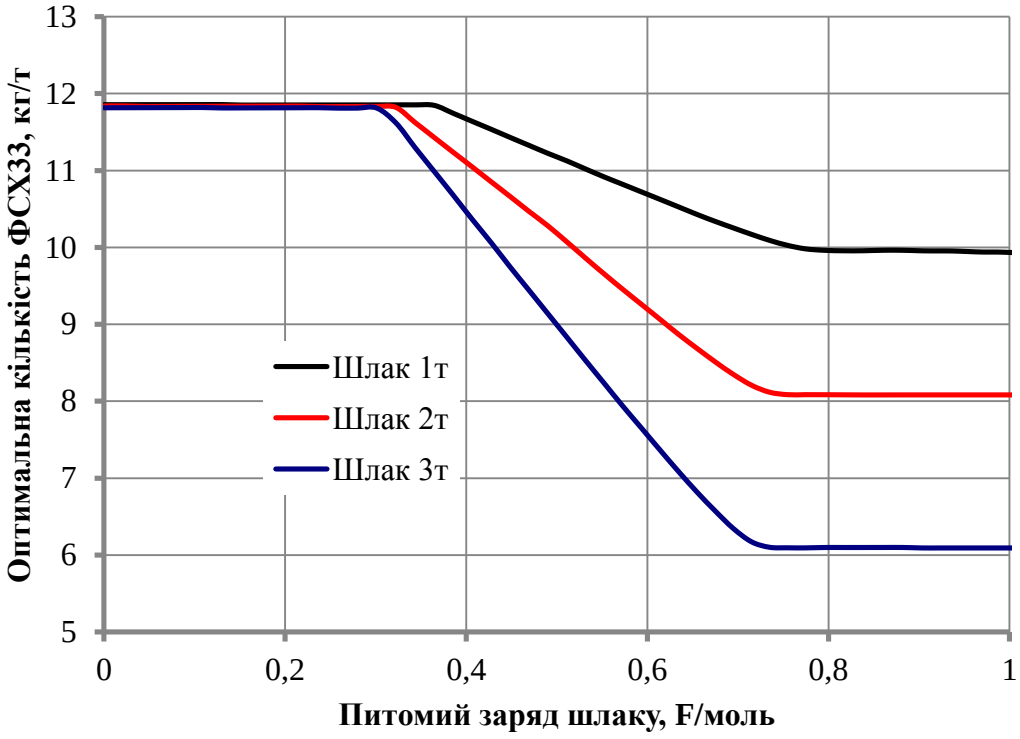
в)


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

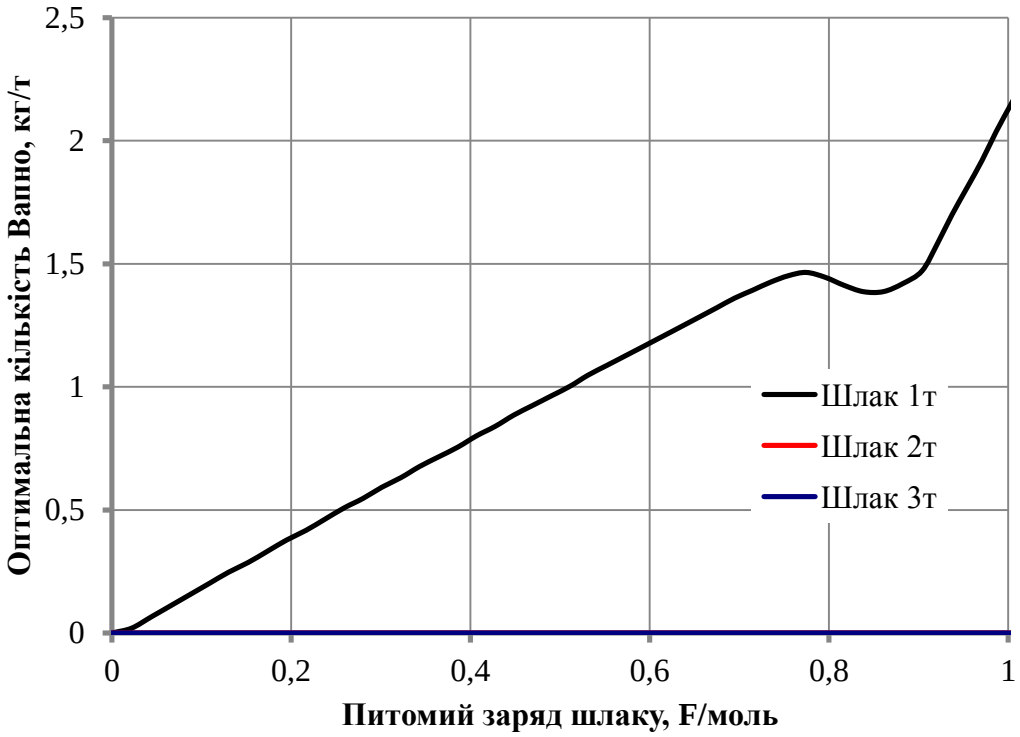
г)


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

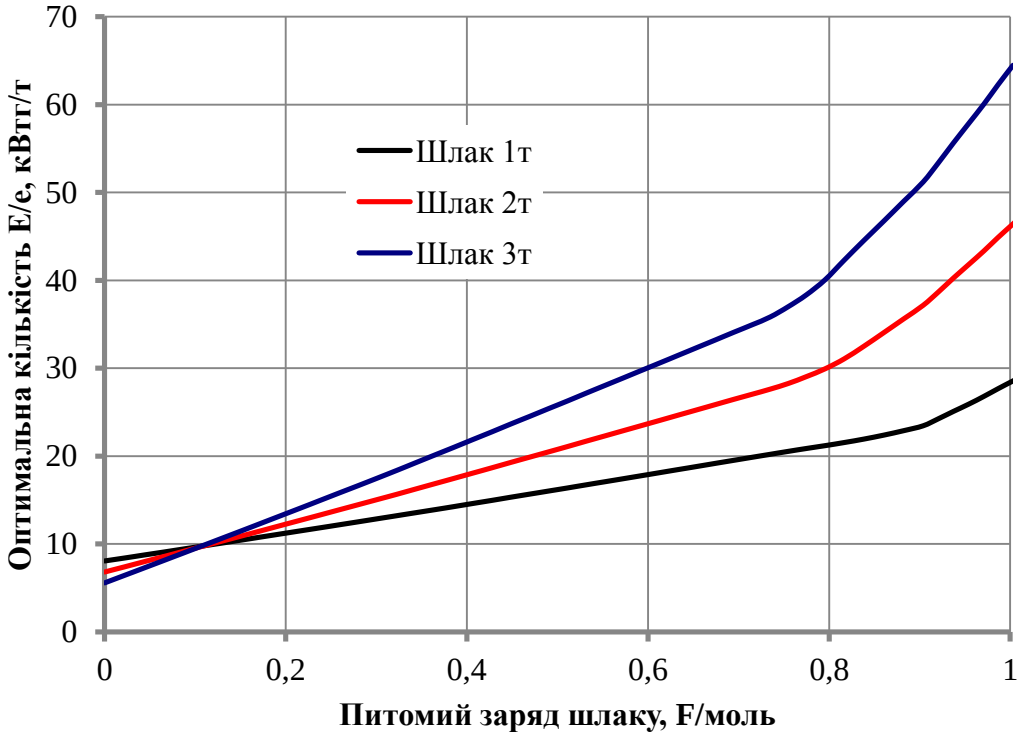
д)


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

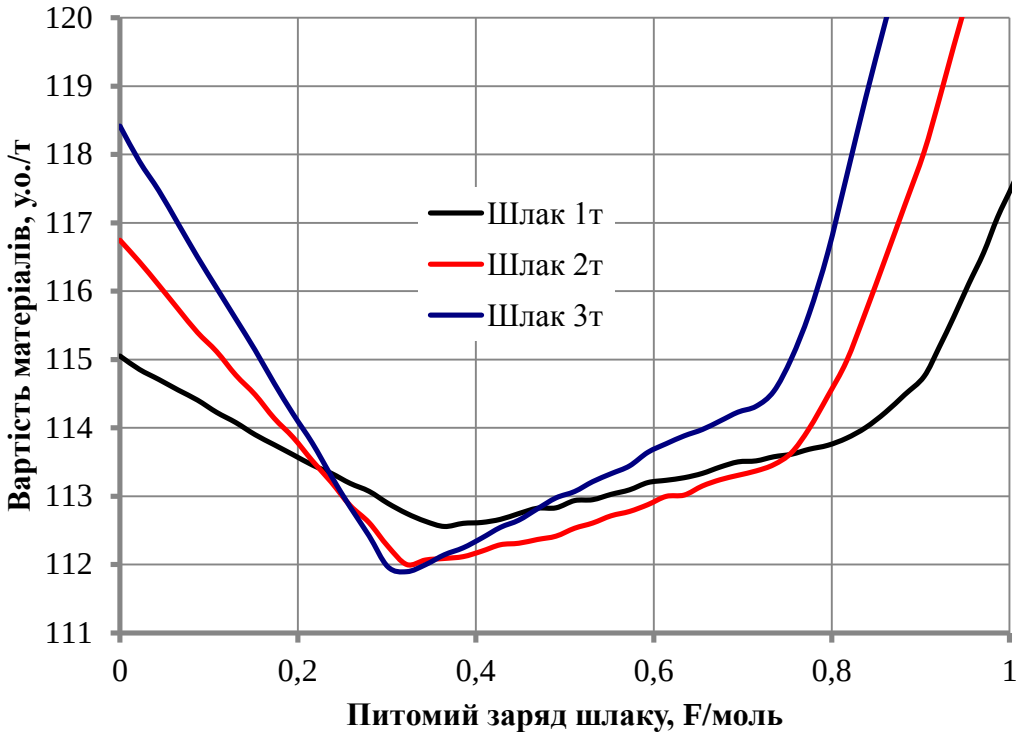
е)


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)

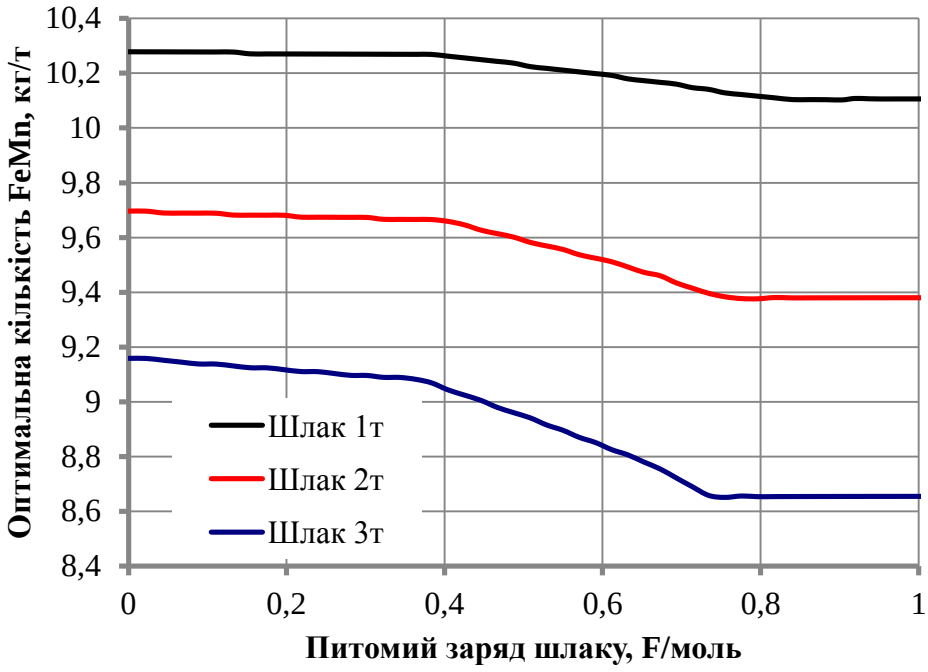

70
60
50
40
30
20
10
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Оптимальна кількість E/e, кВтг/т
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

ж)

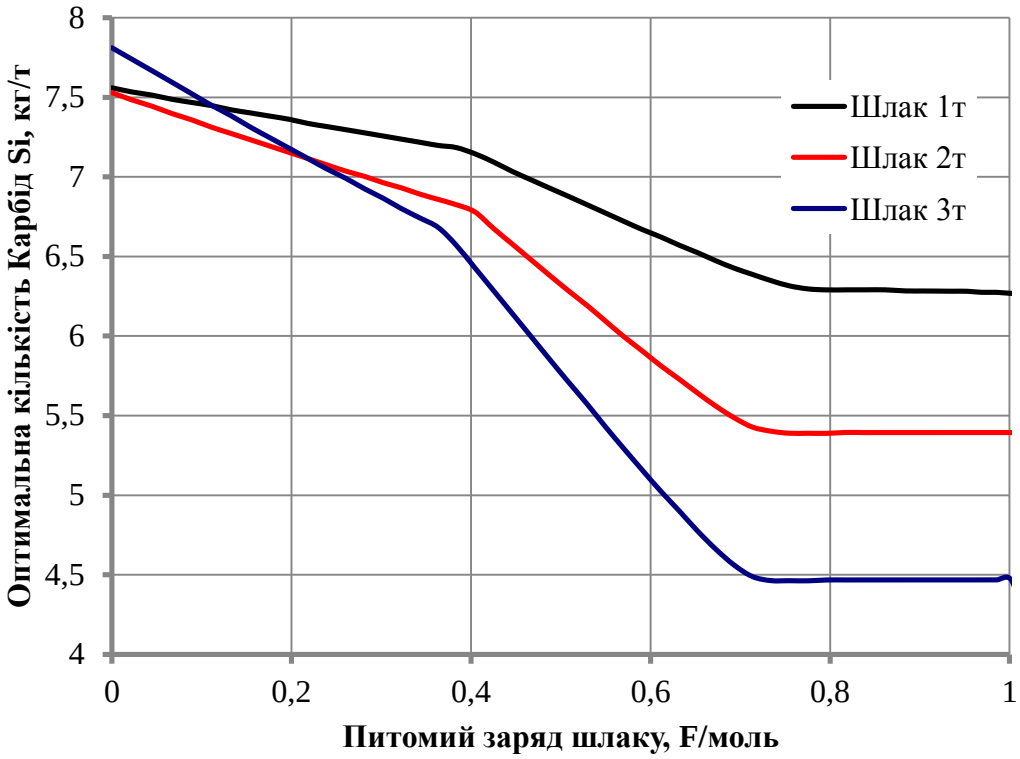


з)

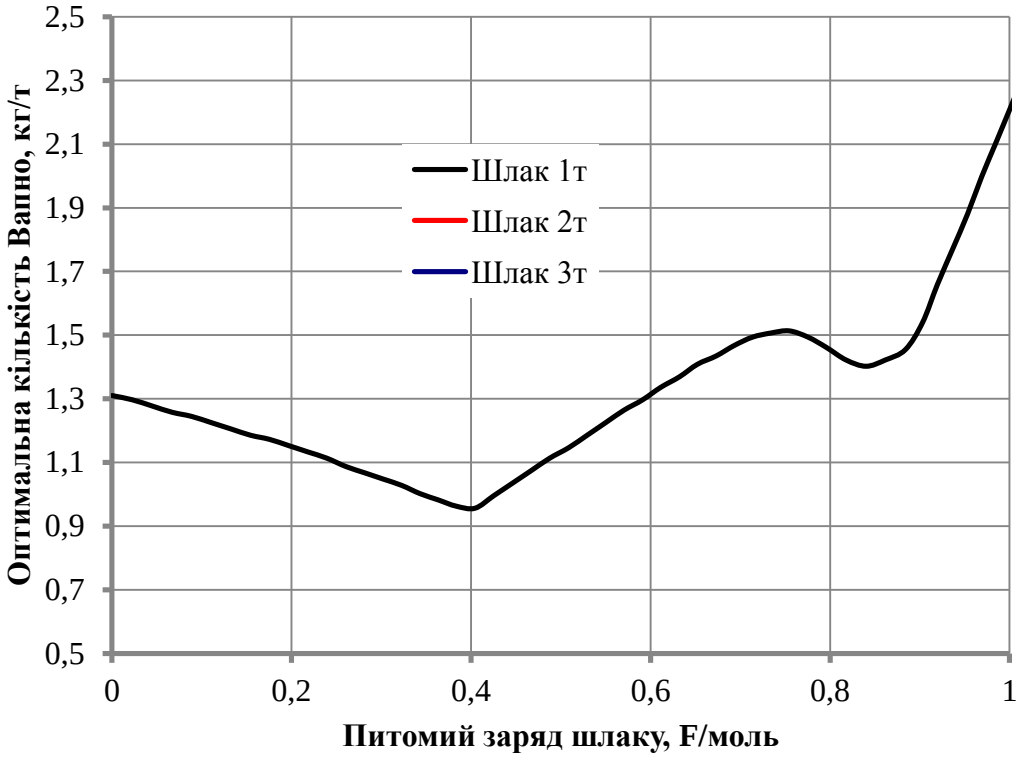
Рисунок 3.5 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 14ХГС: FeMn (а); SiMn (б); FeSi65 (в); ФХ100Б (г); ФХ800Б (д); ФСХ33 (е); вапно (є); електроенергія (ж); вартість матеріалів (з)



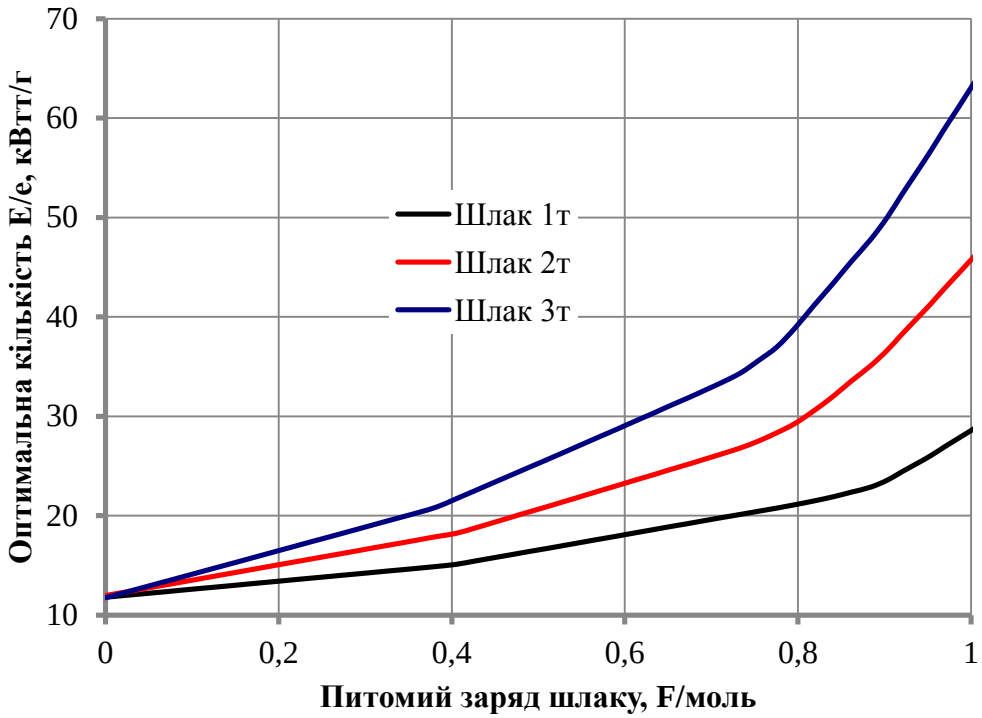
а)


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

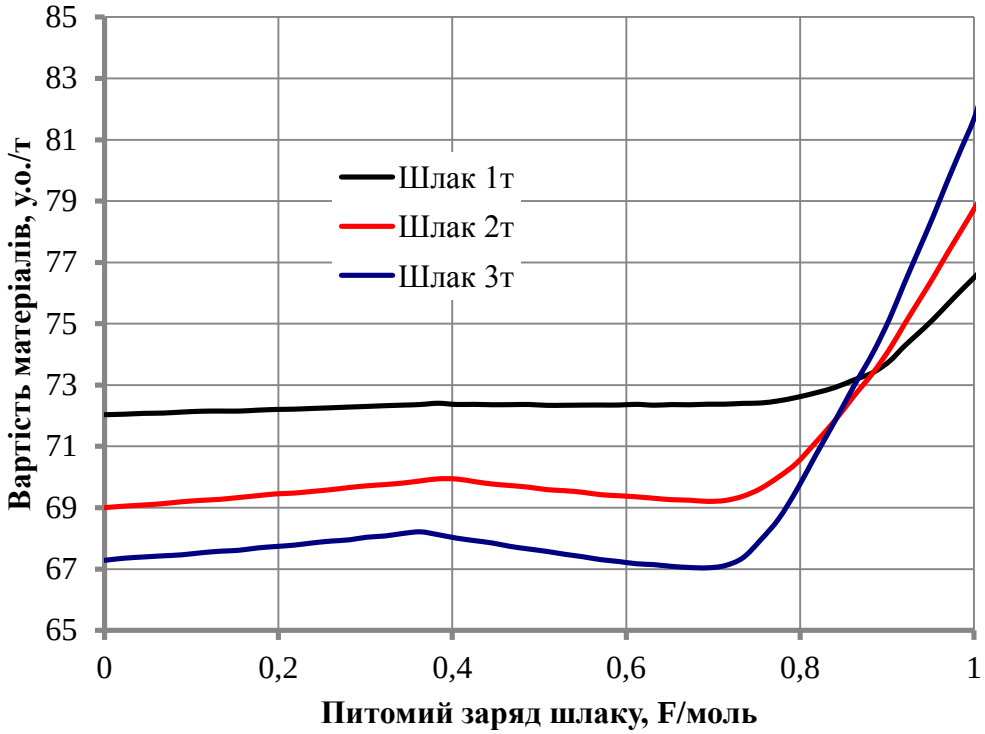
б)


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)

Рисунок 3.6 – Вплив питомого заряду шлаку на оптимальну кількість легуючих матеріалів та їх загальну вартість для обробки сталі 30ГС: FeMn (а); карбід Si (б); вапно (в); електроенергія (г); вартість матеріалів (д)

Кількість легуючих матеріалів оптимізується за допомогою симплекс-методу лінійного програмування й розрахунків диференціальних коефіцієнтів засвоєння таким чином, щоб хімічні елементи у сталі максимально наближалися до нижньої межі регламентованих значень з гарантованою відповідністю визначеним стандартним інтервалам. При цьому спостерігаються такі закономірності:

1. Зі збільшенням питомого заряду шлаку під час легування сталей марок 12ГС і 09Г2С загальна вартість матеріалів знижується, досягаючи мінімуму при значенні 0,8 Ғ/моль. Для сталі марки 14ХГС цей мінімум спостерігається при питомому заряді шлаку 0,3 Ғ/моль. Якщо заряд шлаку продовжує зростати, вартість легуючих матеріалів починає збільшуватися. Що стосується сталі марки 30ГС, мінімум вартості не фіксується за жодної маси шлаку. Водночас метод обробки металу ВЕЛР є доцільним завдяки ефективним процесам десульфурації й розкислення.

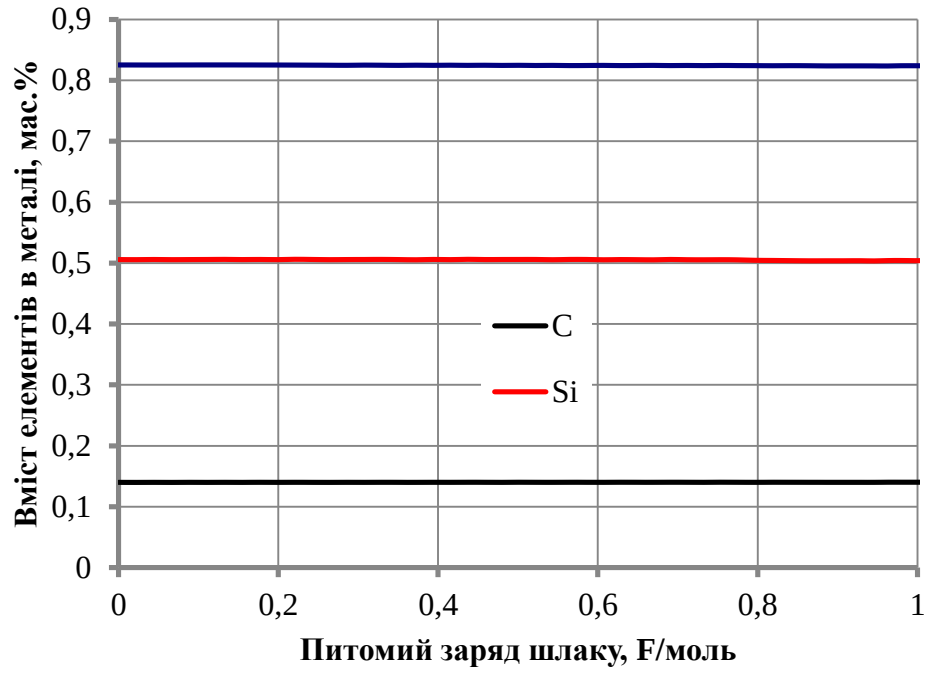
2. Споживання електроенергії постійно зростає зі збільшенням питомого заряду шлаку для всіх марок сталей. Чим більша маса шлаку, тим значніші витрати енергії. При нульовому заряді шлаку витрати на підігрів металу становлять від 3 до 14 кВт/т·год. Найбільші витрати електроенергії (110–120 кВт·год/т) фіксуються при легуванні сталі марки 14ХГС.

3. Витрати легуючих компонентів, таких як феросиліцій, силікомарганець і феросилікохром (за їх використання), зменшуються для всіх марок сталей. У процесі ВЕЛР кремній показує найбільшу здатність до відновлення, оскільки його концентрація в шлаку залишається високою. Завдяки цьому загальна вартість матеріалів знижується до певного рівня питомого заряду.

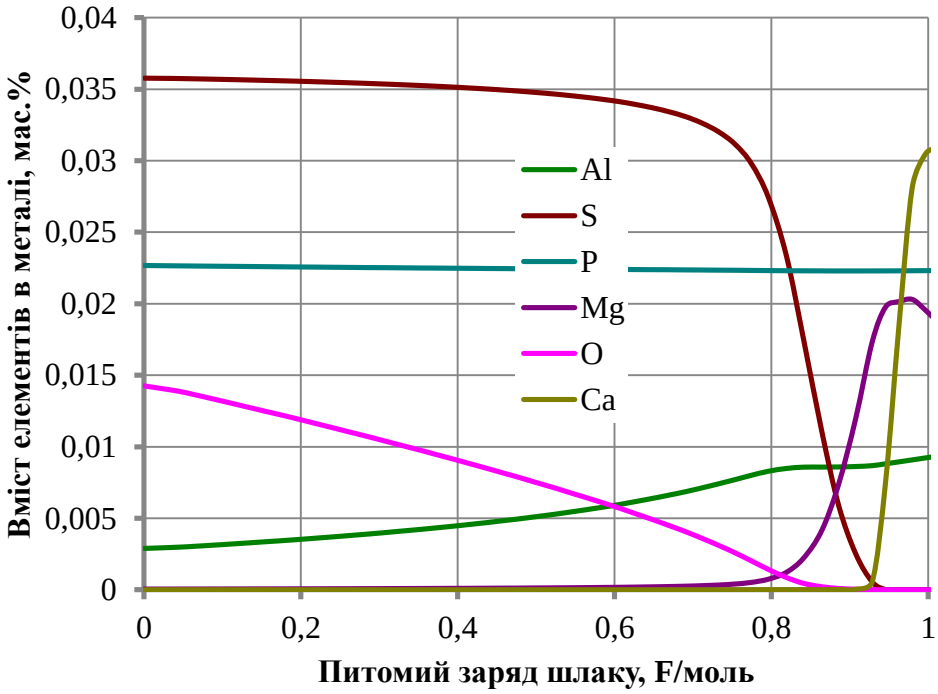
4. При збільшенні питомого заряду шлаку зростає витрата вапна, досягаючи рівня 1,5–2,0 кг/т. Це відбувається лише у випадках застосування однієї тонни початкового шлаку для компенсації зменшення його маси в ході процесу ВЕЛР.

3.2.2 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у металі

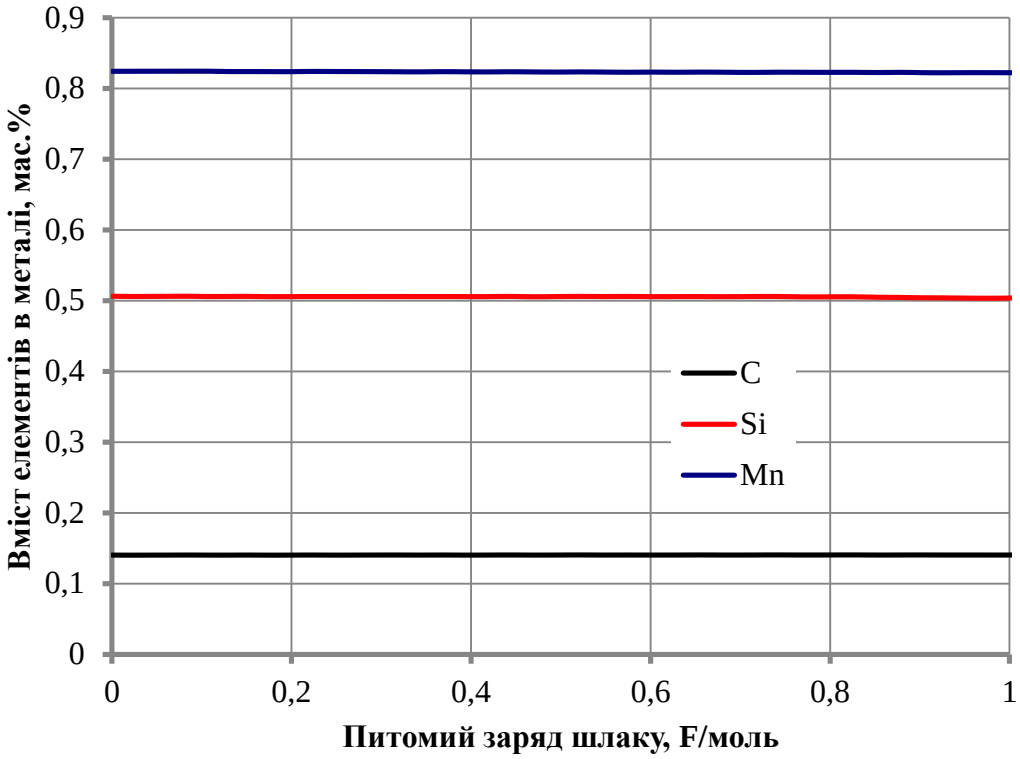
В експерименті застосовували сталі марок 30ГС, 14ХГС, 09Г2С та 12ГС. Основну увагу приділили вивченню впливу питомого заряду та початкової маси шлаку на хімічний склад сталі. Результати відповідних розрахунків відображено на рисунках 3.7–3.15.



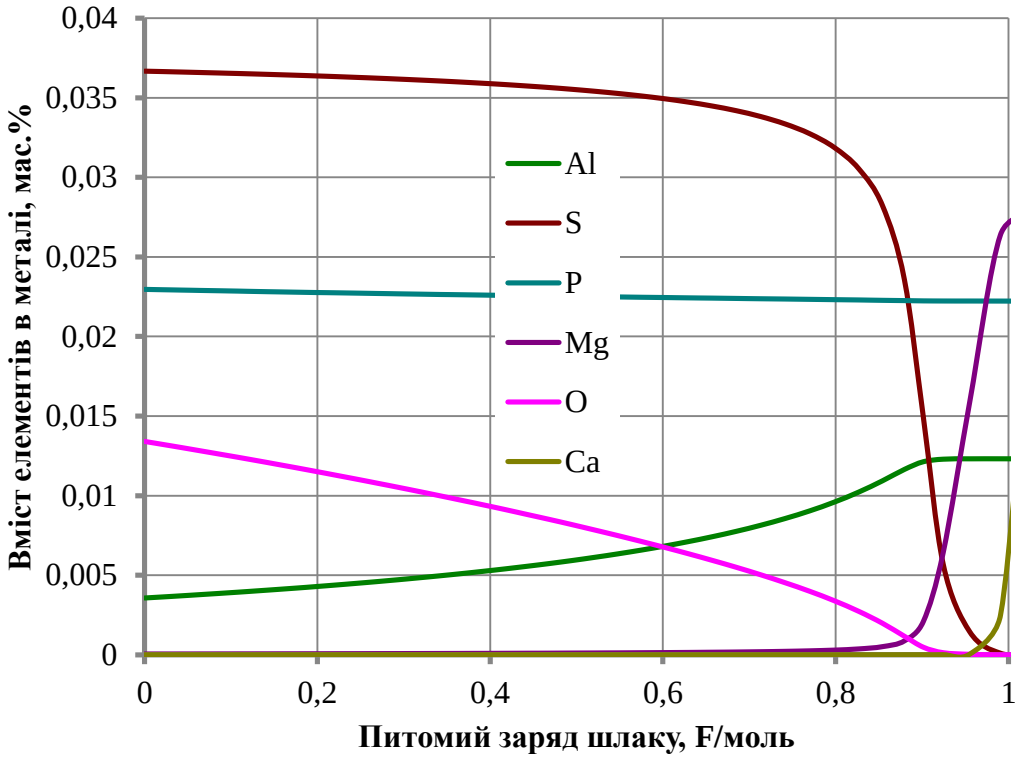
а)



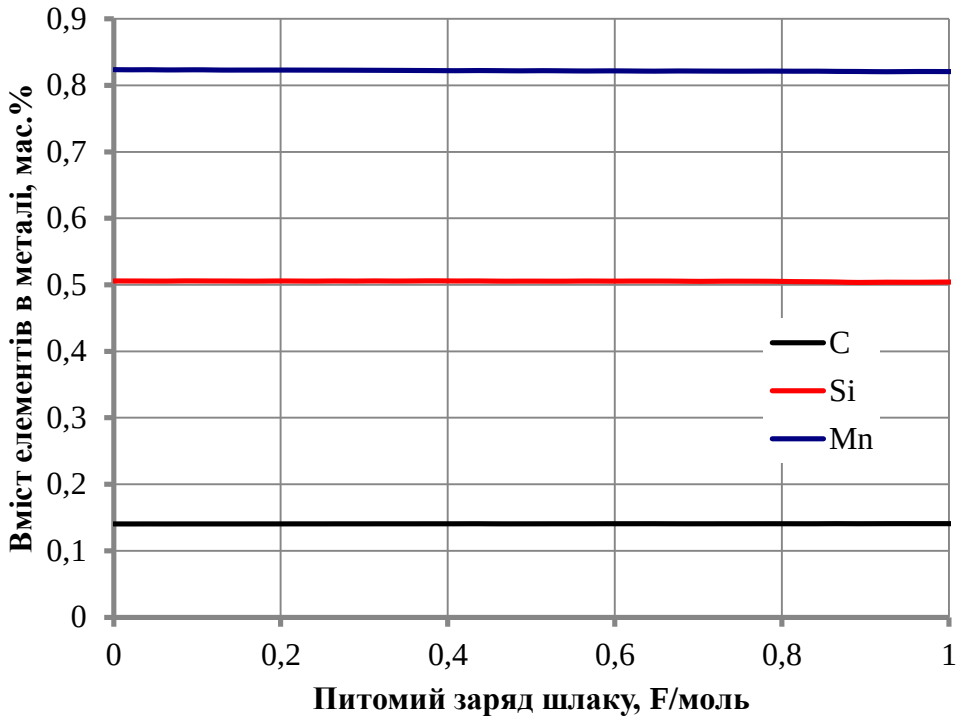
б)


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

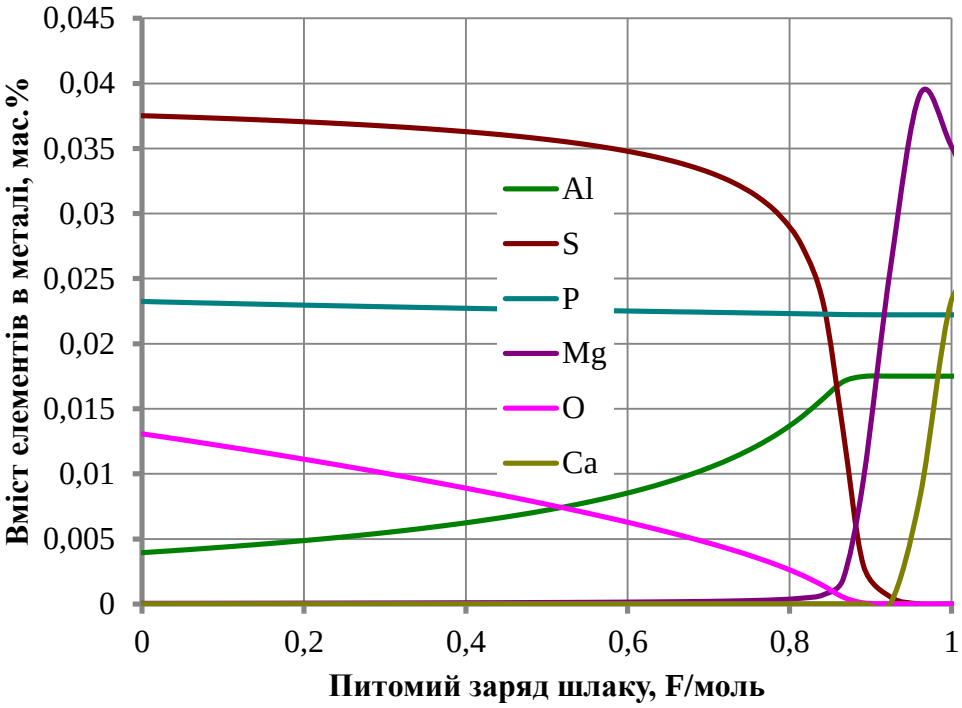
в)


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)

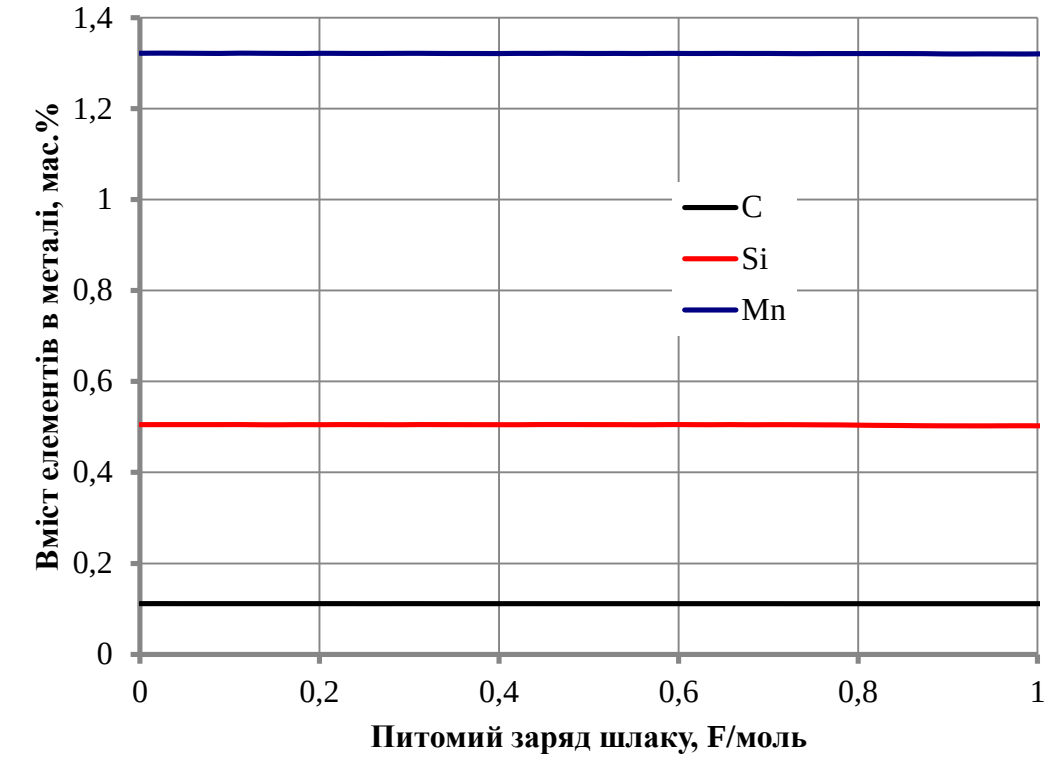


д)

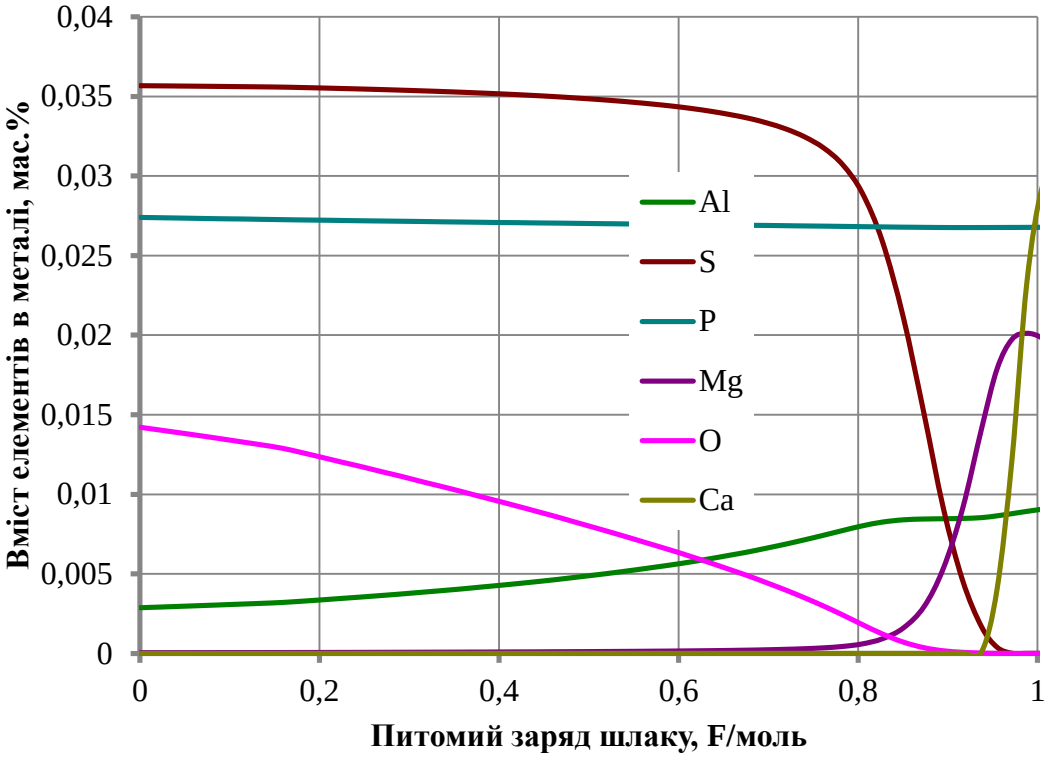


е)

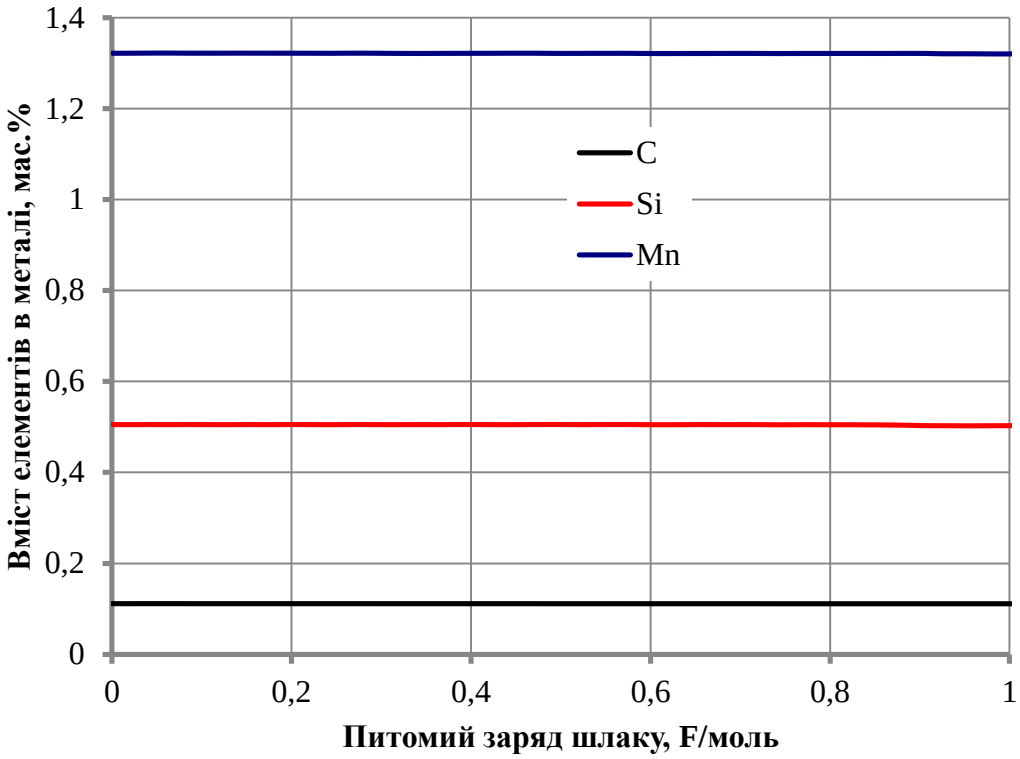
Рисунок 3.7 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 12ГС:
вуглець, марганець, кремній (а, в, д); сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


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

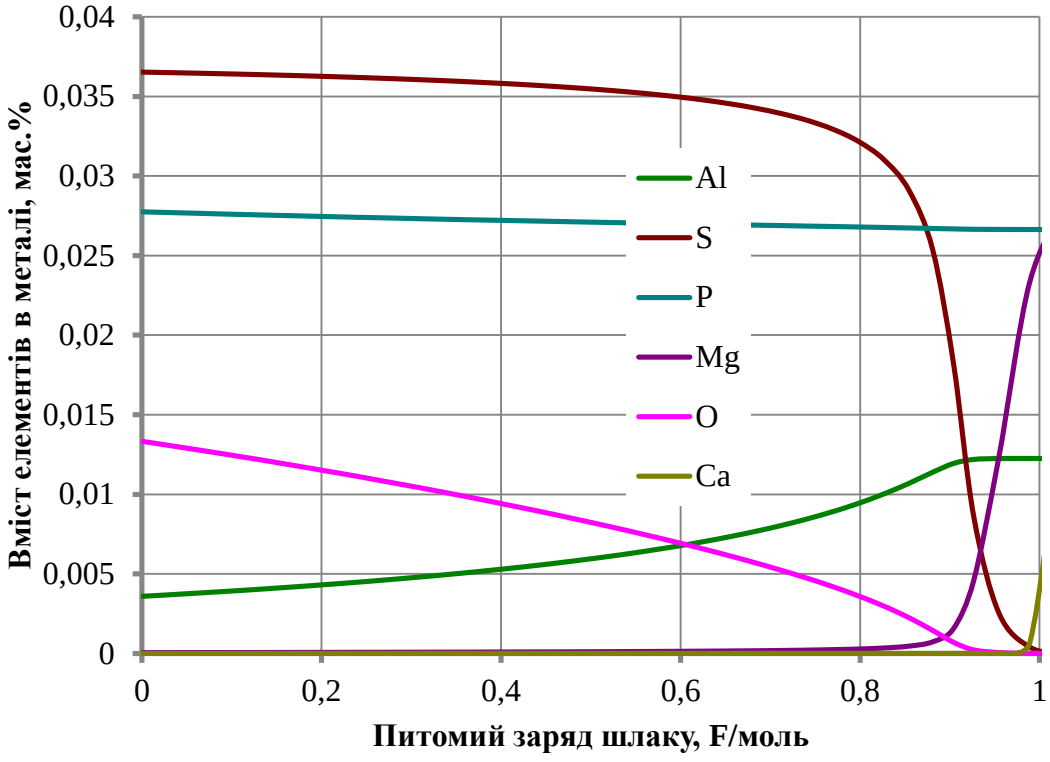
а)


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

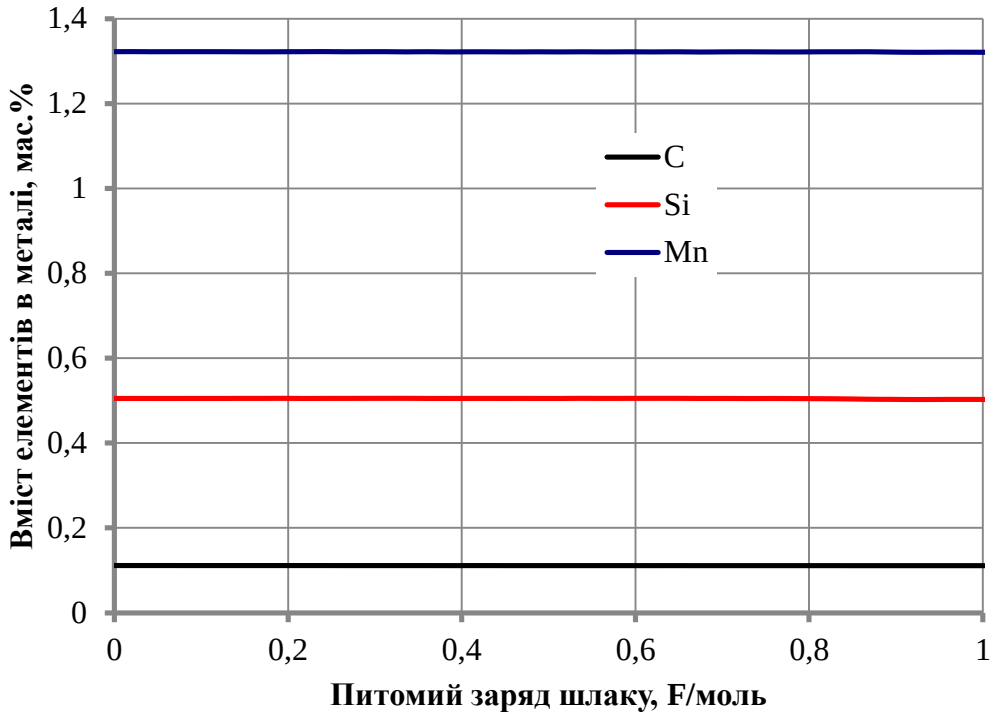
б)


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

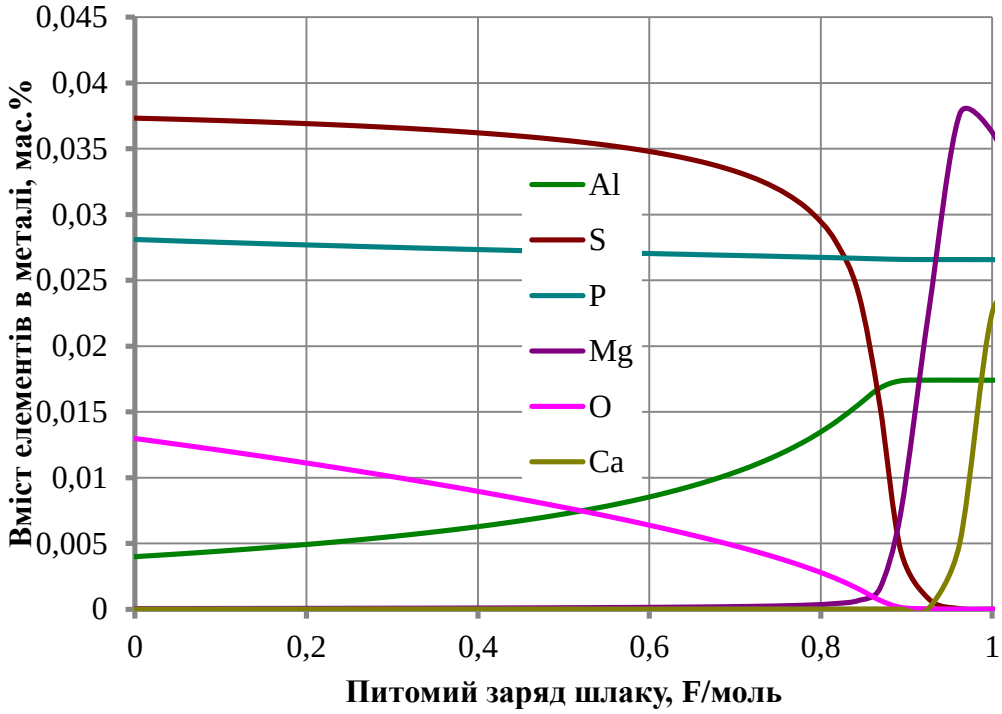
в)


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)



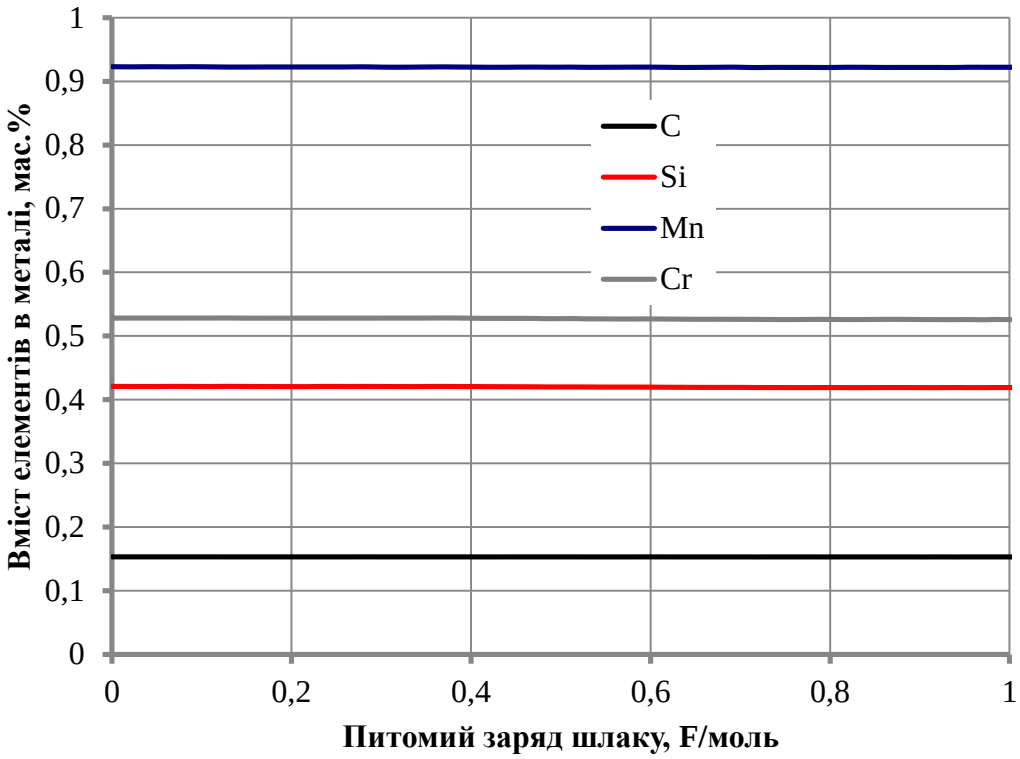
д)



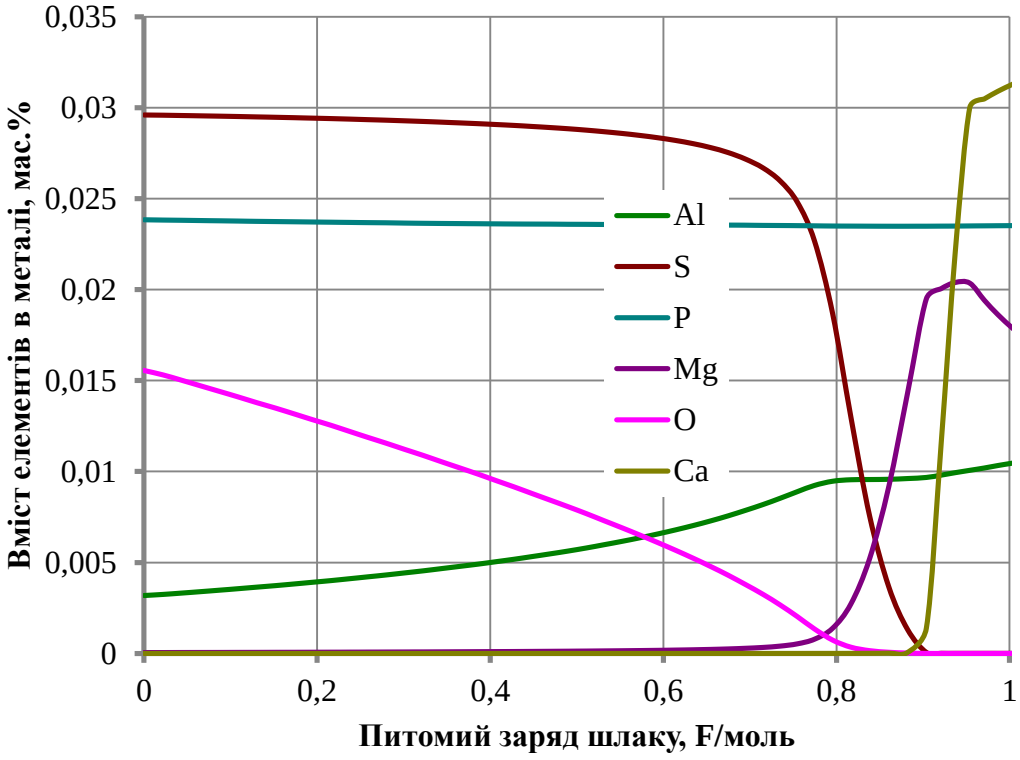
е)

Рисунок 3.8 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 09Г2С:

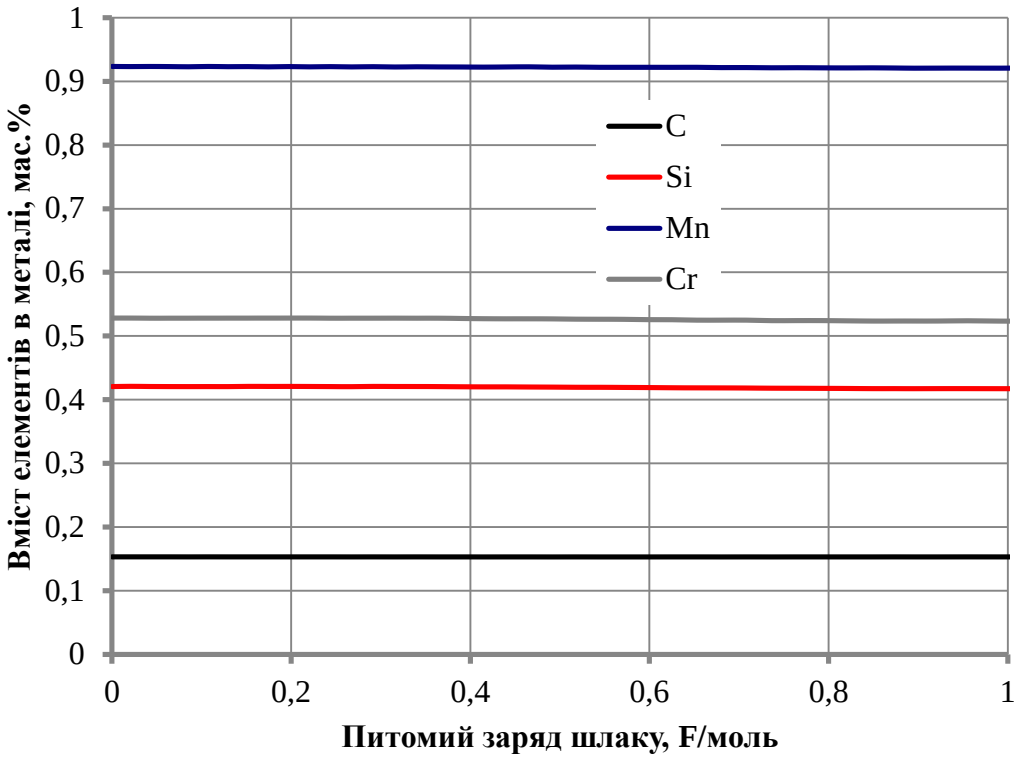
вуглець, марганець, кремній (а, в, д); сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


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

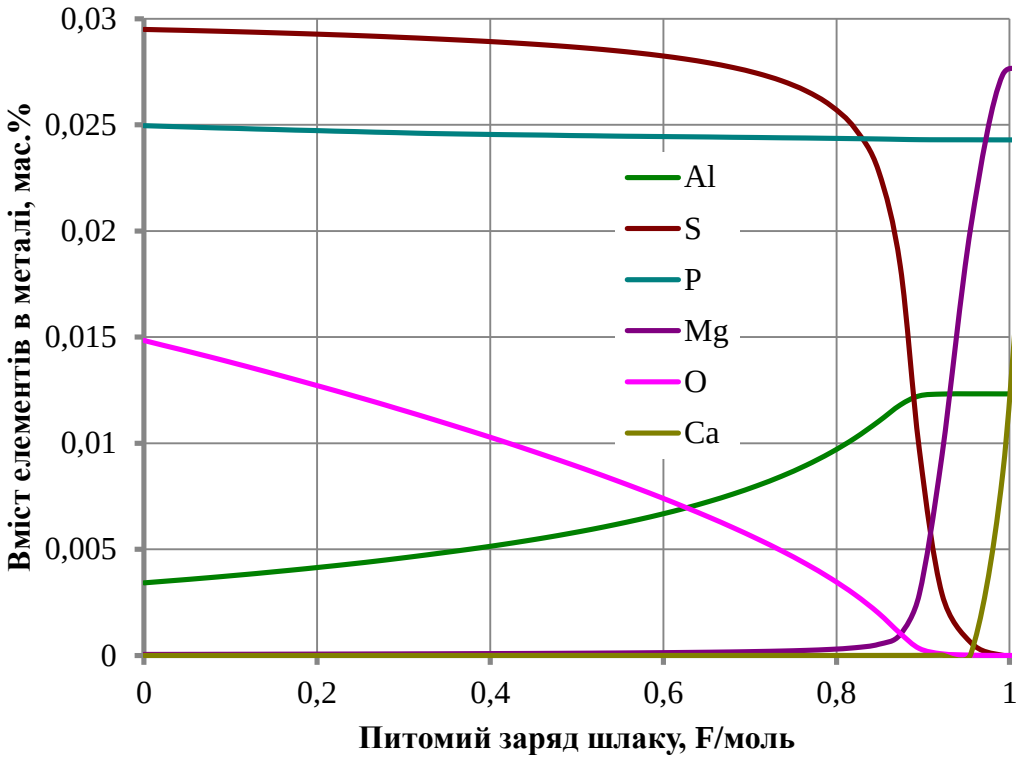
а)


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

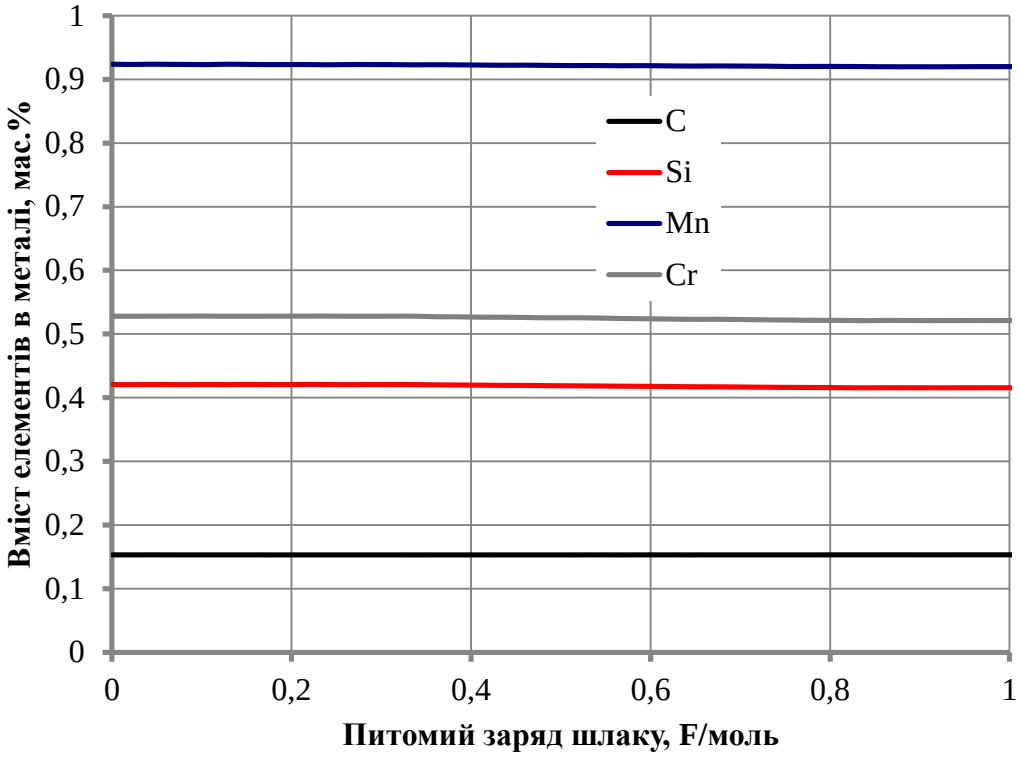
б)


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

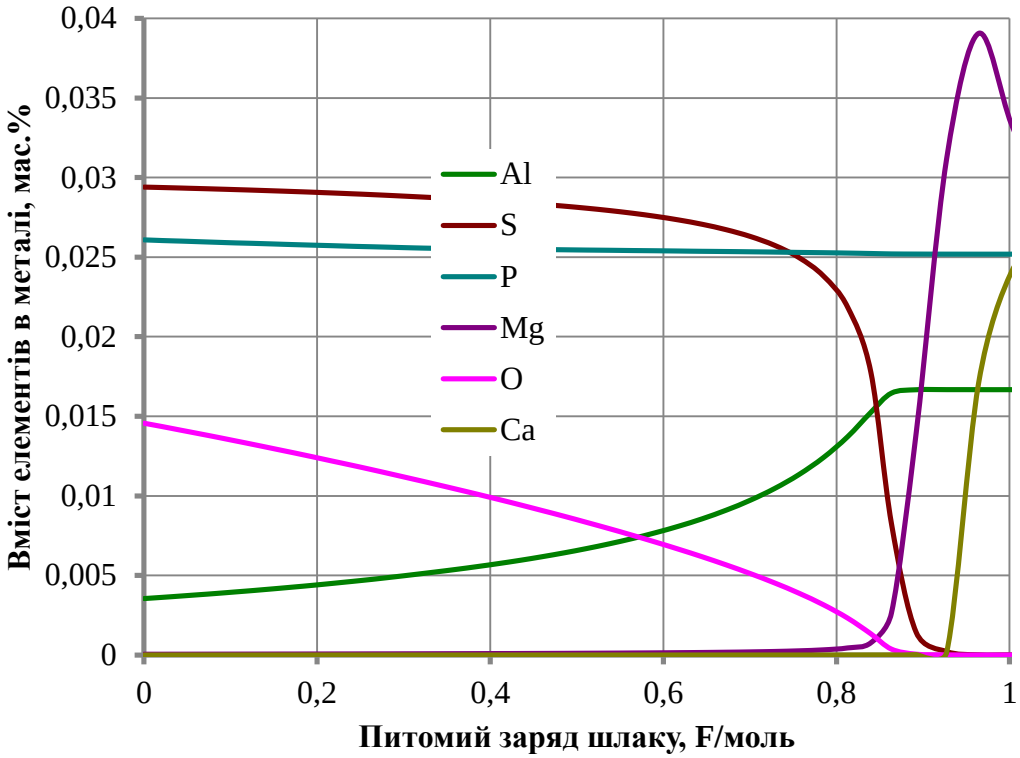
в)


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)

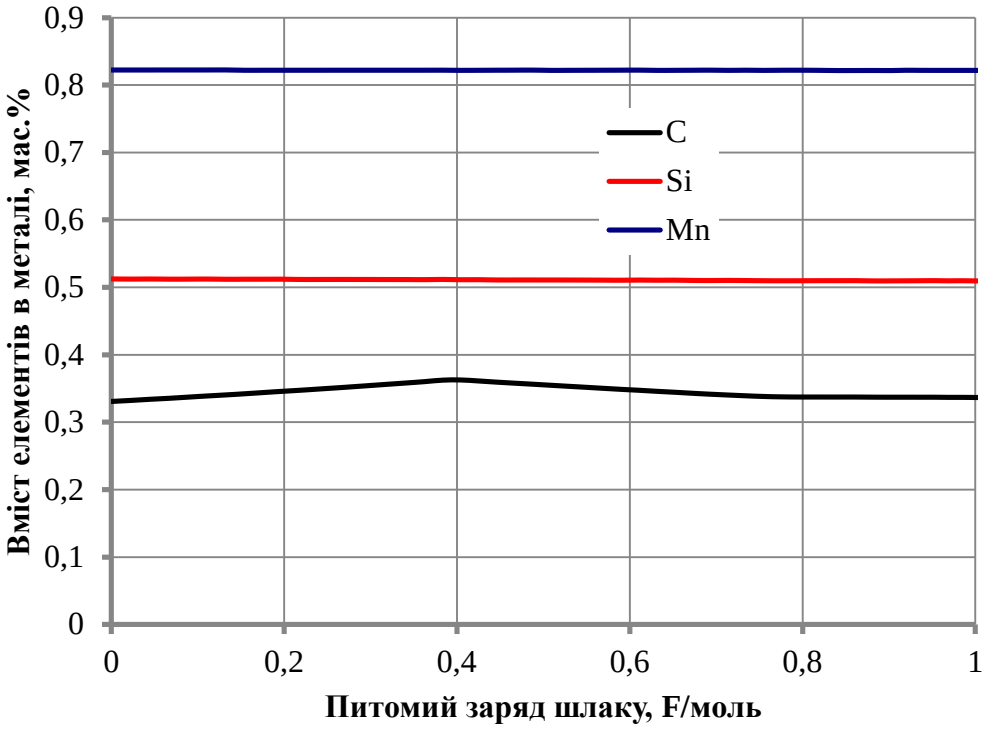


д)

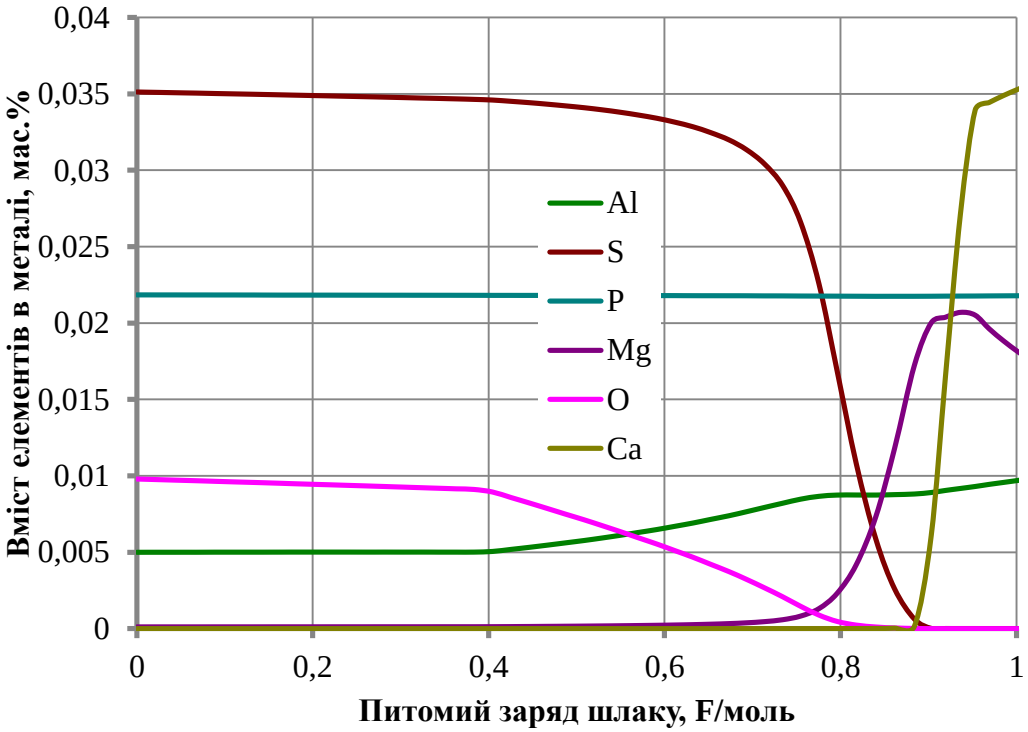


е)

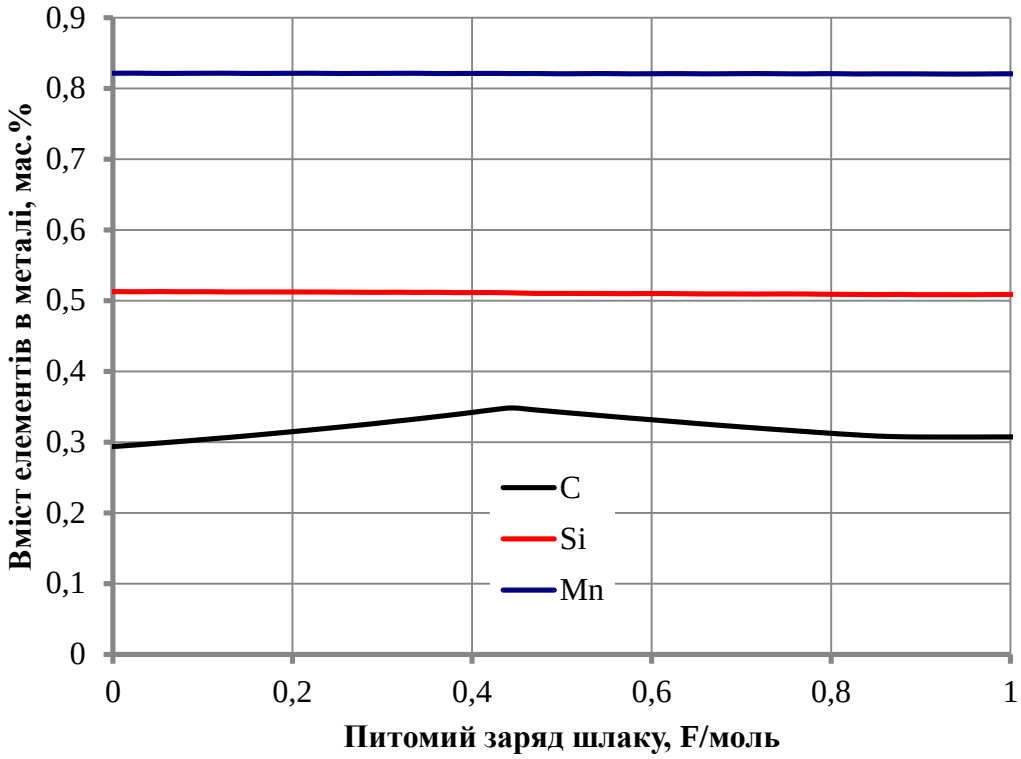
Рисунок 3.9 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 14ХГС:
кальцій,кісларод, кремній (а, в, д); залізо, марганець, алюміній, сірка, магній (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


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

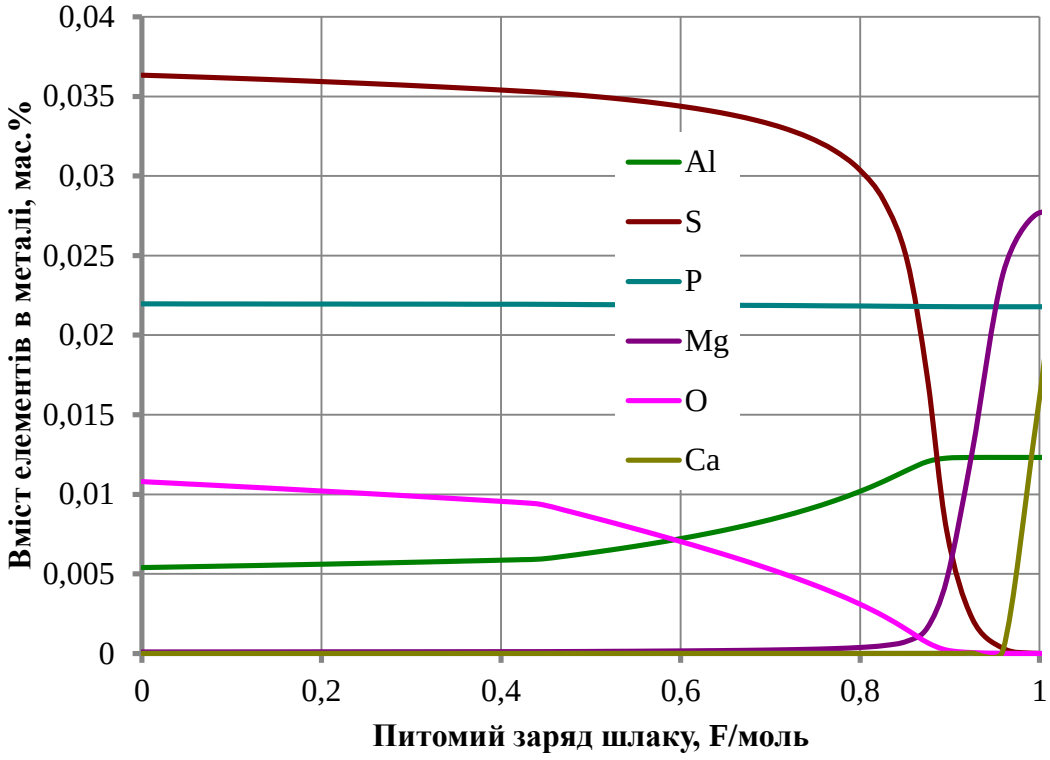
а)


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

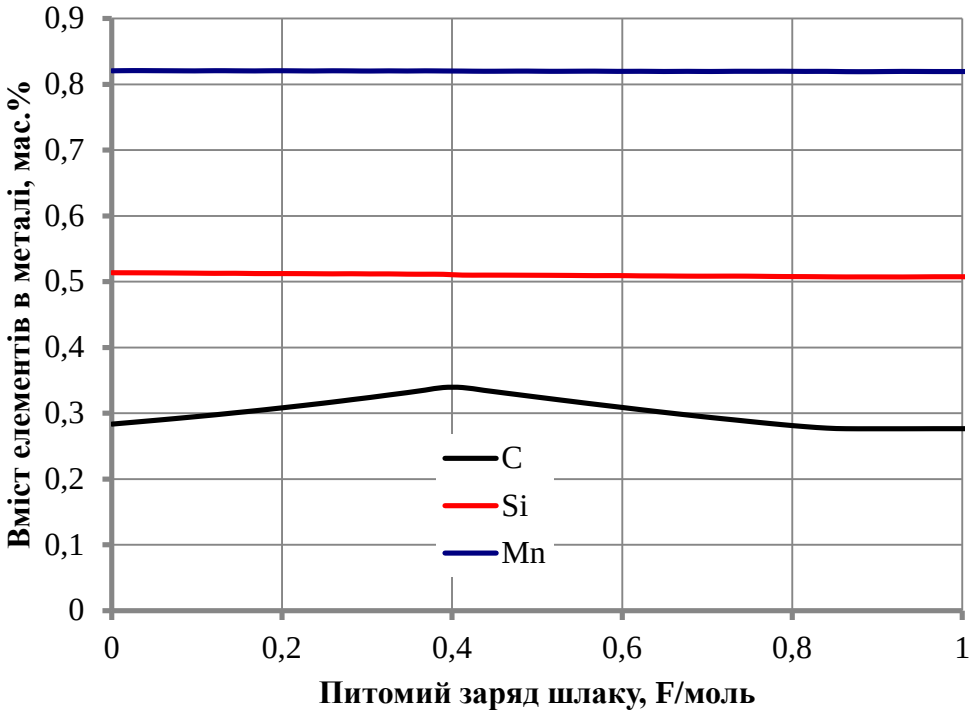
б)


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

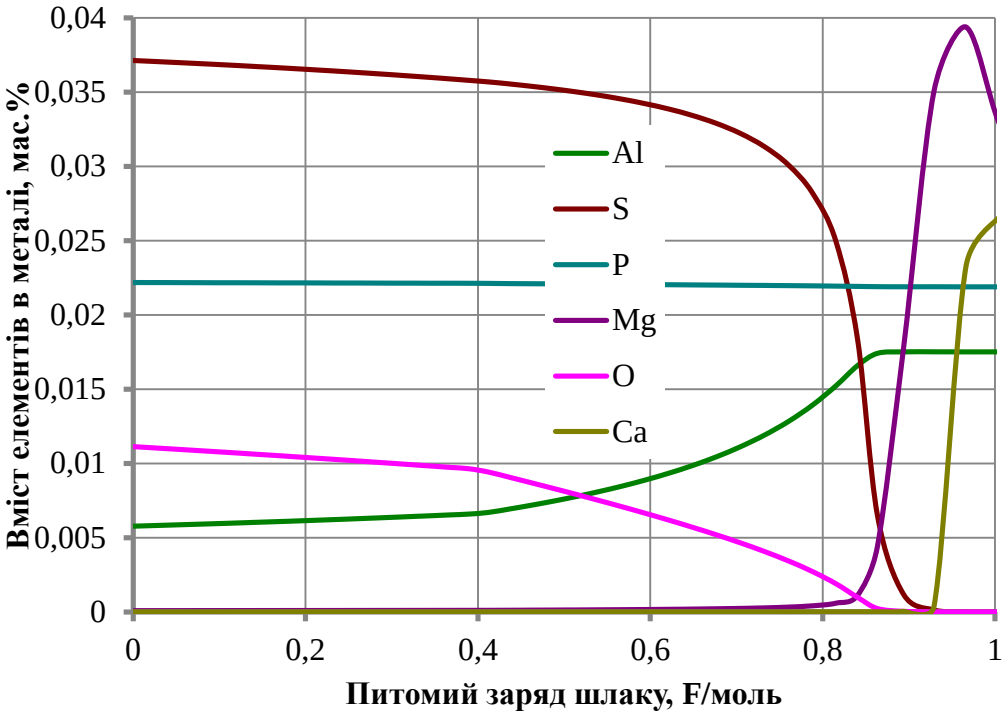
в)


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)



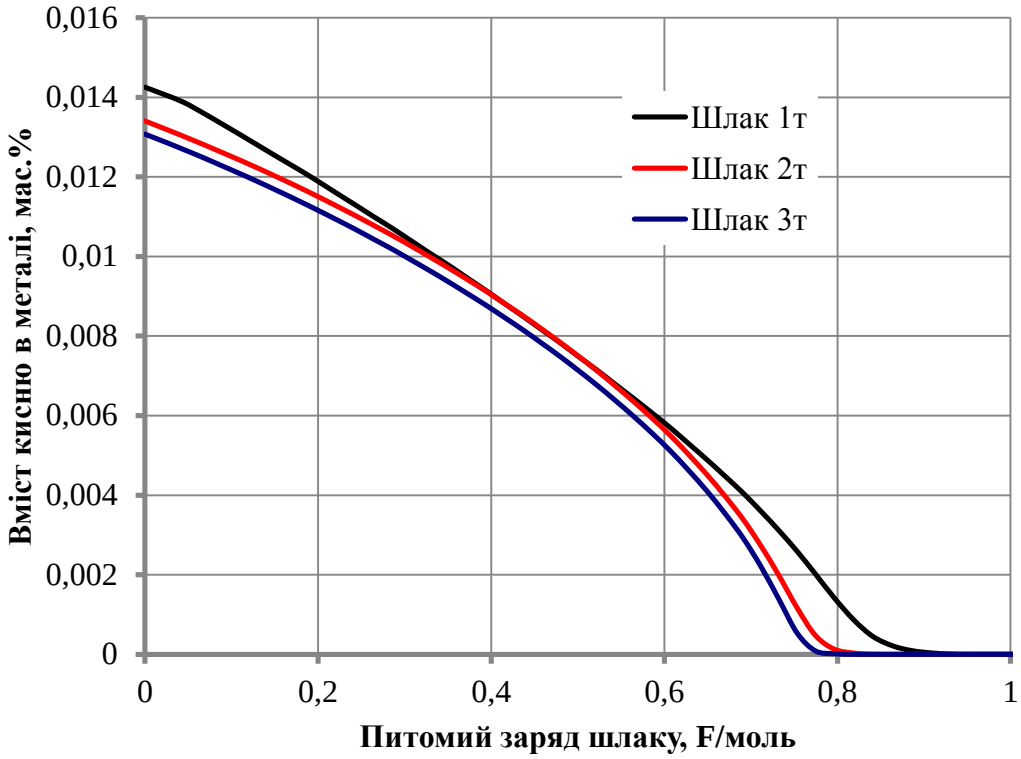
д)



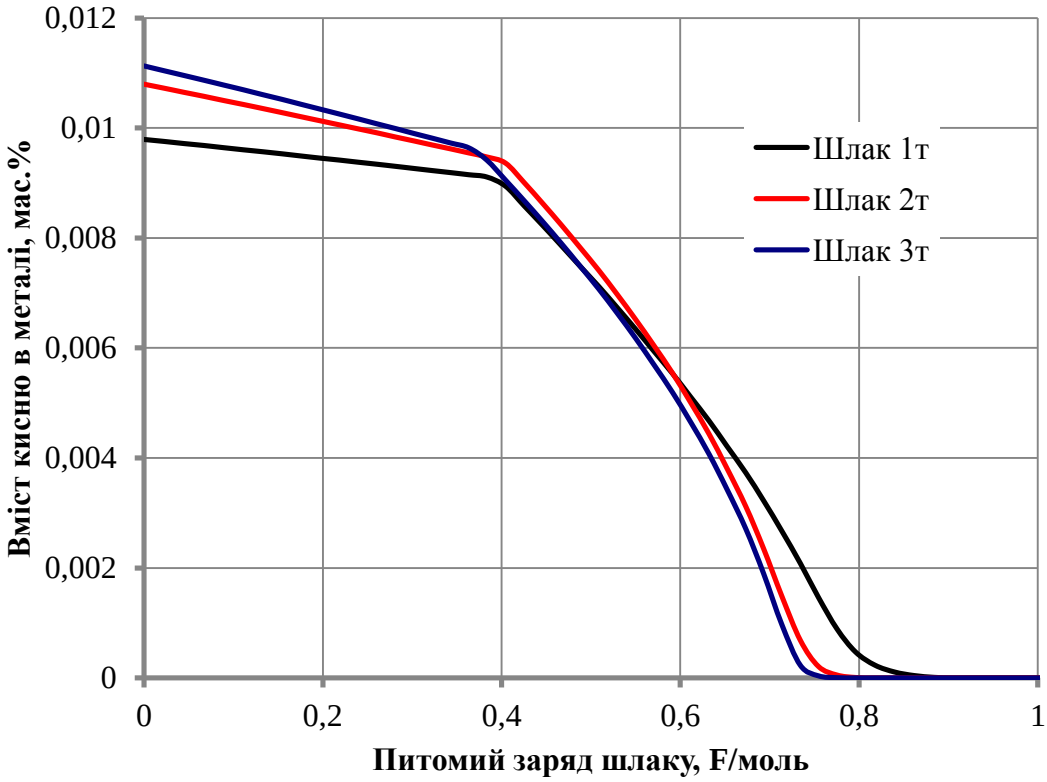
е)

Рисунок 3.10 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст хімічних елементів в сталі 30ГС:

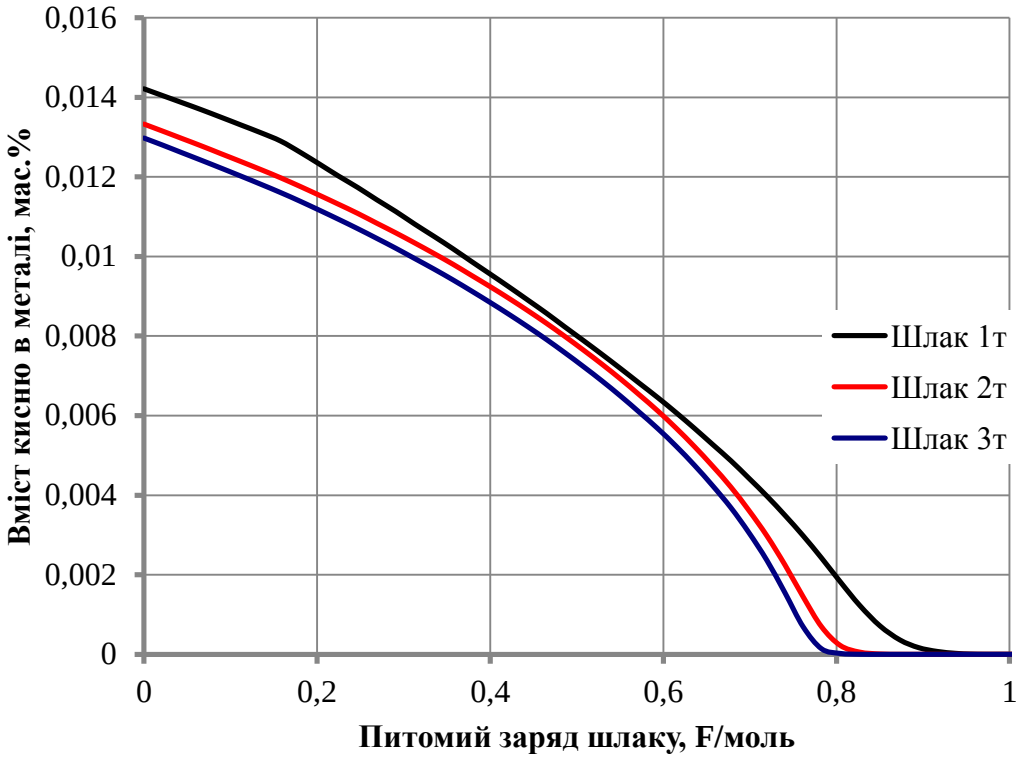
вуглець, марганець, кремній (а, в, д); сірка, кисень, фосфор, алюміній, магній, кальцій (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)


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

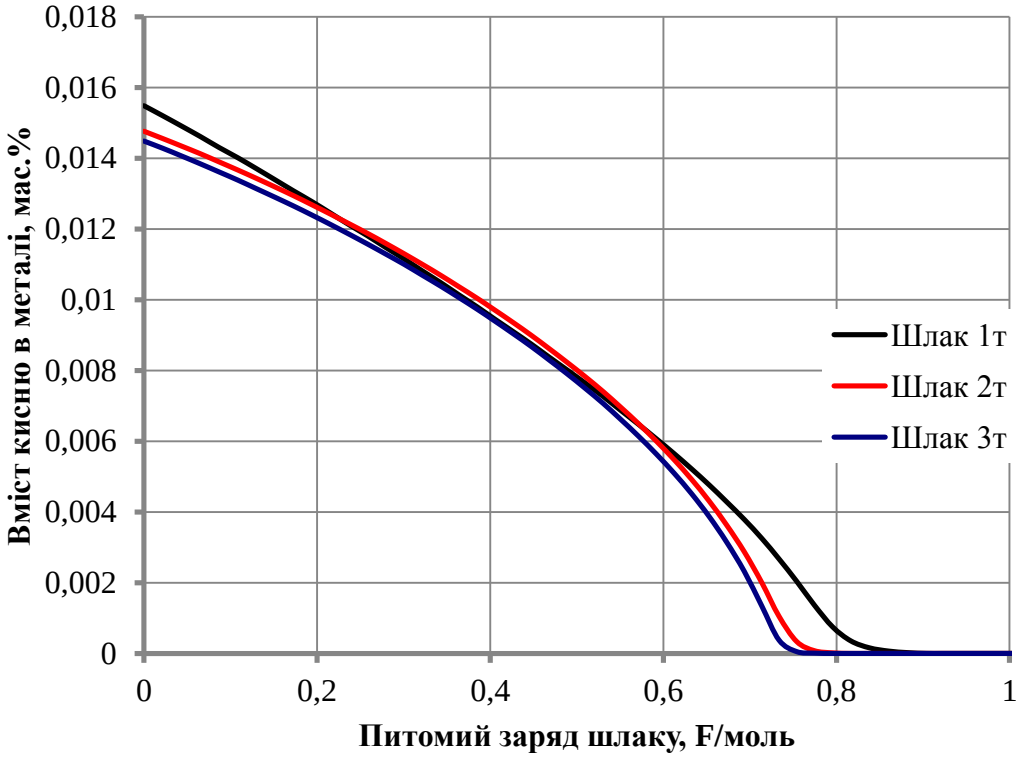
а)


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)

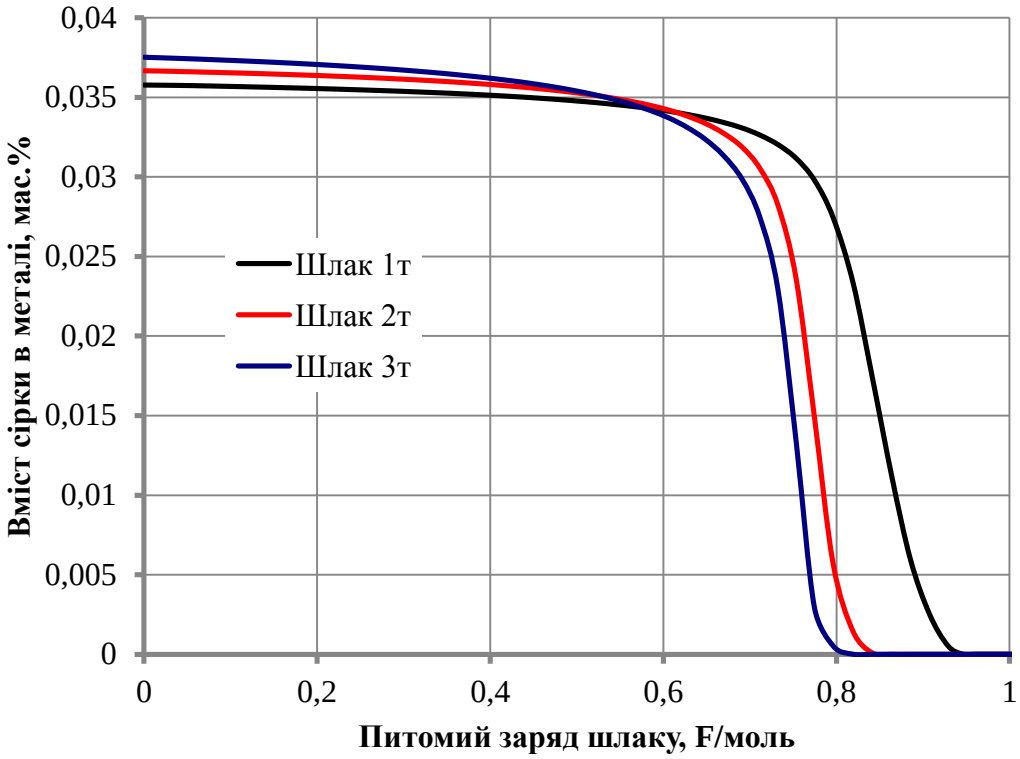


в)

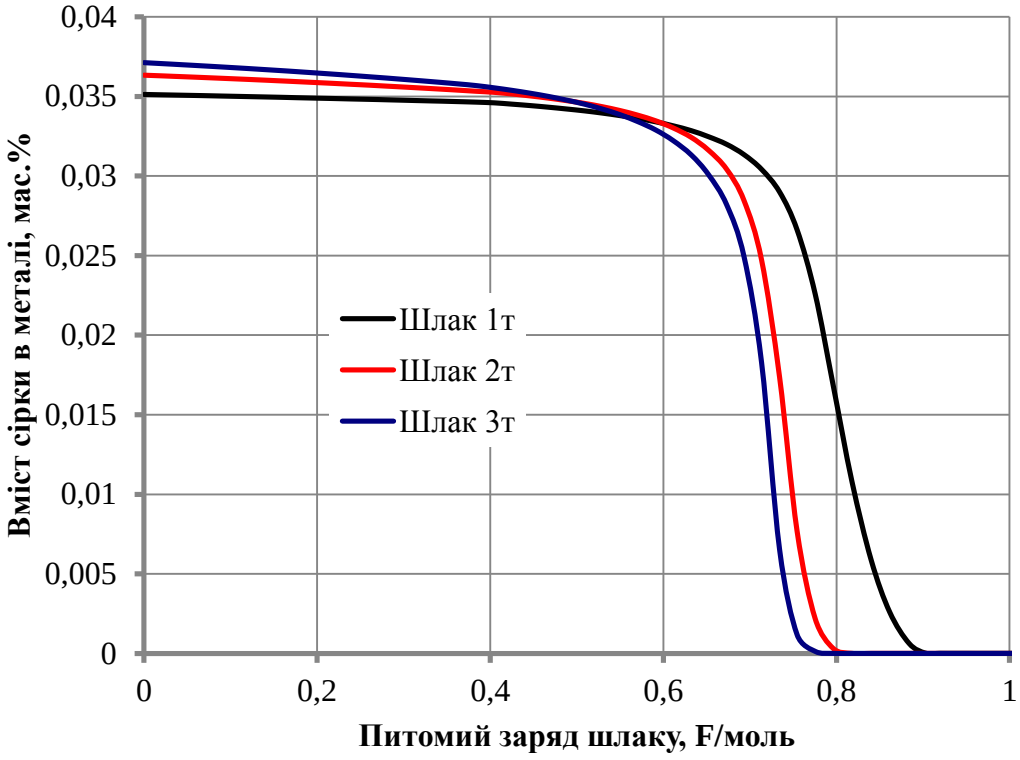


г)

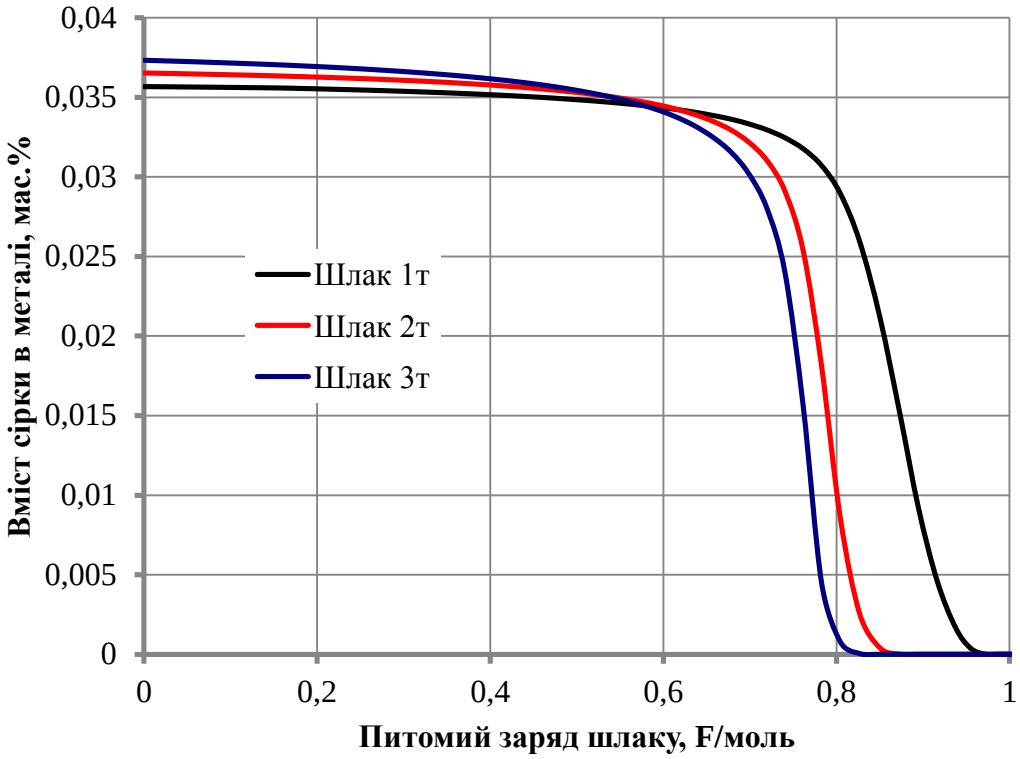
Рисунок 3.11 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст кисню в сталі: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)


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

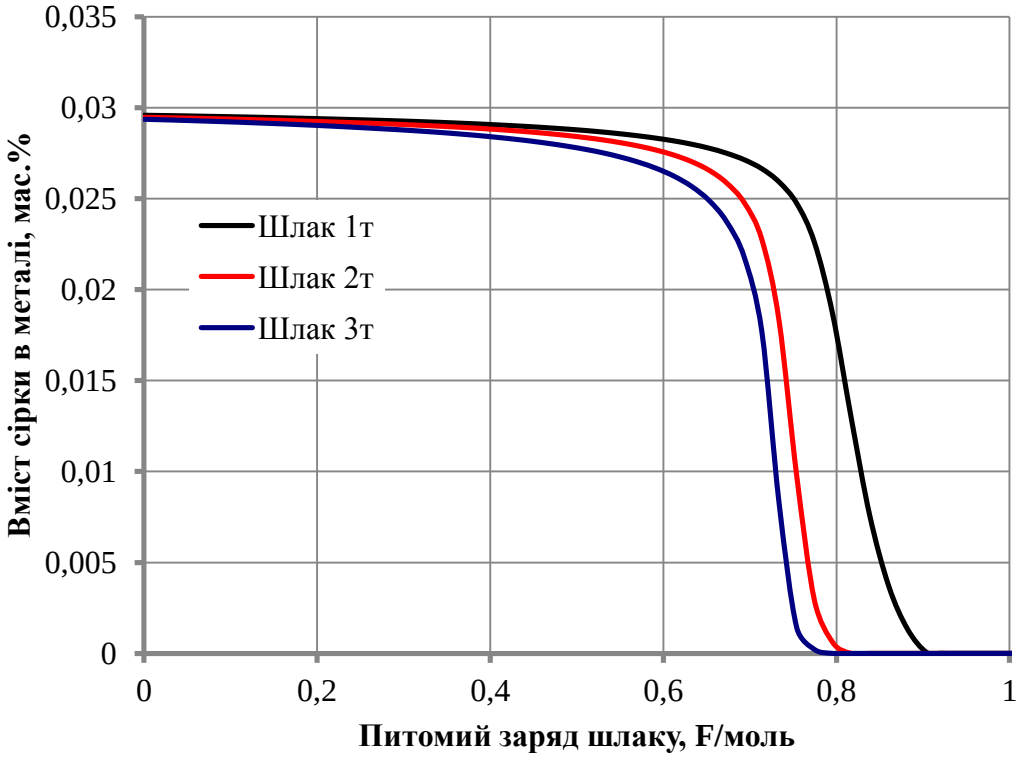
а)


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)

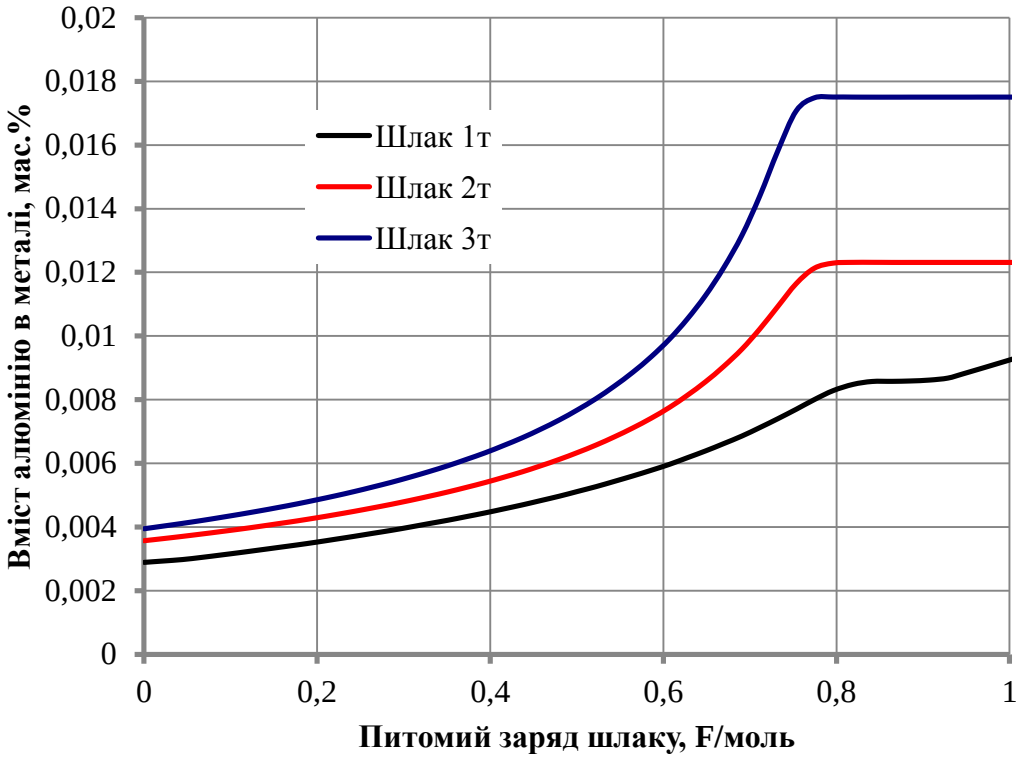


в)

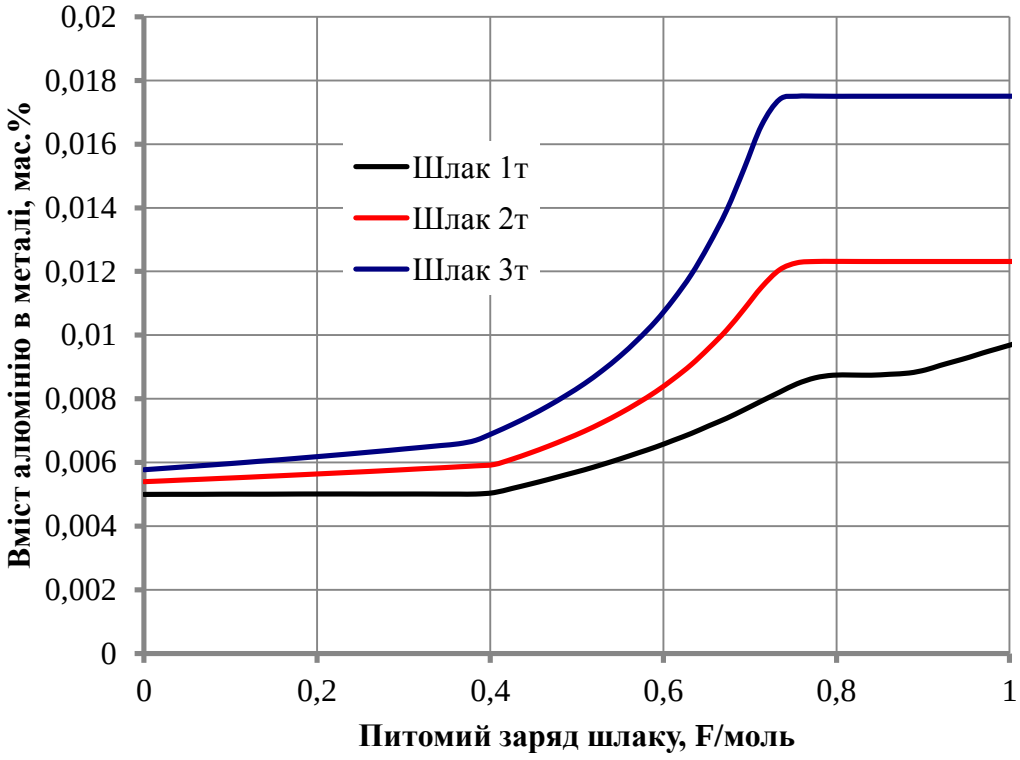


г)

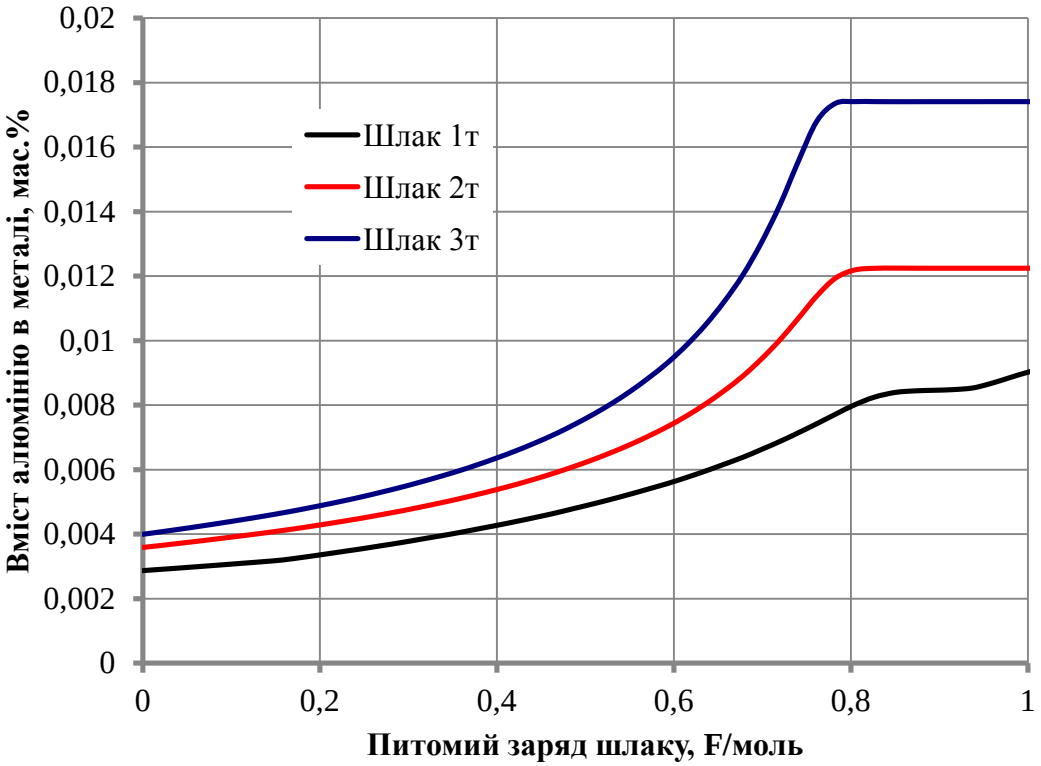
Рисунок 3.12 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст сірки в сталі: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)


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

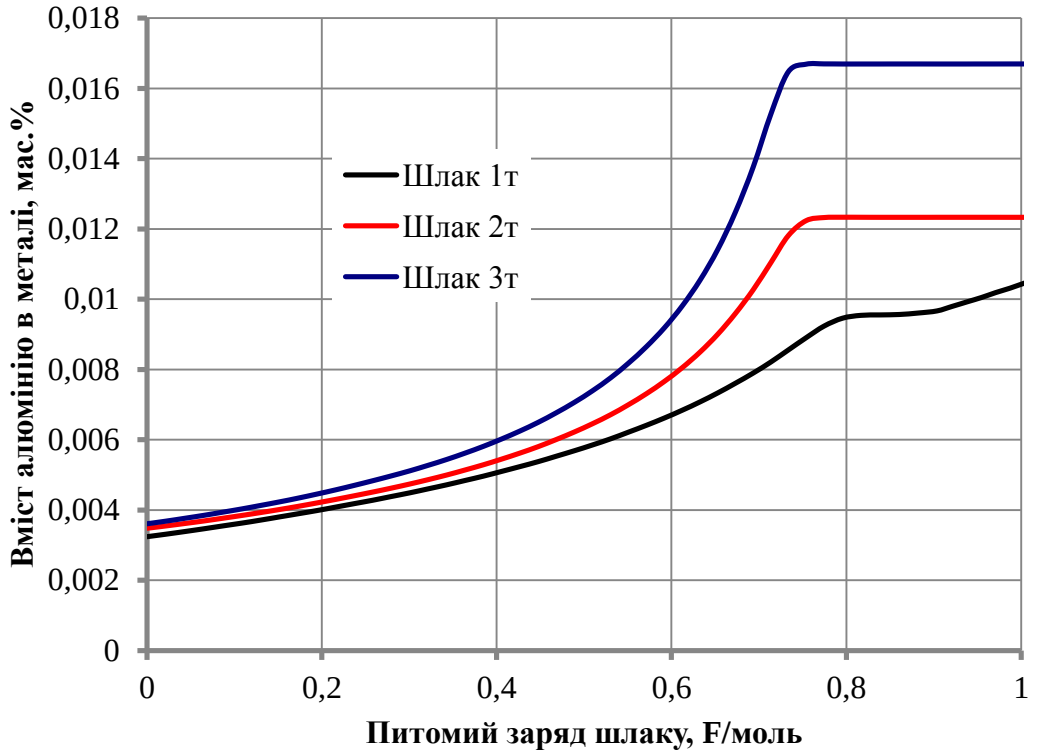
а)


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)

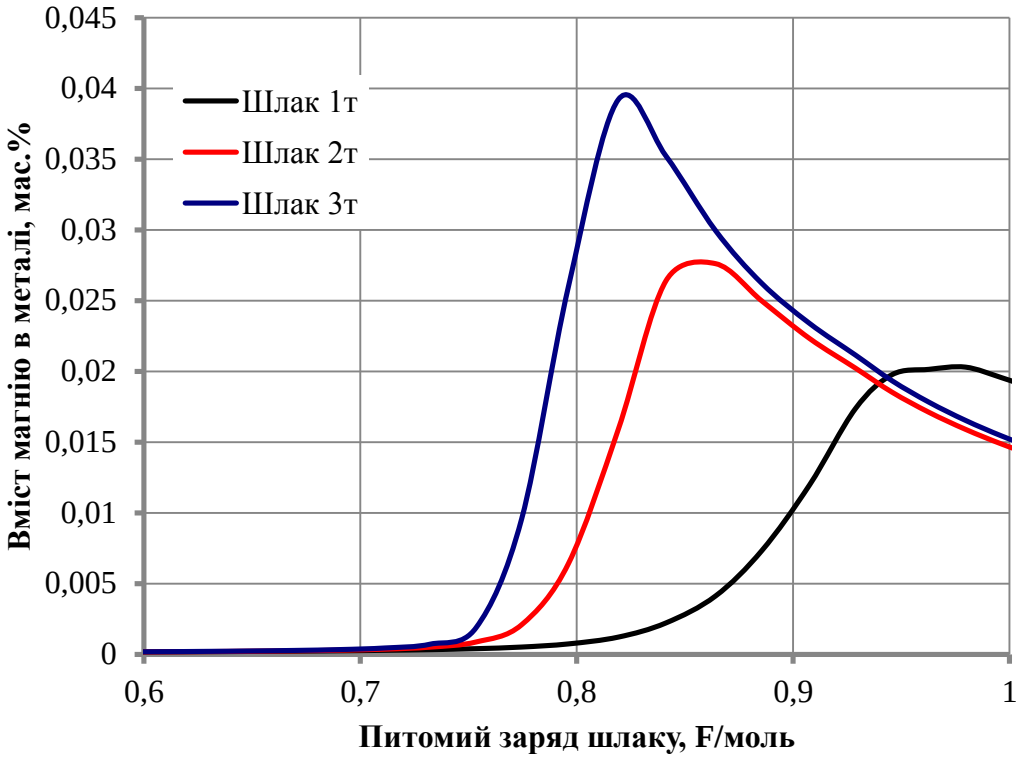


в)

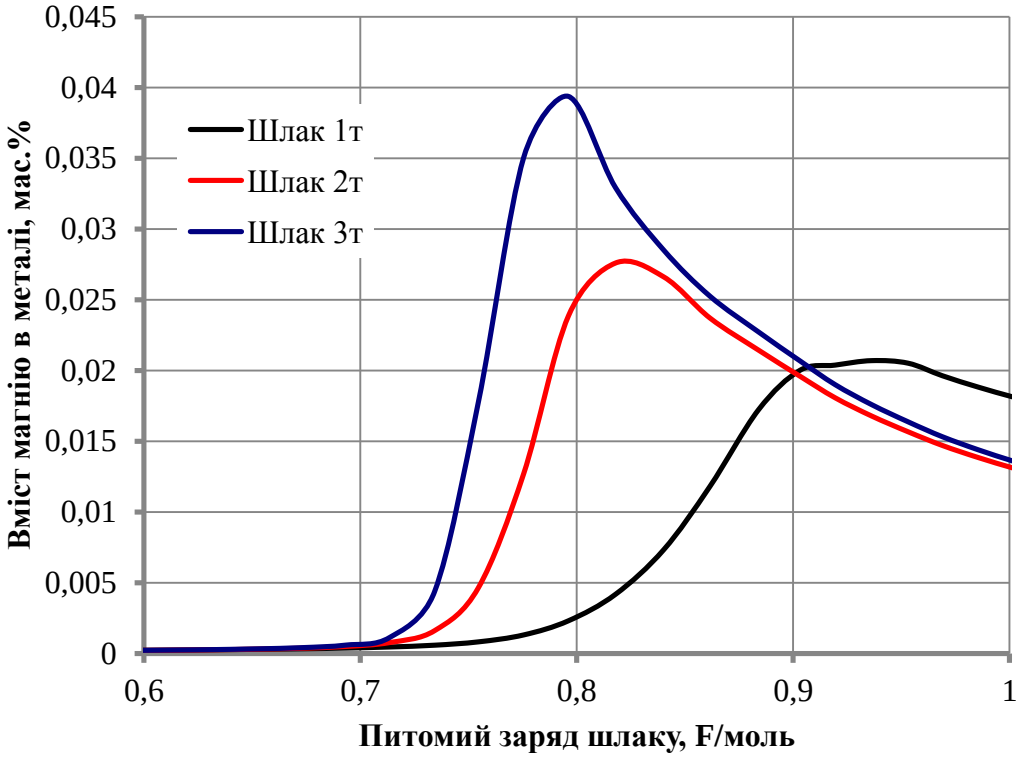


г)

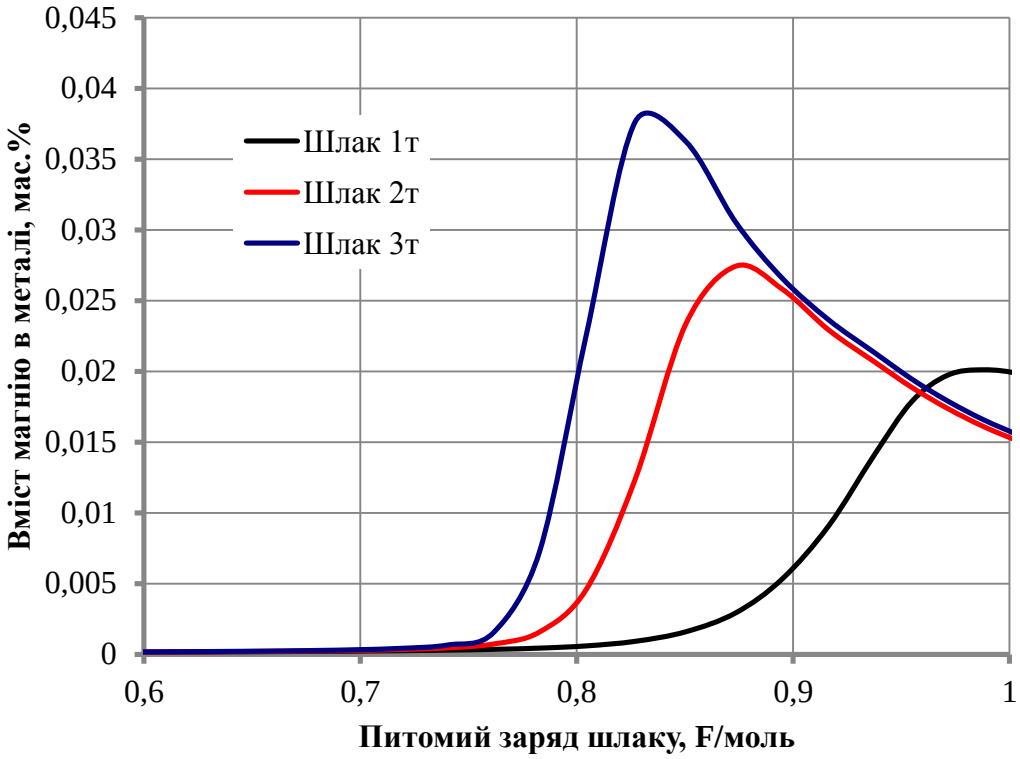
Рисунок 3.13 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст алюмінію в сталі: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)


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

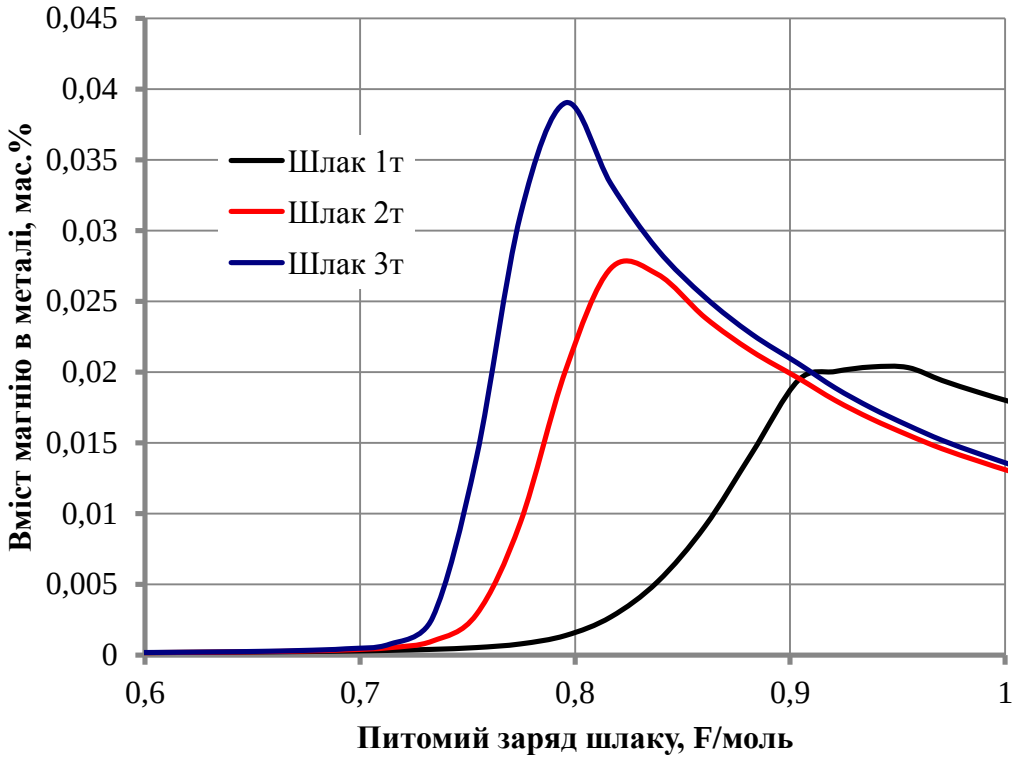
а)


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)

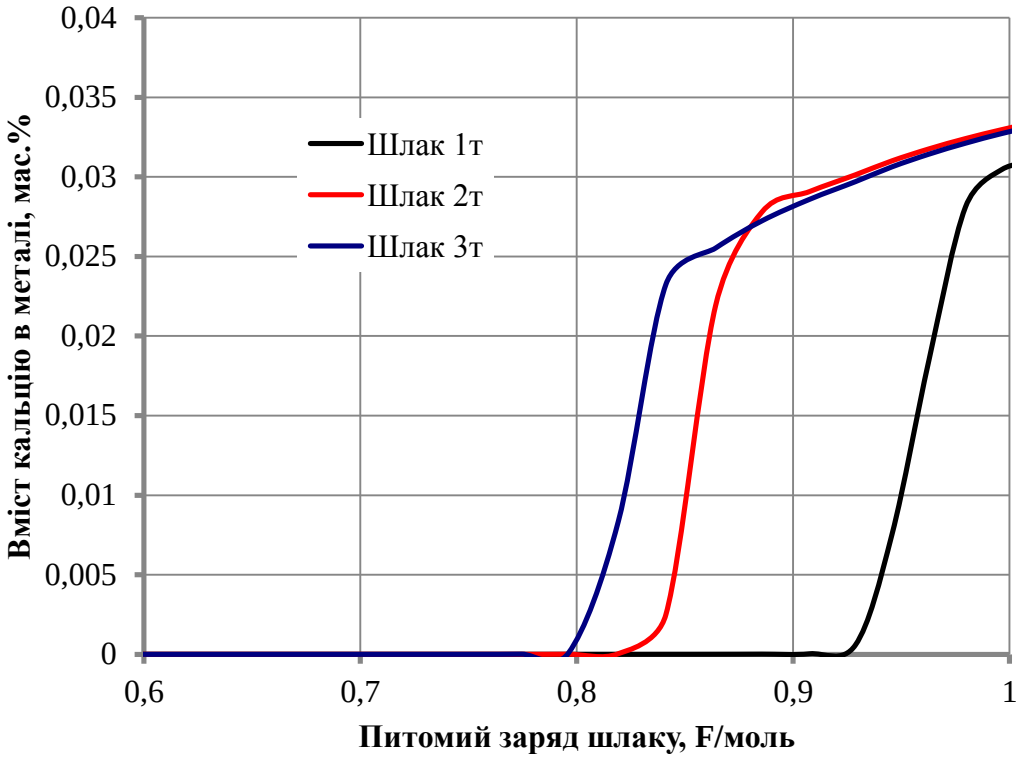


в)

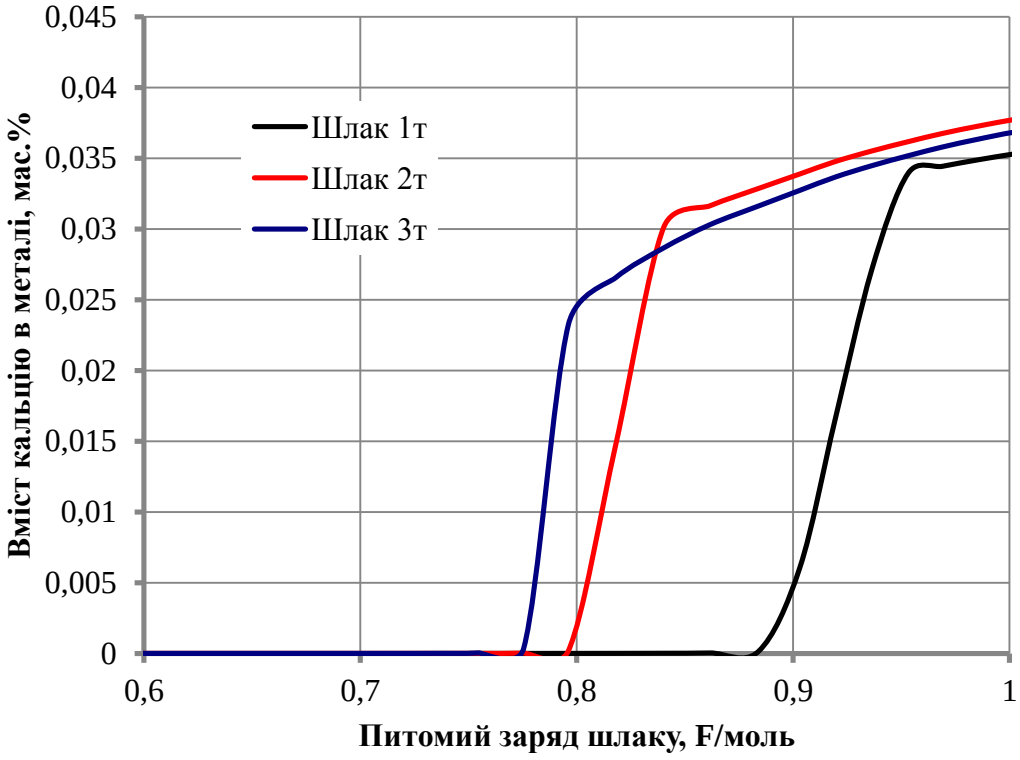


г)

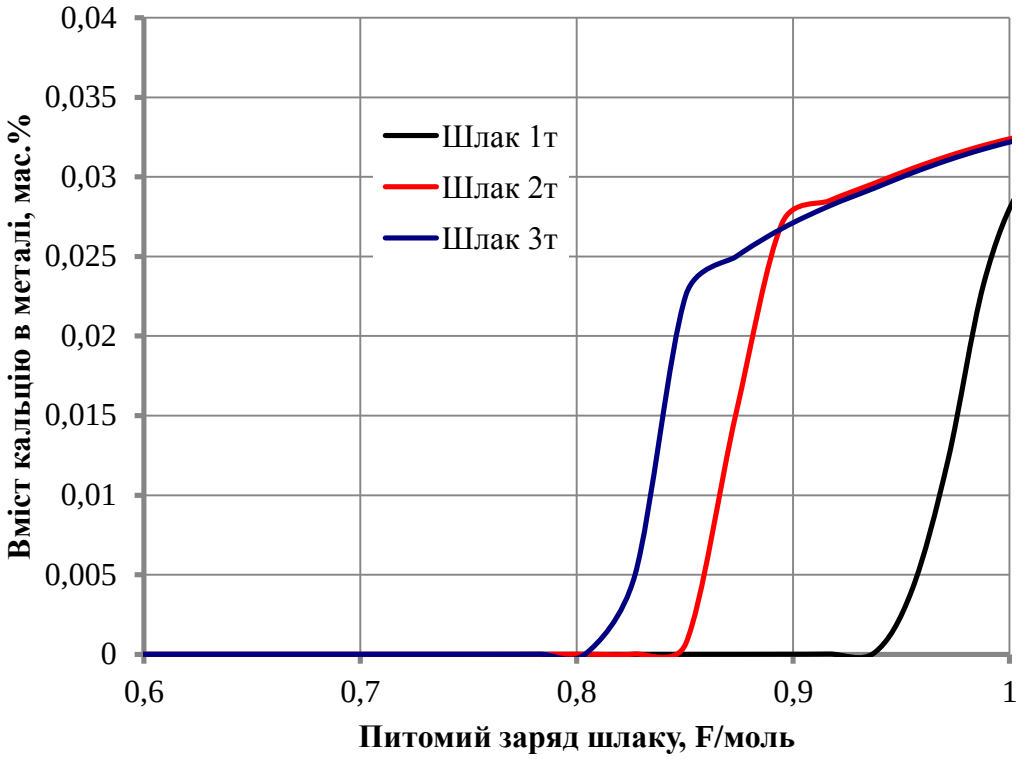
Рисунок 3.14 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст магнію в сталі: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)


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

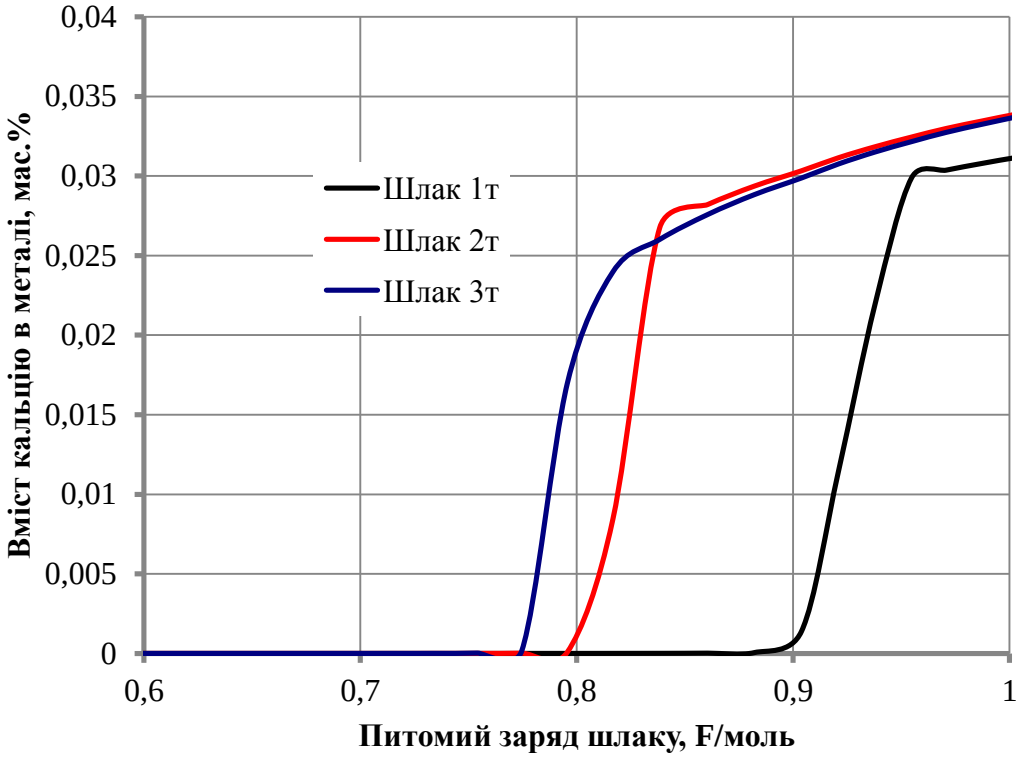
а)


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)

Рисунок 3.15 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст магнію в сталі: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)

Представлені на рисунках 3.7–3.15 дані демонструють, що вміст сірки та кисню у сталі всіх розглянутих марок систематично знижується в процесі ВЕЛР із зростанням питомого заряду шлаку. Варто зауважити, що для досягнення мінімальних значень цих елементів у сталі визначальну роль відіграє маса вихідного шлаку. Зі збільшенням маси шлаку спостерігається нижчий рівень кисню та сірки при питомому заряді шлаку ≥ 0,8 F/моль.

Концентрація кисню у середньому є в 2,5 рази меншою, ніж сірки, однак зниження вмісту кисню відбувається поступово протягом усього досліджуваного інтервалу питомого заряду шлаку. У свою чергу, вміст сірки різко зменшується при досягненні питомого заряду 0,8 F/моль. Узагальнені дані свідчать, що теоретично можна досягнути вкрай низького рівня сірки та кисню, але через кінетику процесу та активне газоутворення при високих значеннях питомого заряду шлаку рівноваги у процесі не вдається досягти за прийнятний проміжок часу. Цю гіпотезу підтверджують як експериментальні результати, так і дані кінетичного моделювання, отримані раніше [15; 16].

Що стосується алюмінію, його вміст поступово зростає з початкового рівня 0,003% і досягає максимуму на рівні 0,015–0,017% при питомому заряді шлаку 0,9 F/моль. Проте збільшення вмісту алюмінію у сталі можна забезпечити шляхом підвищення концентрації оксиду алюмінію в шлаку.

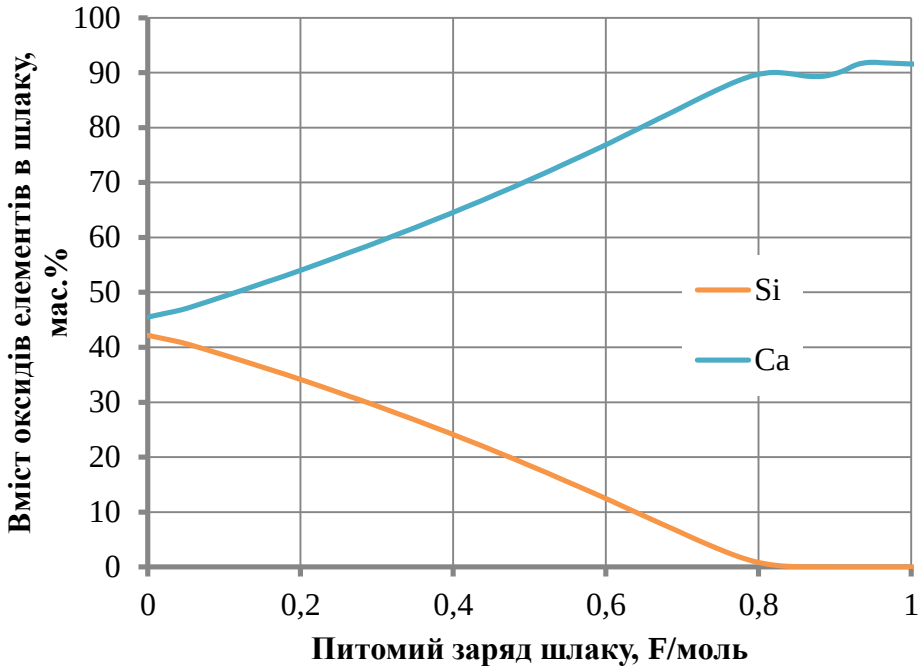
Варто звернути увагу на поведінку елементів кальцію і магнію, вміст яких стрімко збільшується після досягнення питомого заряду шлаку 0,8–0,9 F/моль. Це пов’язано з початком інтенсивного газоутворення. Крім того, момент початку зростання концентрації залежить від маси вихідного шлаку: що більша маса шлаку, то менший заряд потрібний для значного підвищення концентрації кальцію та магнію у металі.

Щодо елементів, таких як вуглець, кремній, марганець і хром, їхній вміст залишається практично незмінним протягом усього процесу. Стабільність їхніх концентрацій пояснюється оптимально розрахованою витратою феросплавів відповідно до встановлених стандартів. Варто також

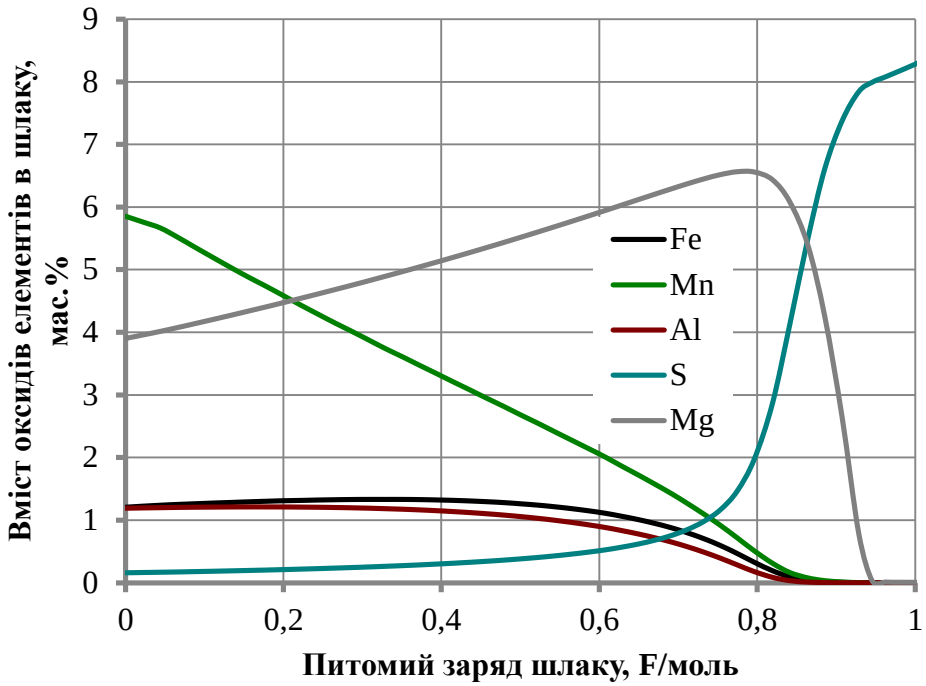
зазначити, що рівень фосфору у досліджуваних марках сталі залишається стабільним і практично не змінюється протягом процесу.

3.2.3 Вплив питомого заряду шлаку на вміст хімічних елементів у шлаку

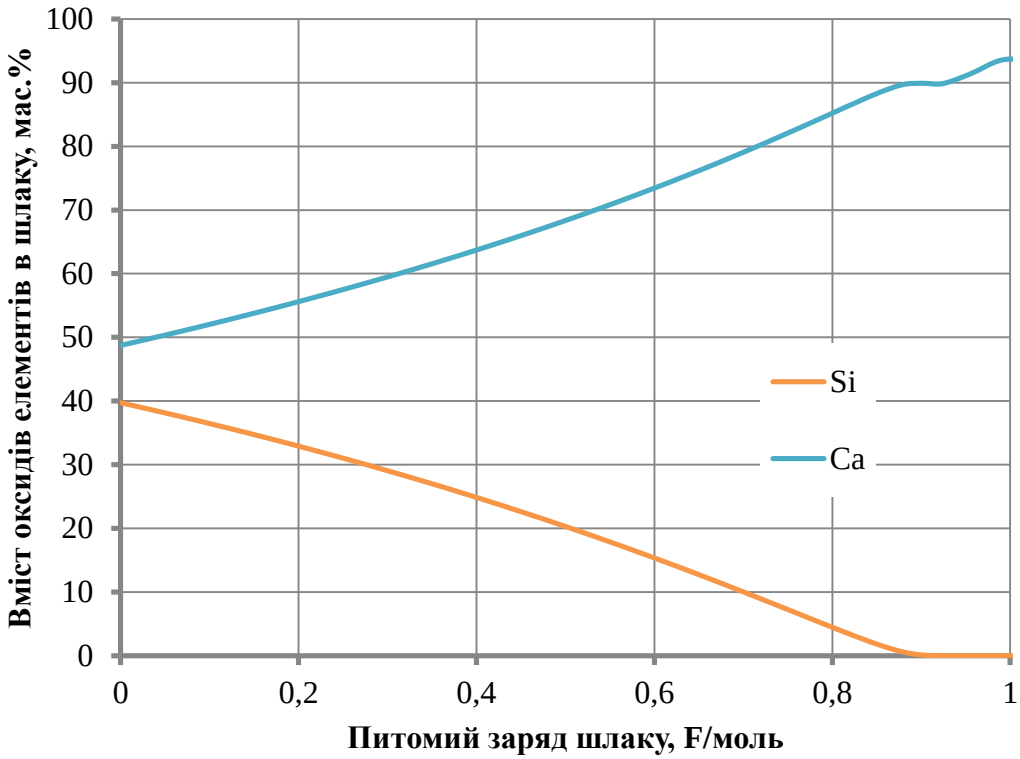
У проведеному експерименті використовували сталі марок 14ХГС, 09Г2С, 30ГС і 12ГС. Основна увага приділялася дослідженню впливу питомого заряду та початкової маси шлаку на концентрацію оксидів хімічних елементів у шлаку (виключаючи сірку). Результати розрахунків представлено на рисунках 3.16–3.23.



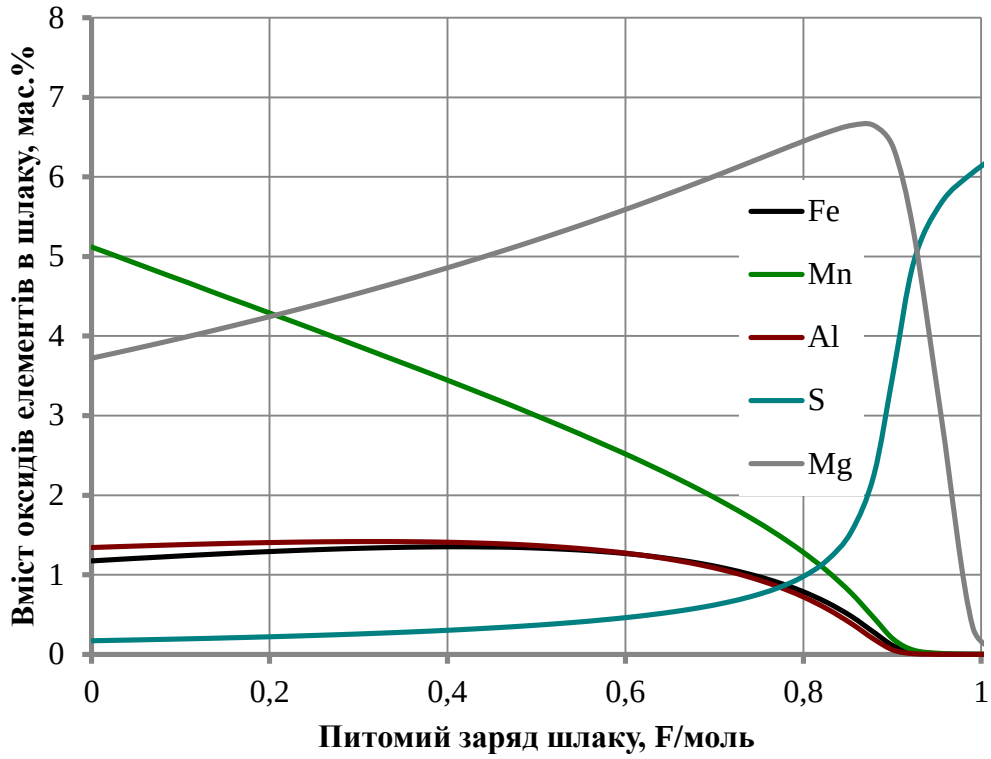
а)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Fe
Mn
Al
S
Mg

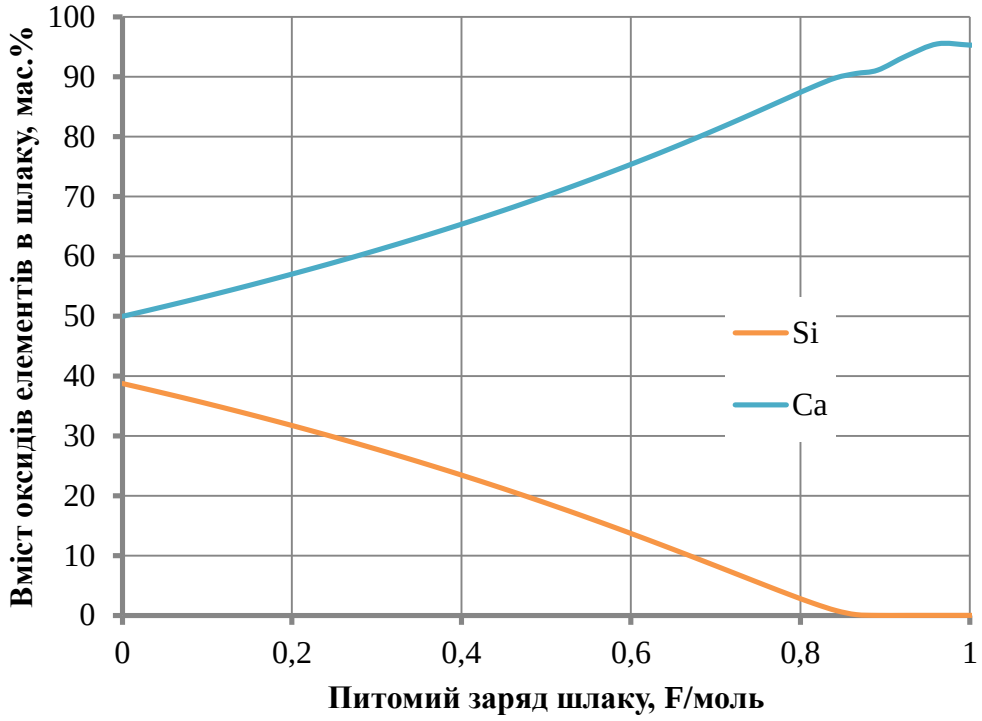
б)


Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Si
Ca

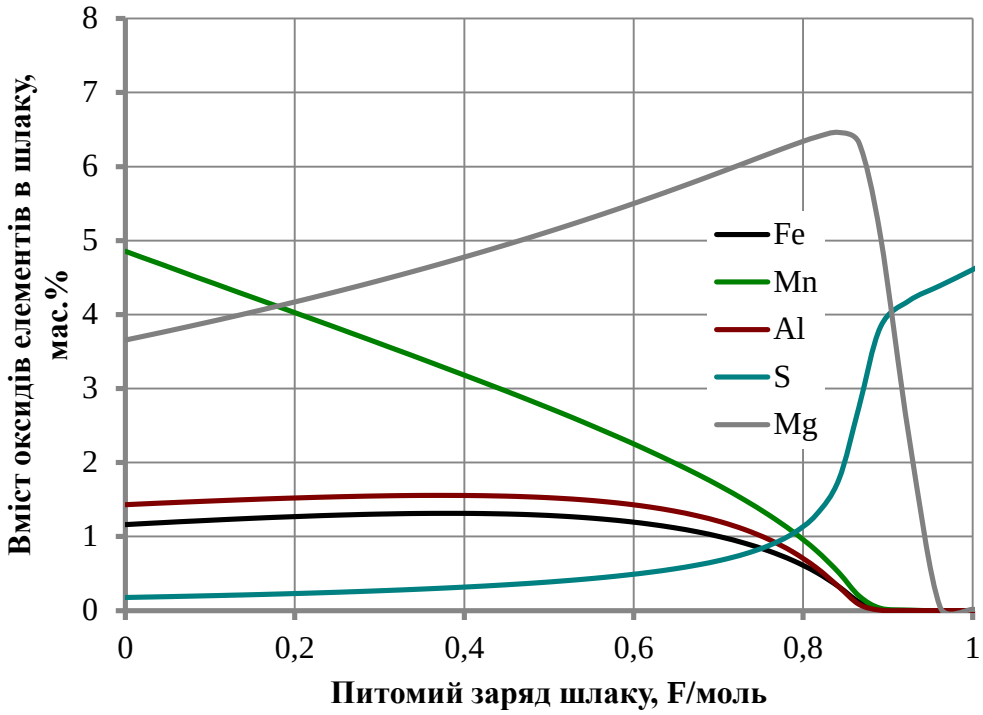
в)


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

г)

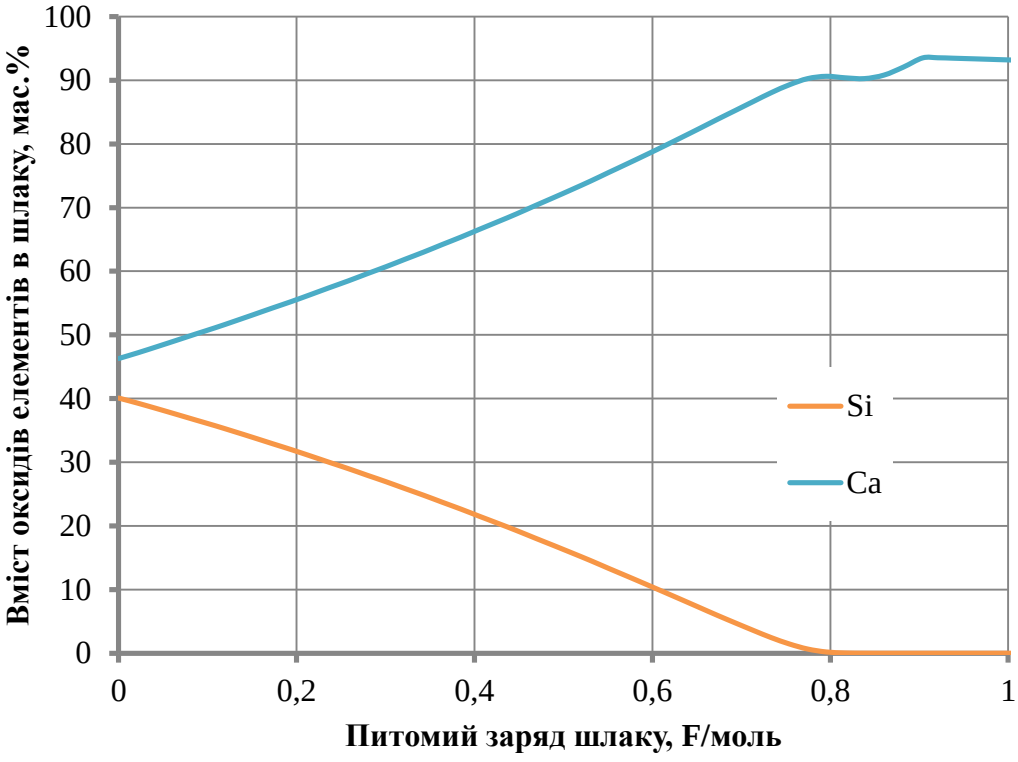

Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Si
Ca

д)

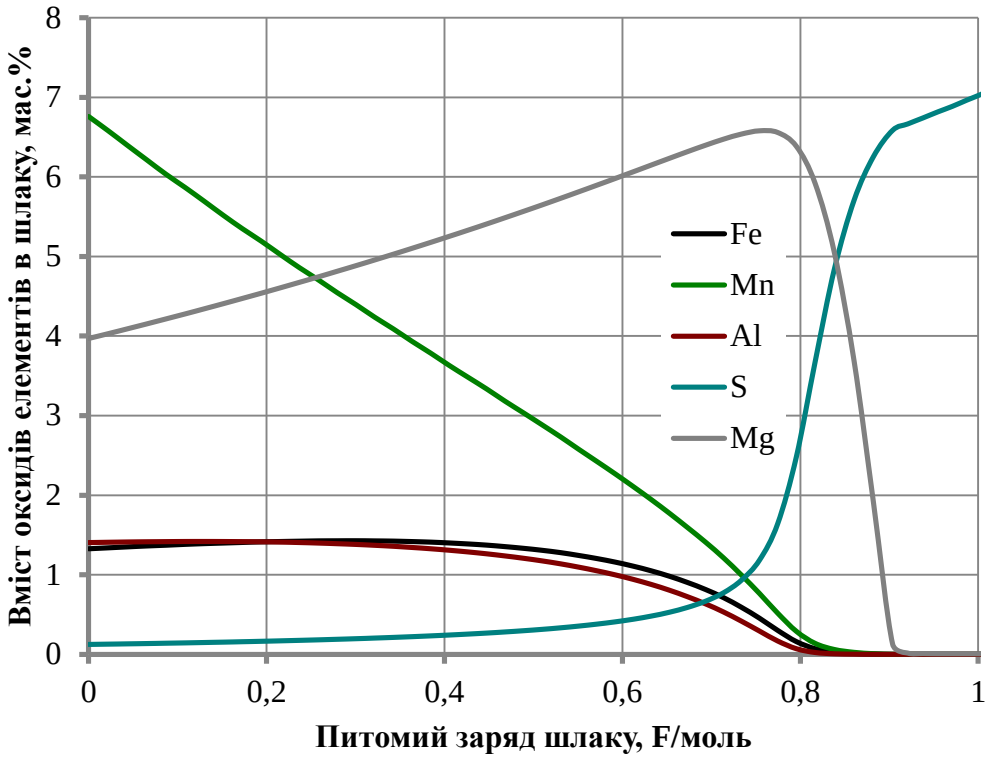


е)

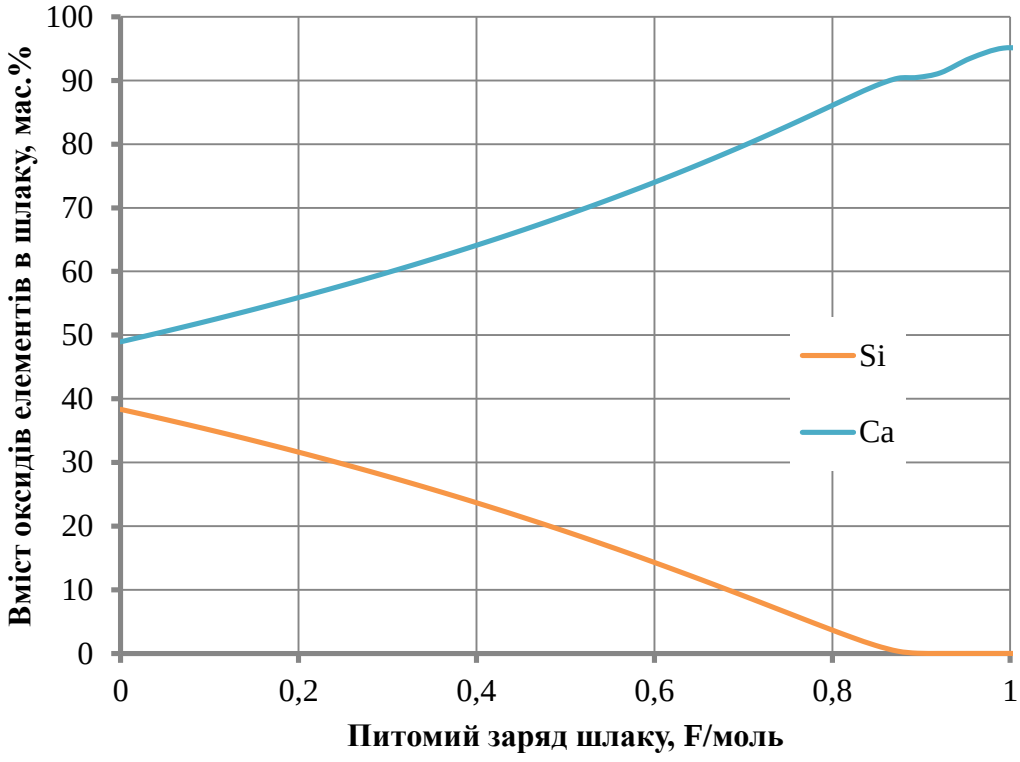
Рисунок 3.16 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 12ГС: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



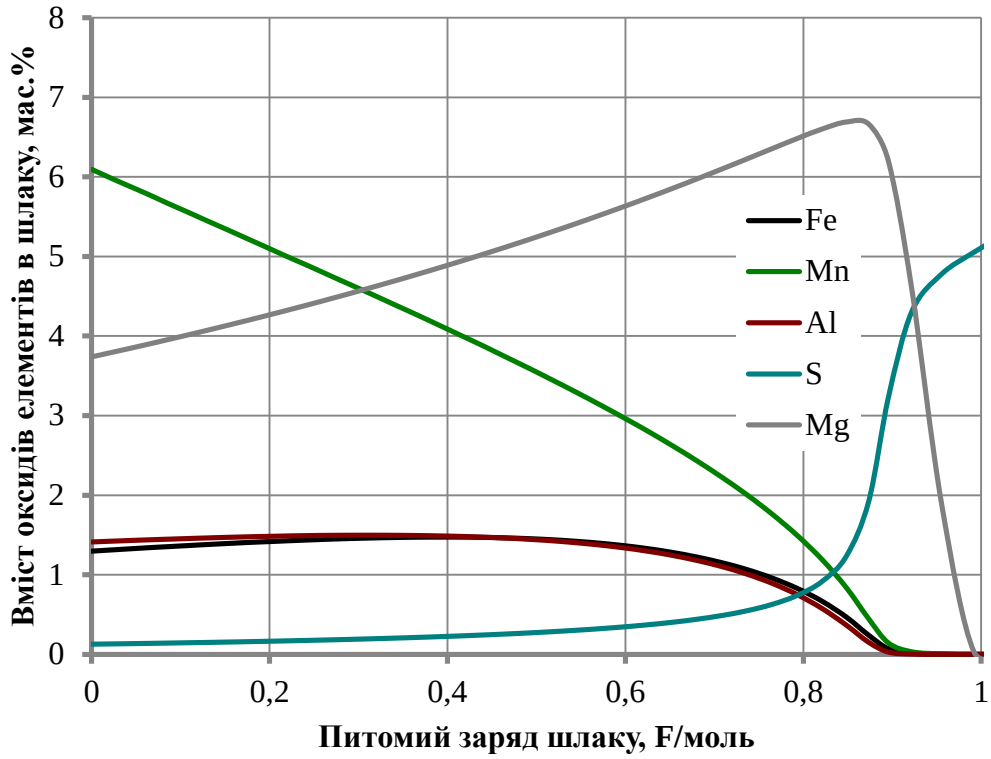
а)


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

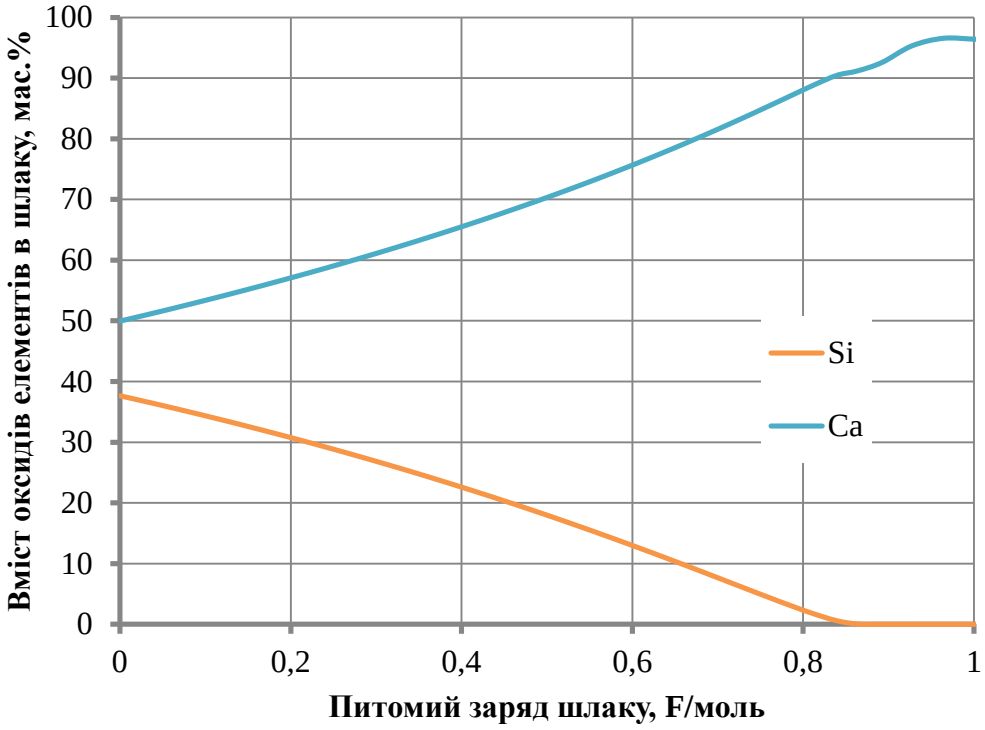
б)


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

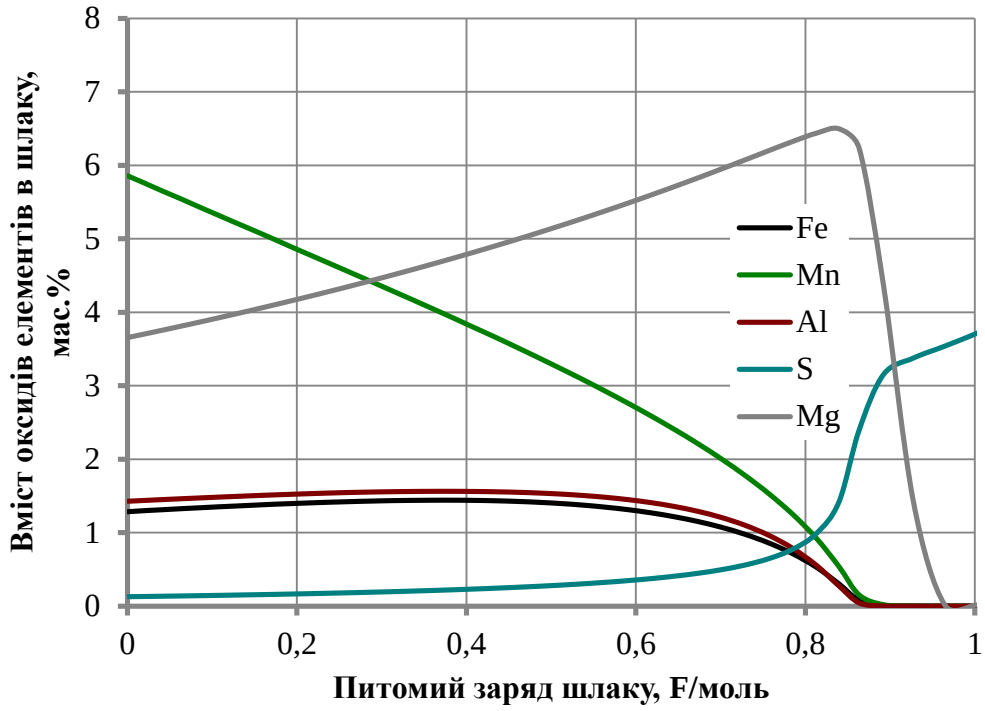
в)


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

г)

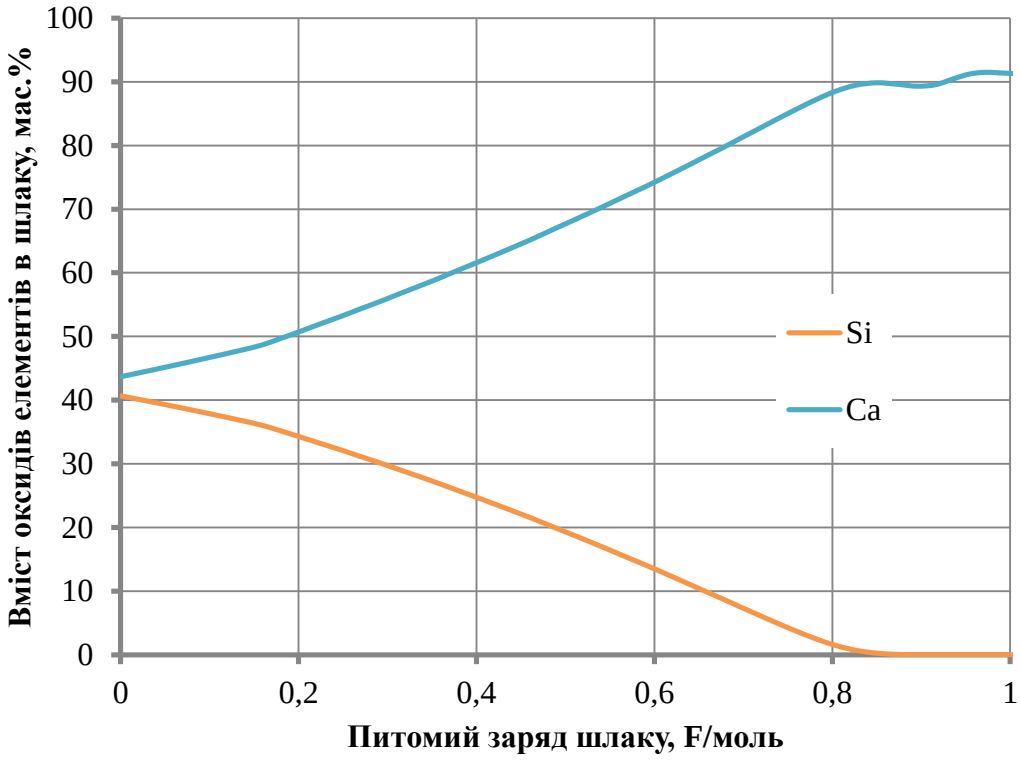

Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Si
Ca
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

д)

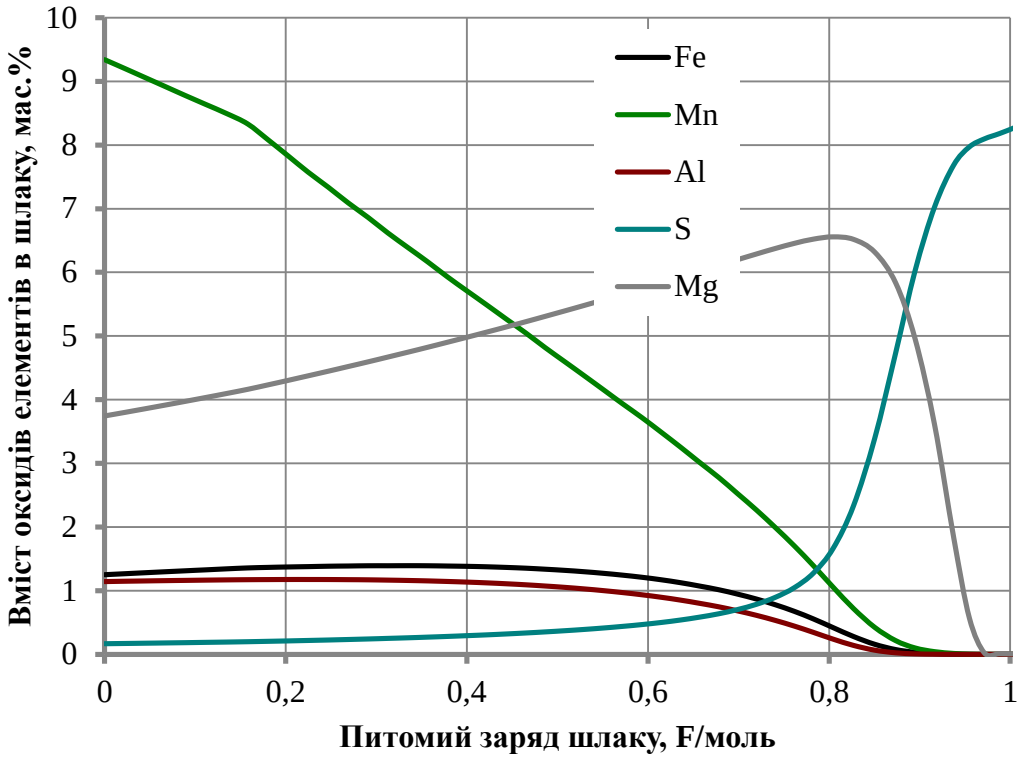


е)

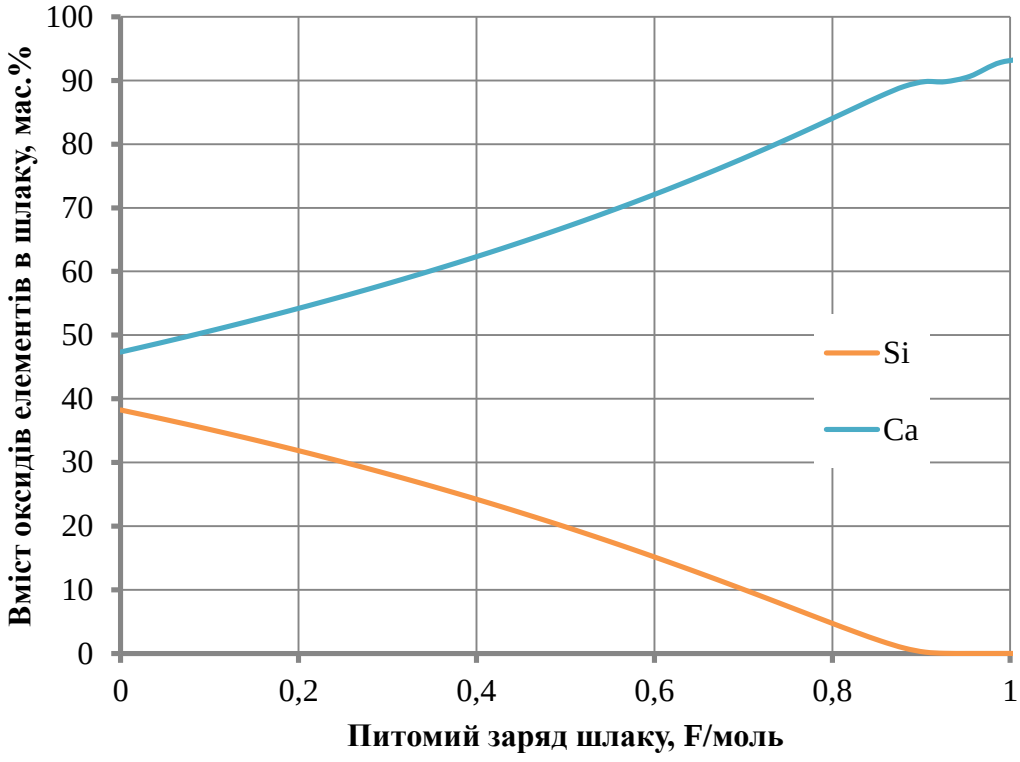
Рисунок 3.17 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 14ХГС: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



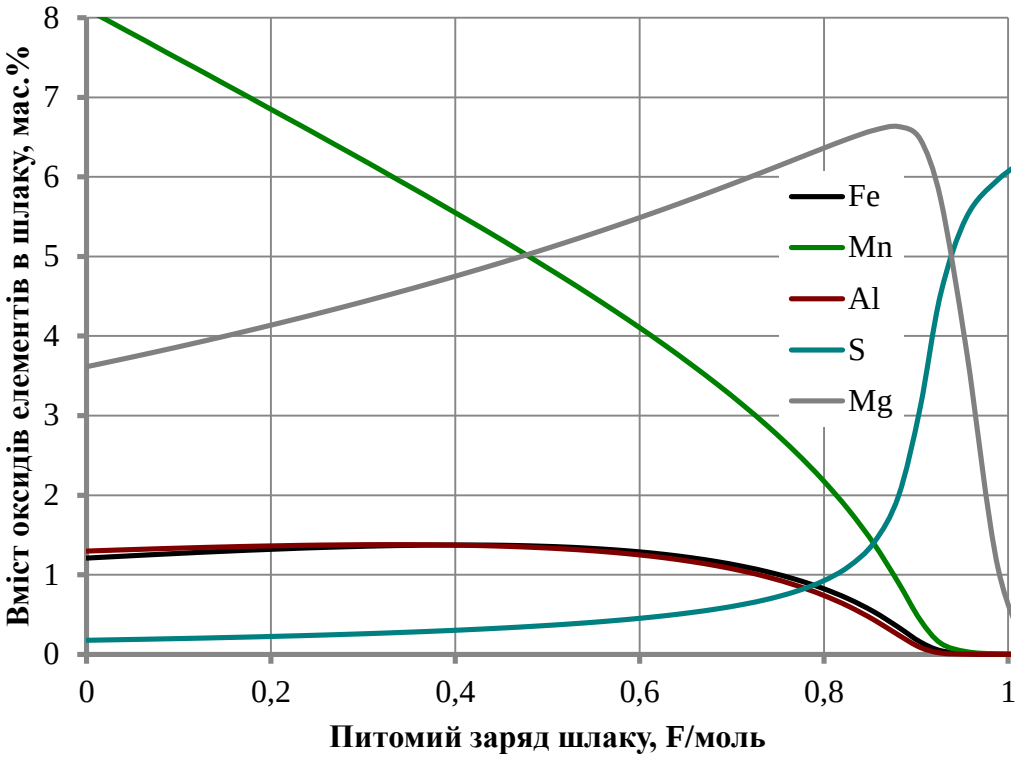
а)


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

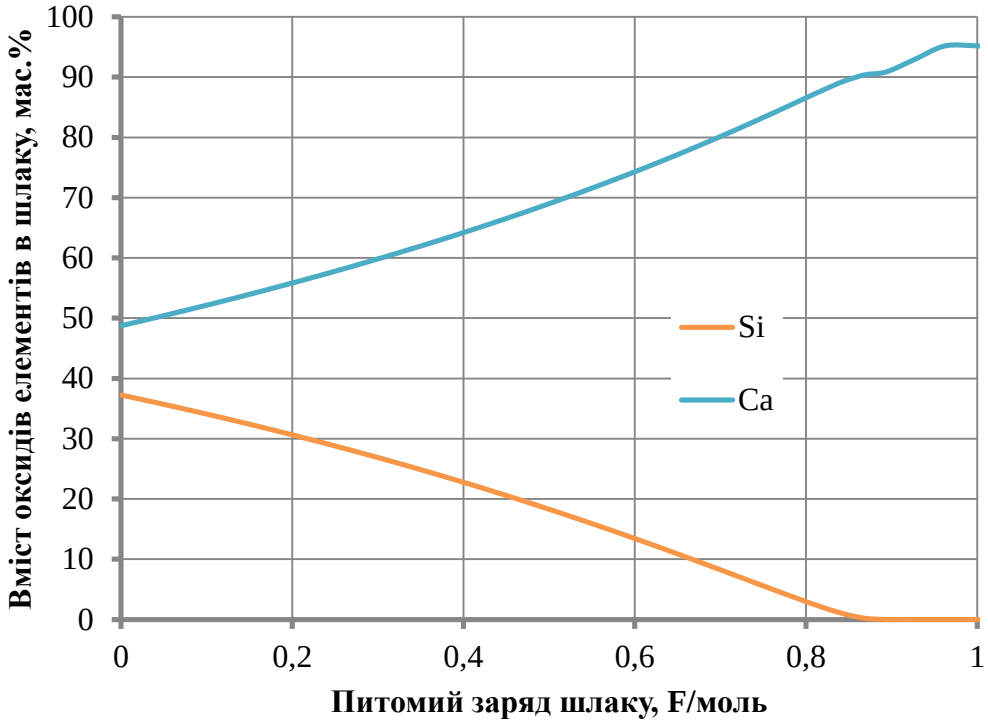
б)


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

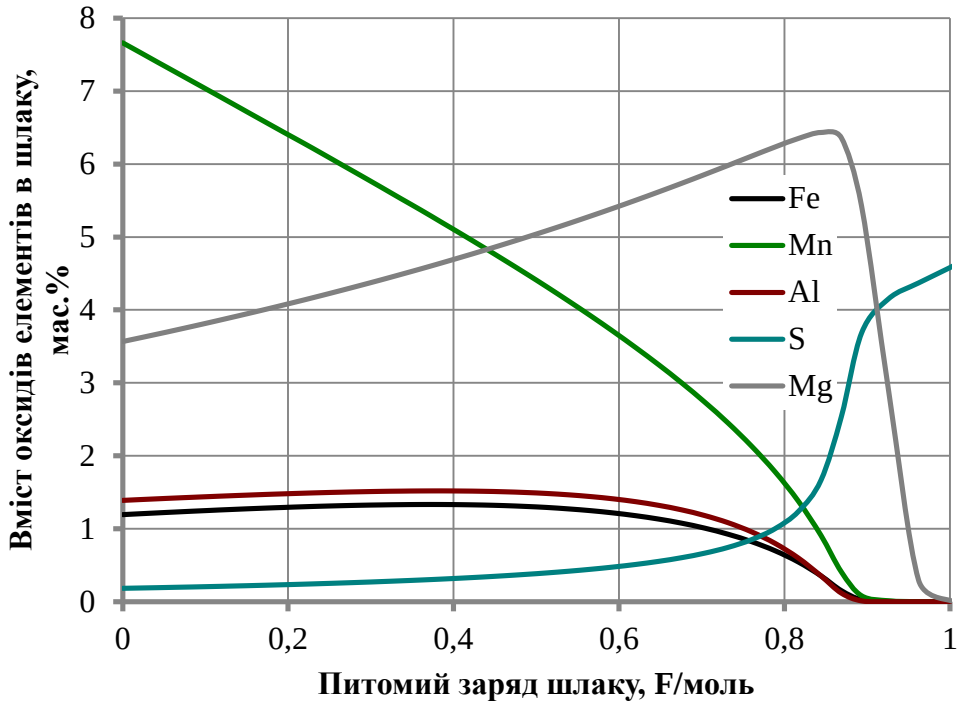
в)


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

г)

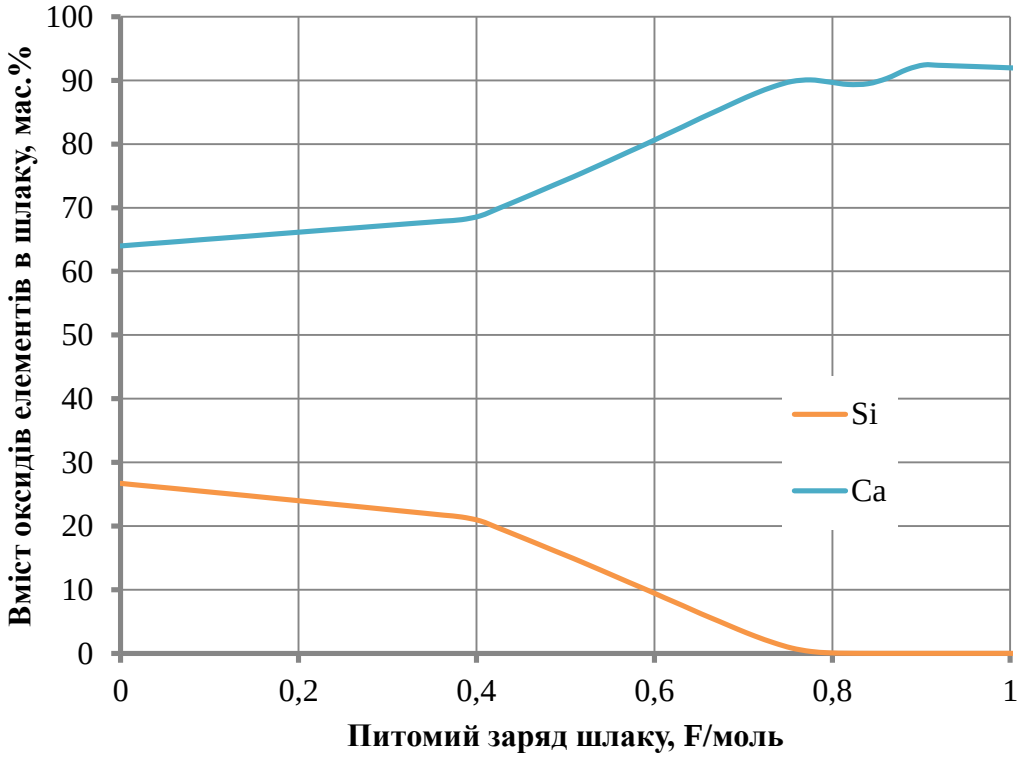

Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Si
Ca

д)

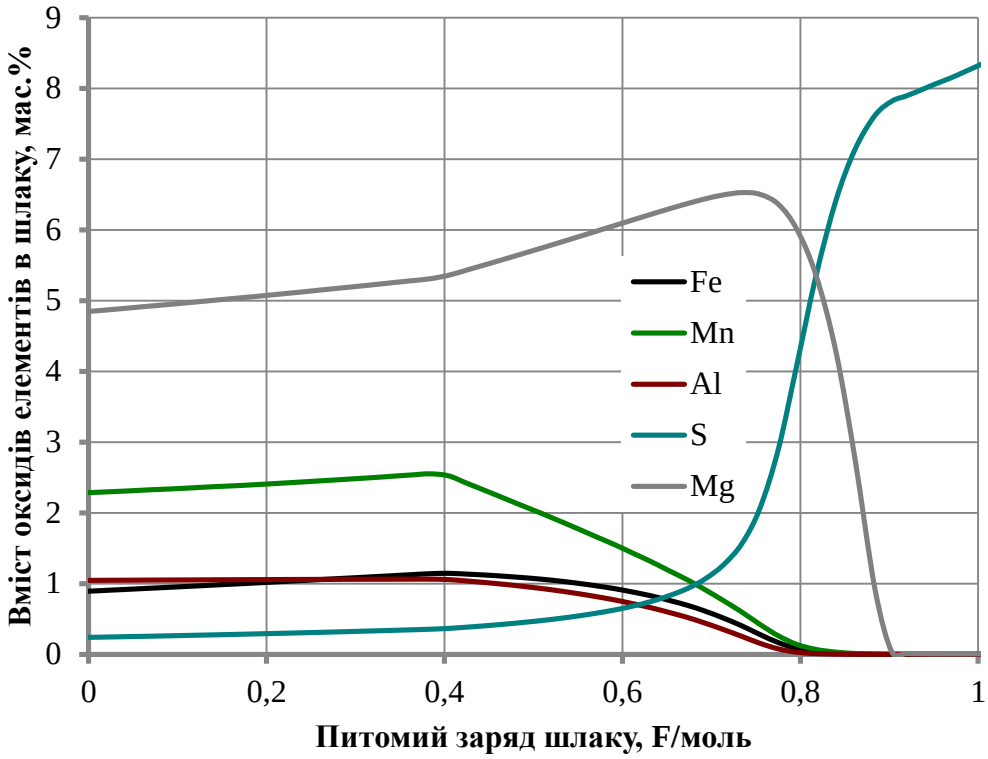


е)

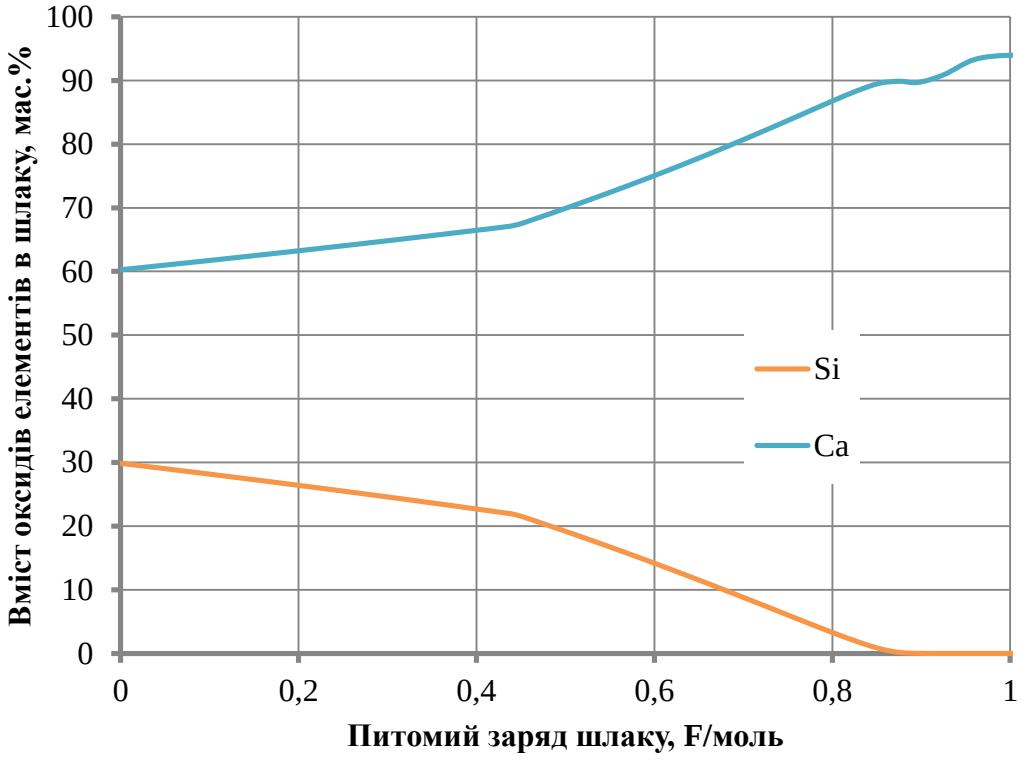
Рисунок 3.18 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 09Г2С: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



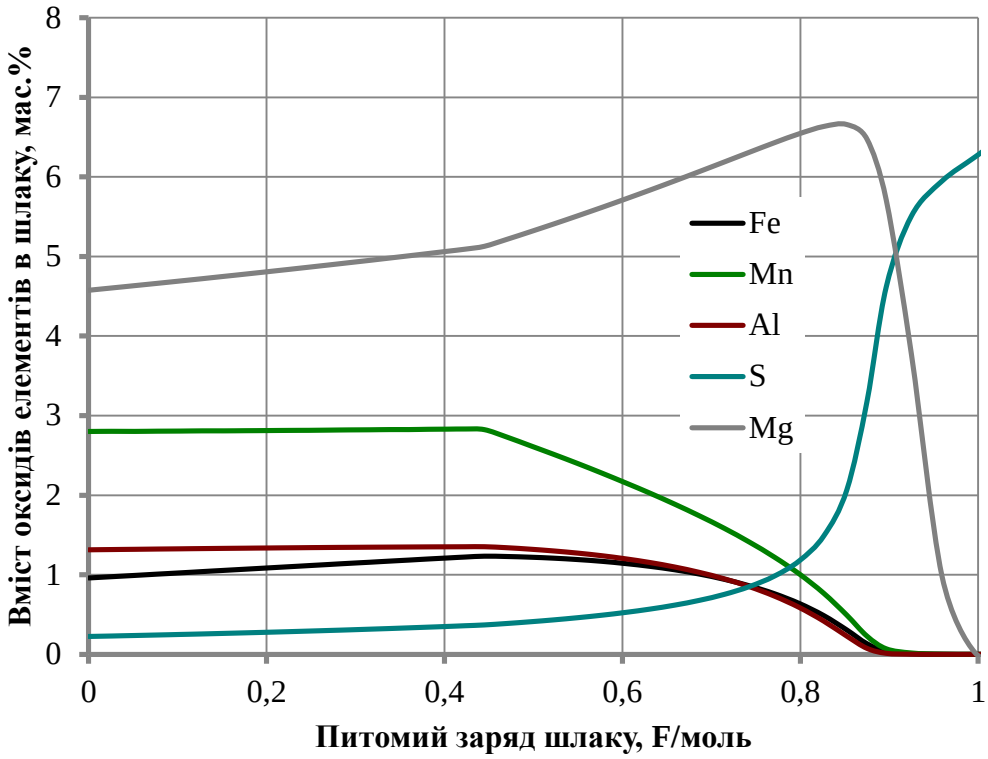
а)


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

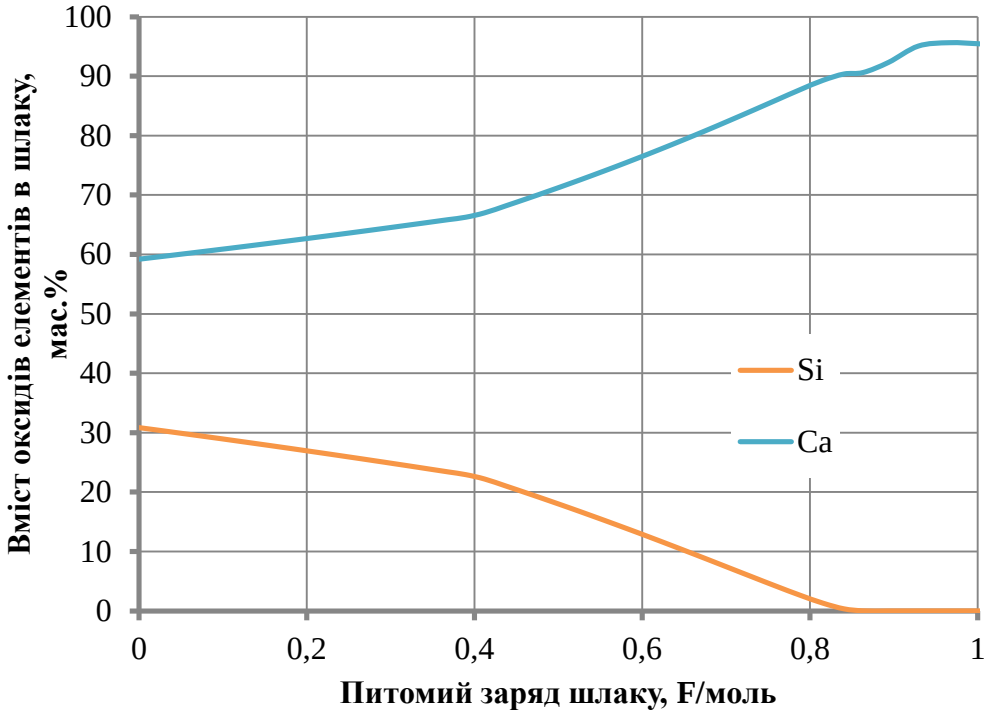
б)


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

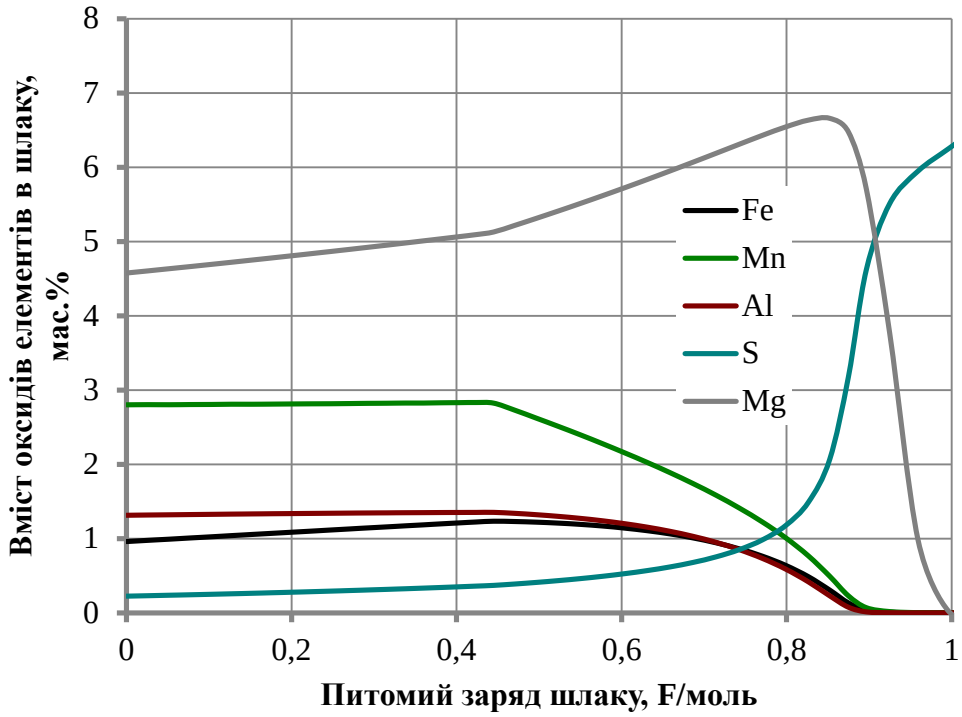
в)


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

г)

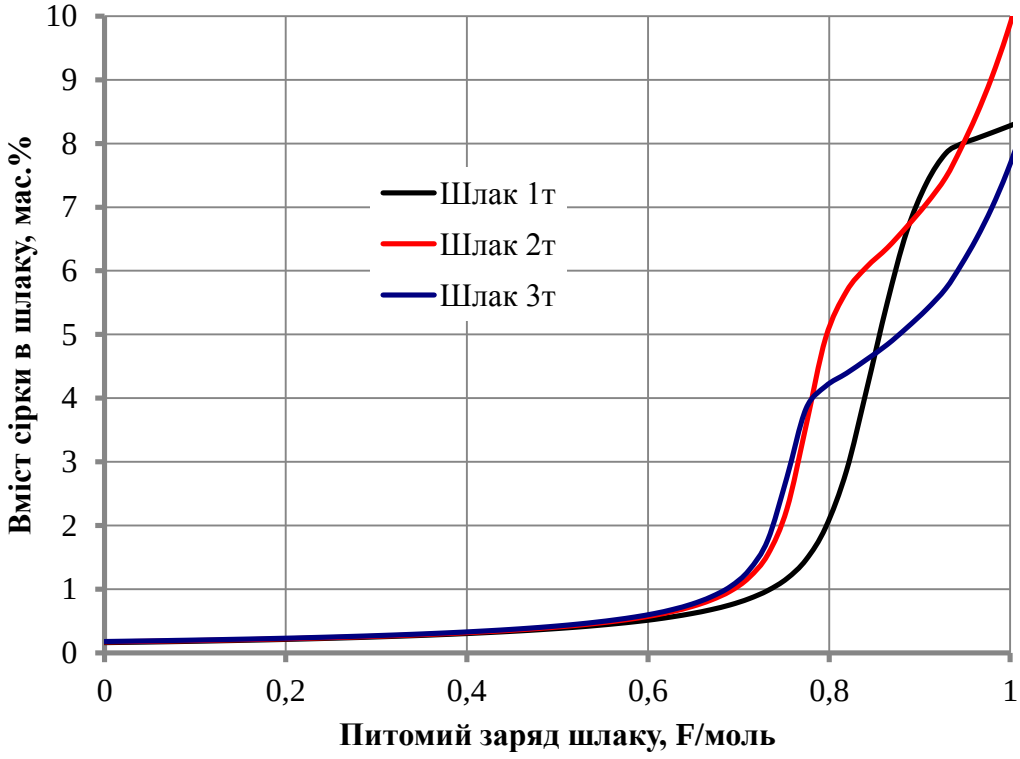

Вміст оксидів елементів в шлаку, мас.%
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Питомий заряд шлаку, F/моль
Si
Ca

д)

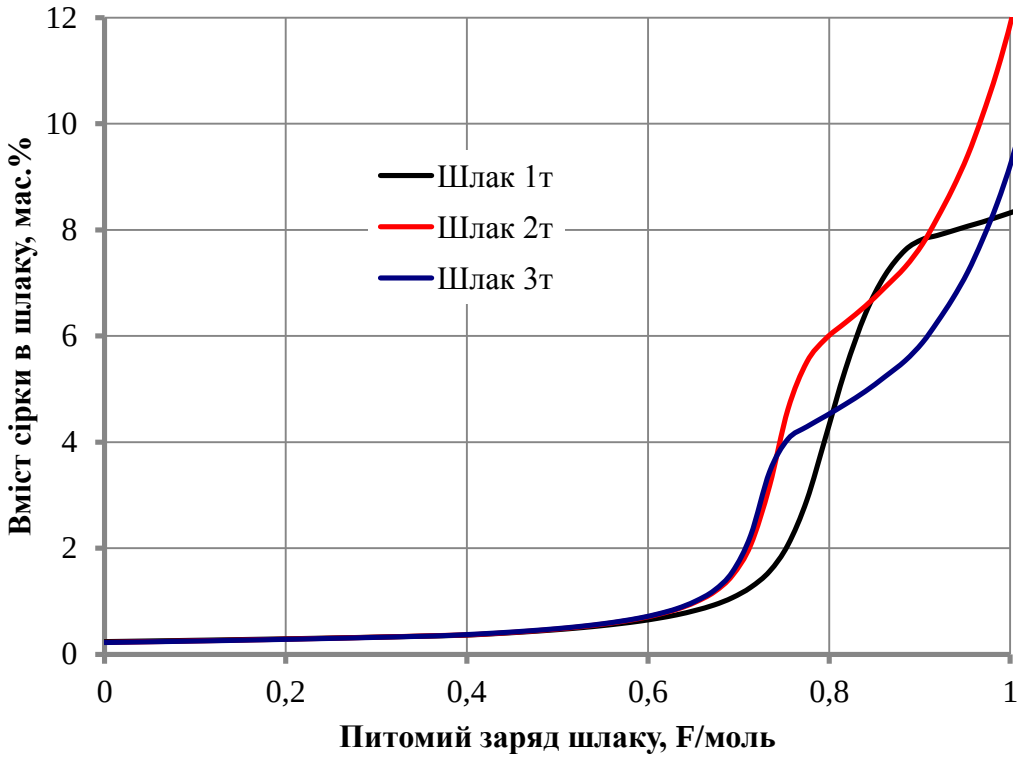


е)

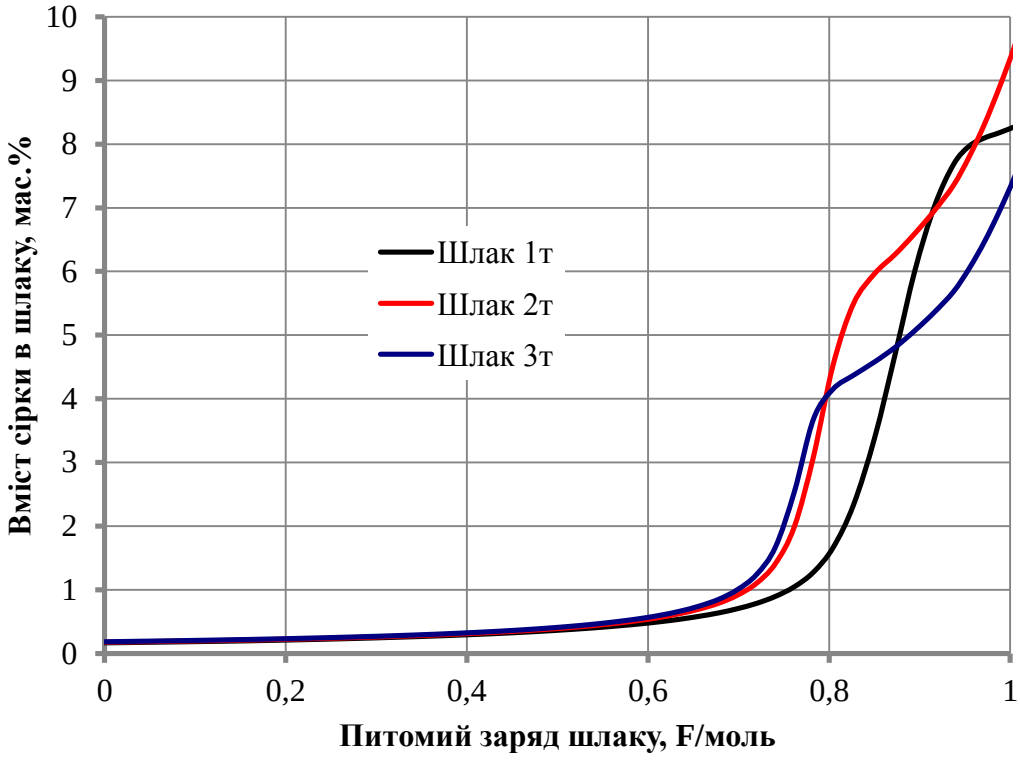
Рисунок 3.19 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксидів хімічних елементів у шлаку при легуванні сталі 30ГС: кремній, кальцій (а, в, д); сірка, алюміній, магній, залізо, марганець (б, г, е) при масі шлаку 1 т (а,б); 2 т (в, г); 3 т (д, е)



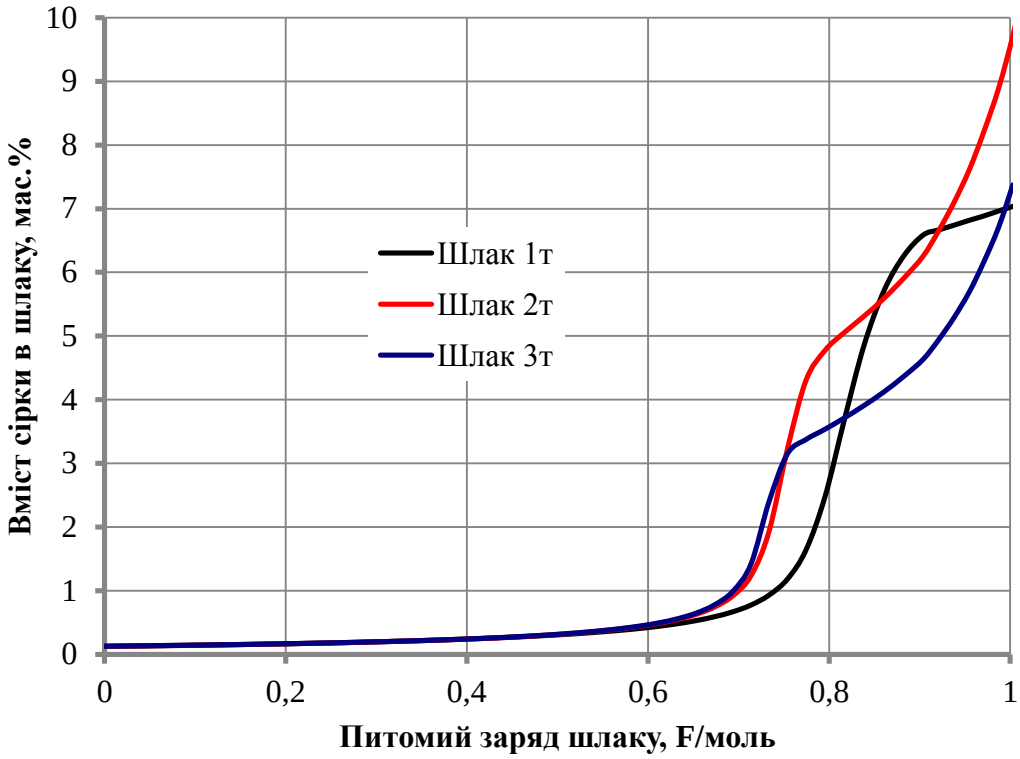
а)


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

б)

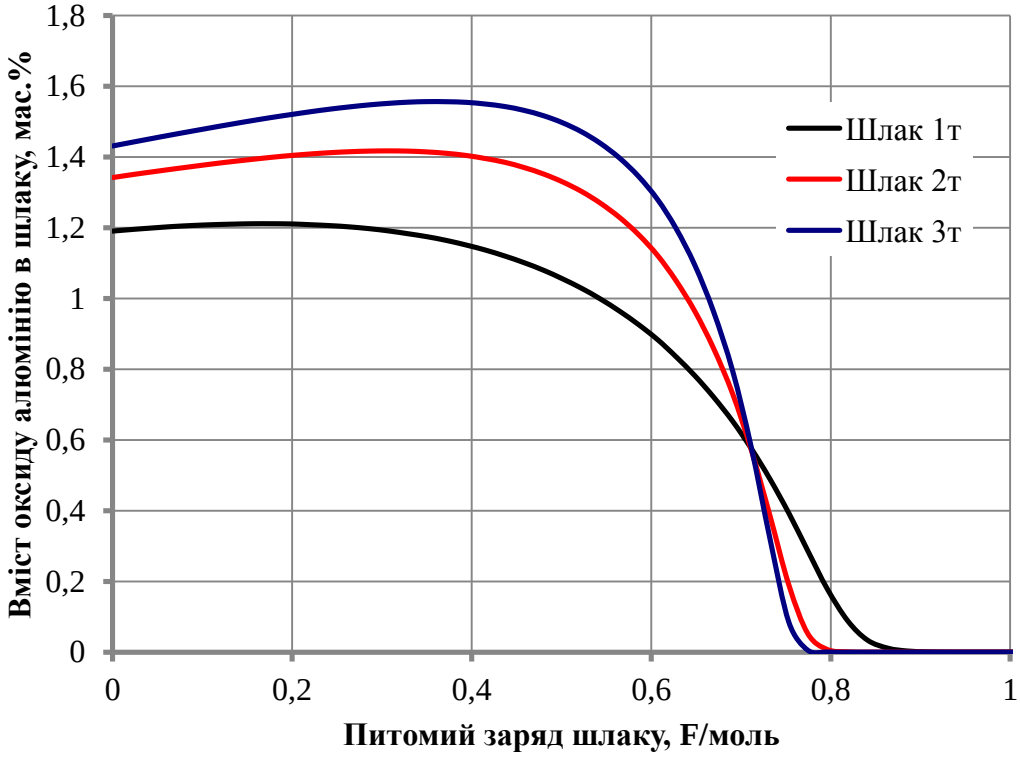

10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст сірки в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

в)

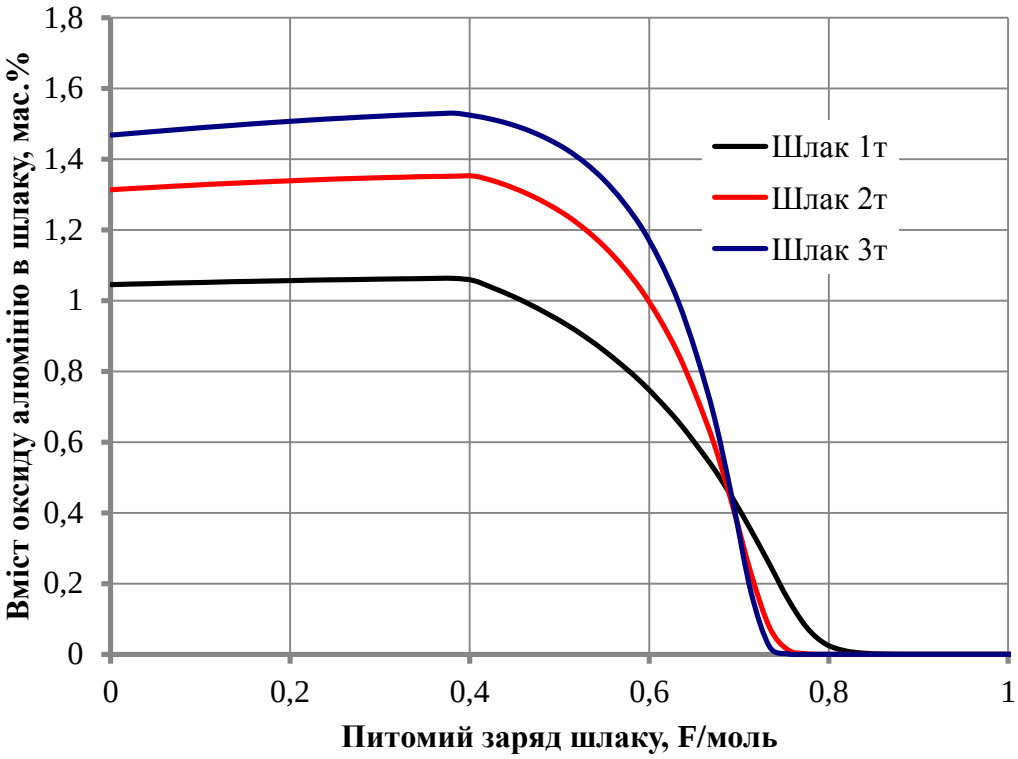


г)

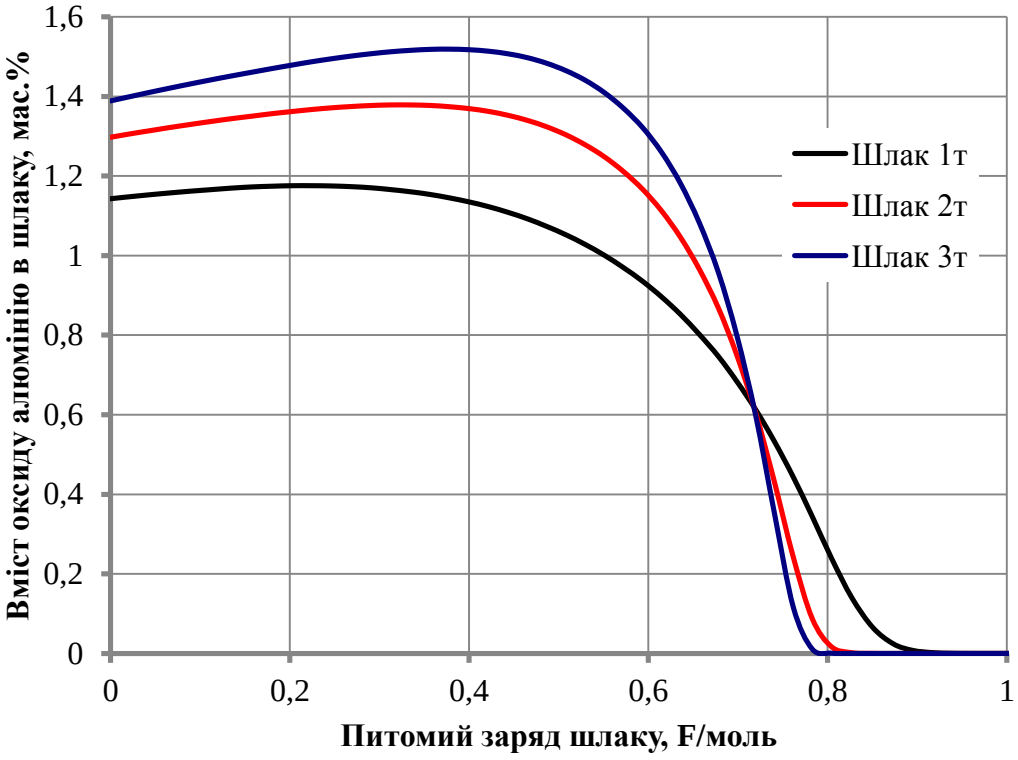
Рисунок 3.20 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст сірки в шлаку: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)



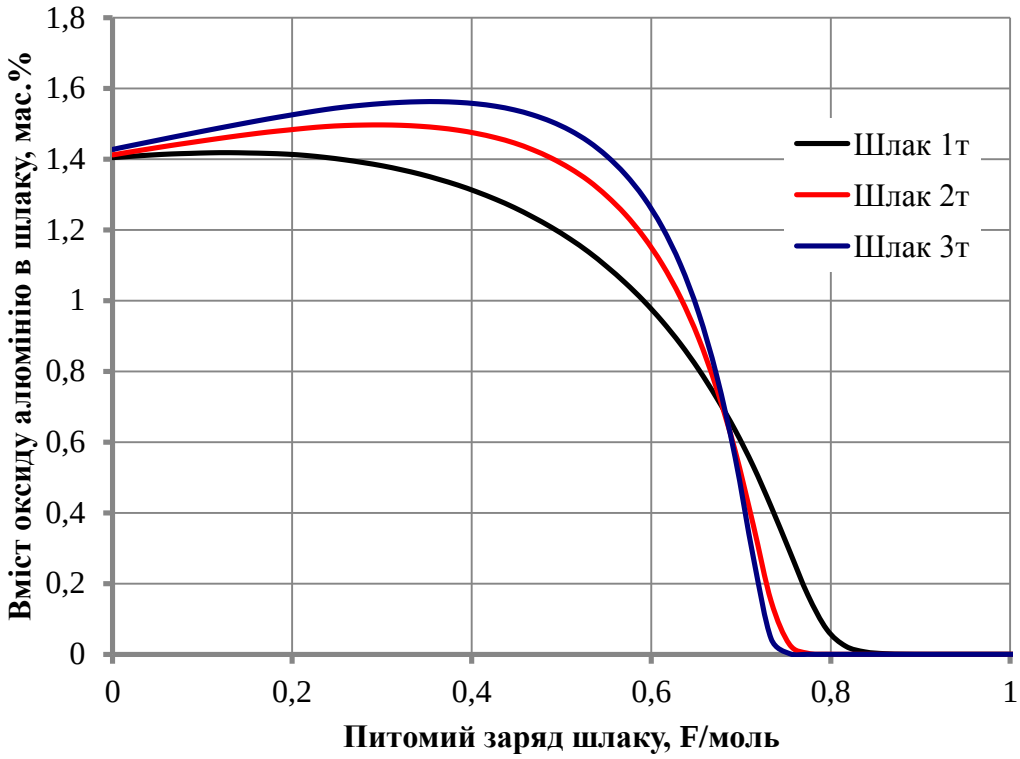
а)


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)

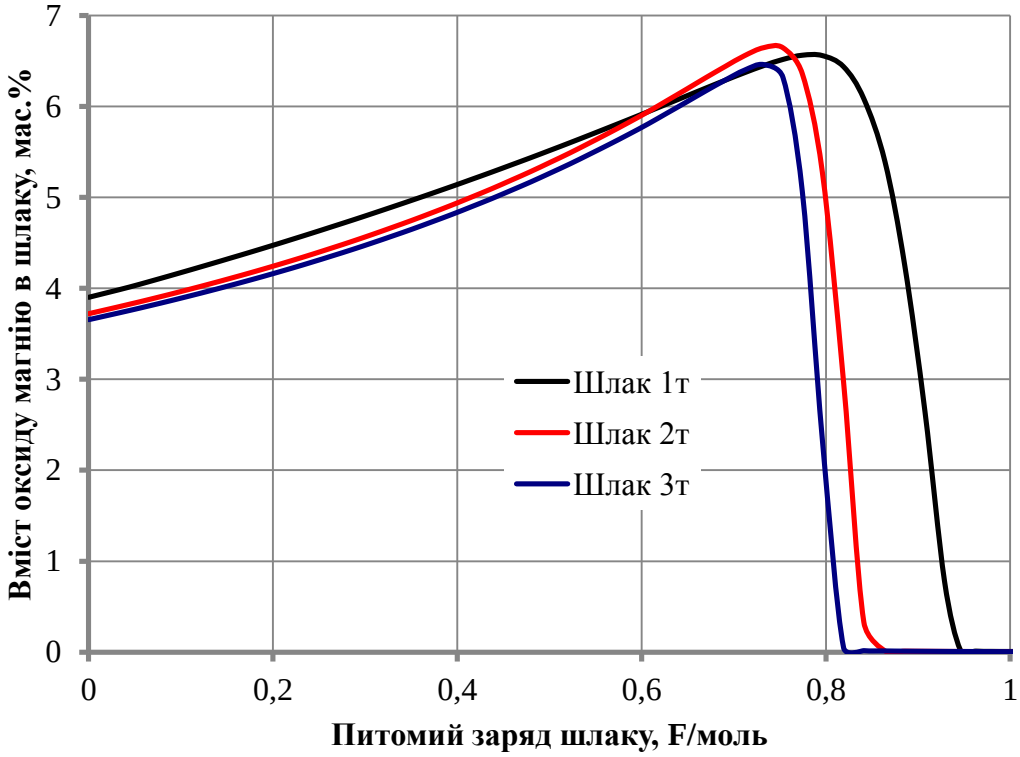

1,6
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
Вміст оксиду алюмінію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т

в)

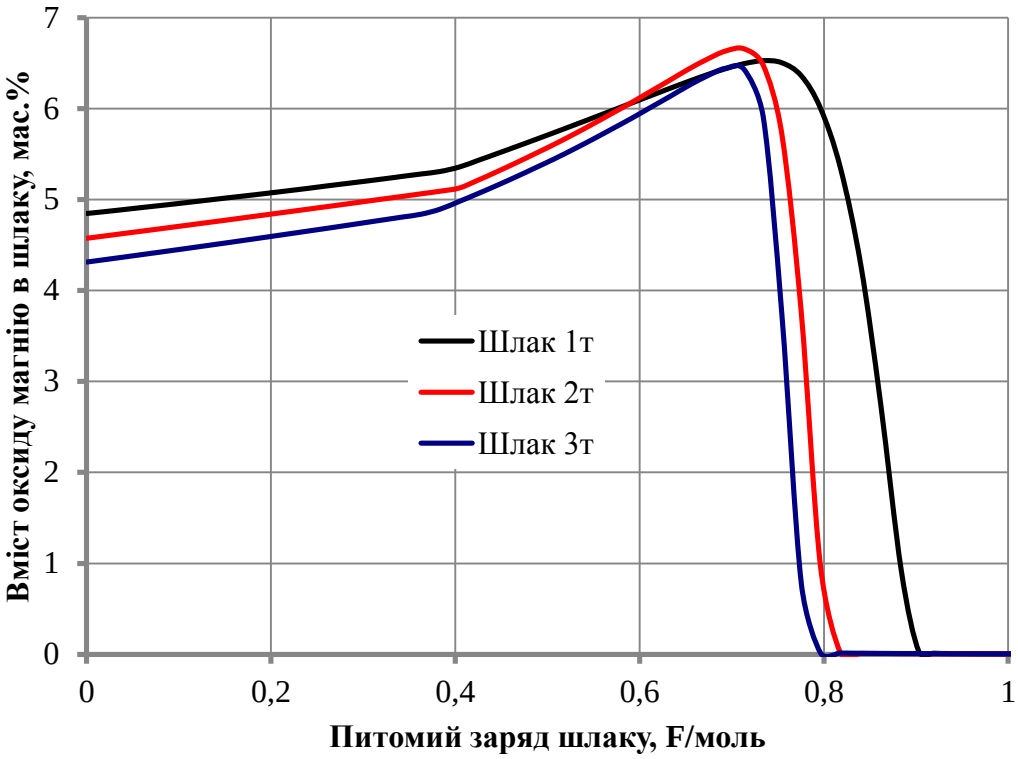


г)

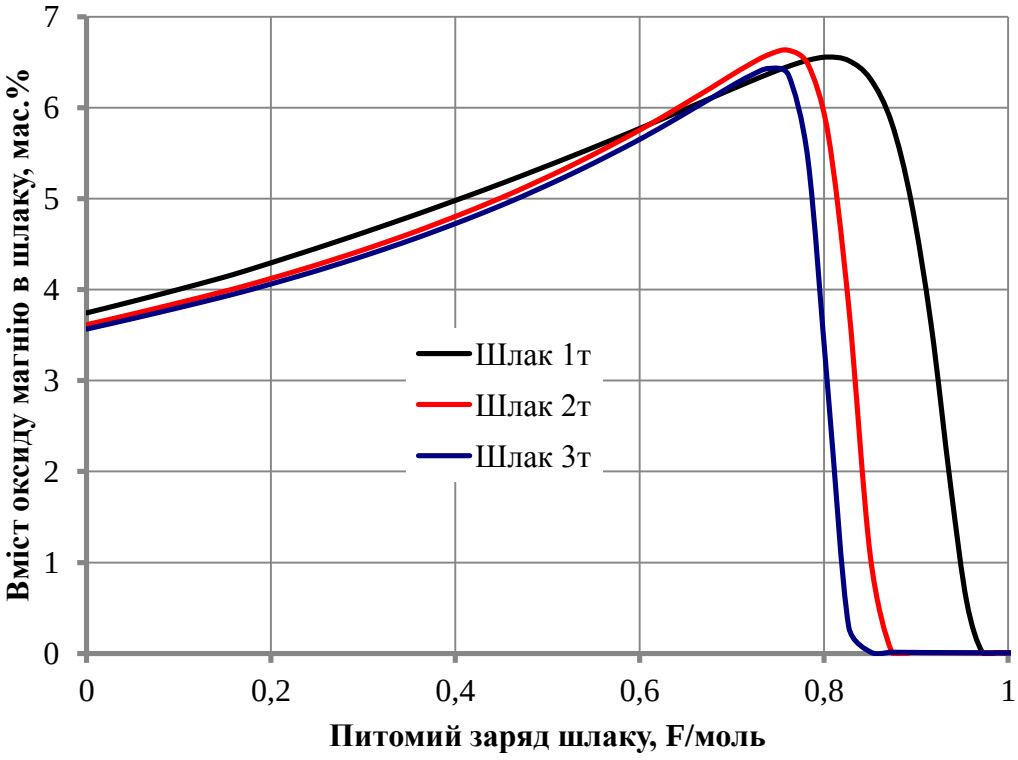
Рисунок 3.21 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксиду алюмінію в шлаку: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)



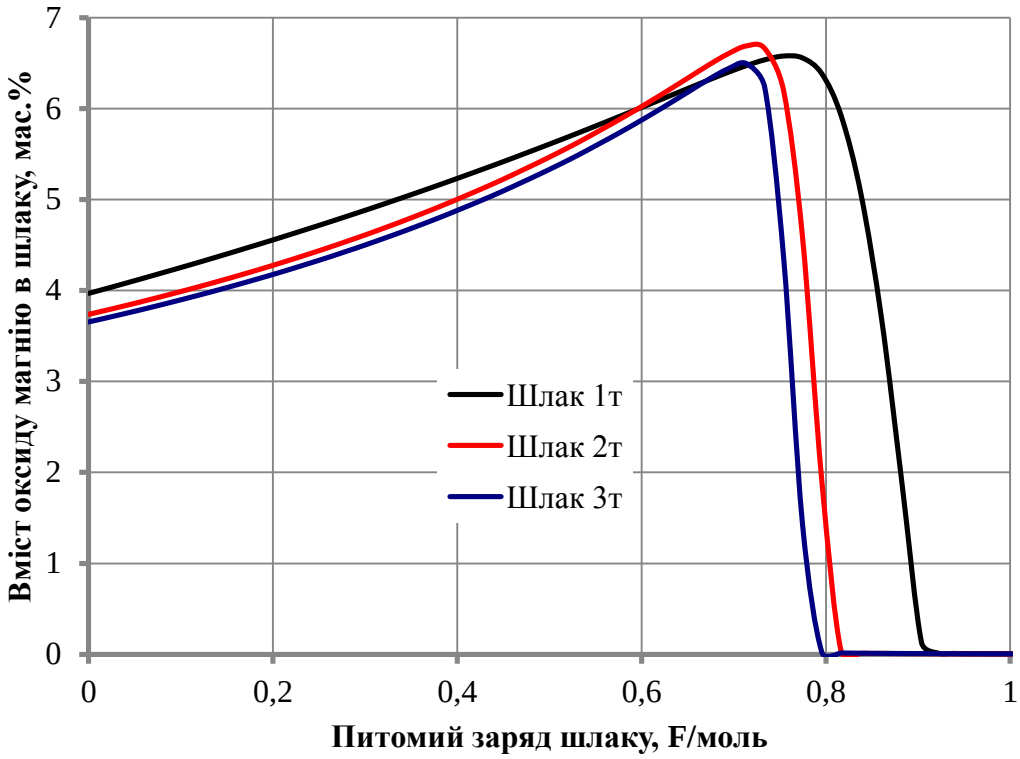
а)


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)

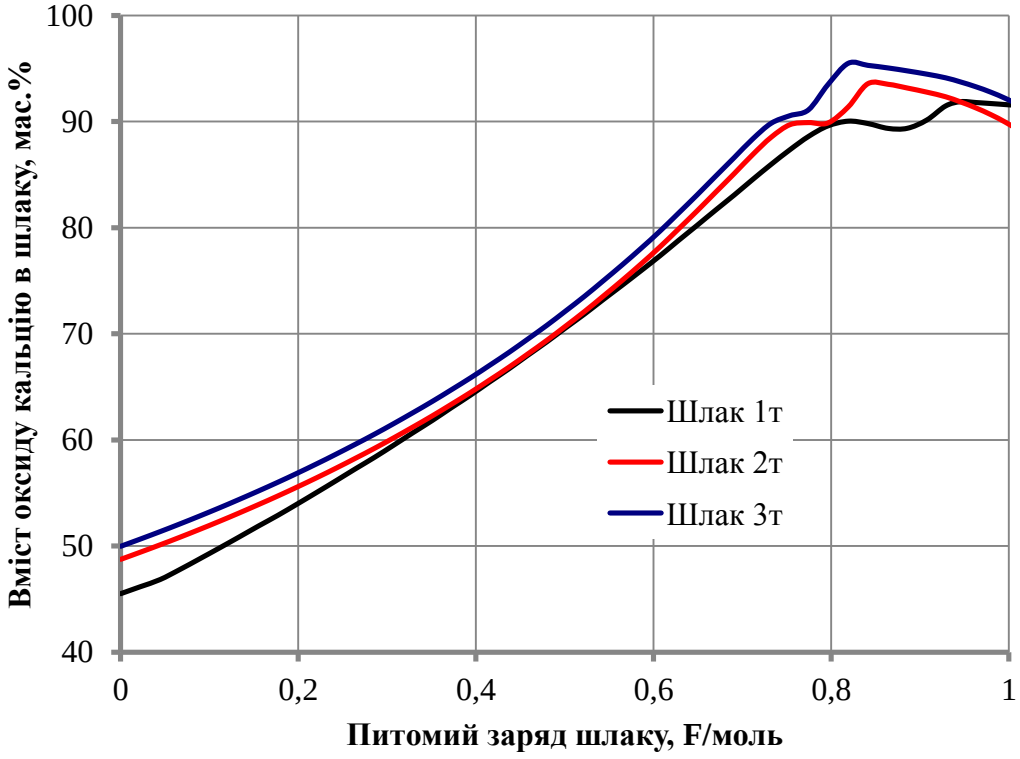

Вміст оксиду магнію в шлаку, мас.%
Питомий заряд шлаку, F/моль
Шлак 1т
Шлак 2т
Шлак 3т
0
1
2
3
4
5
6
7
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

в)

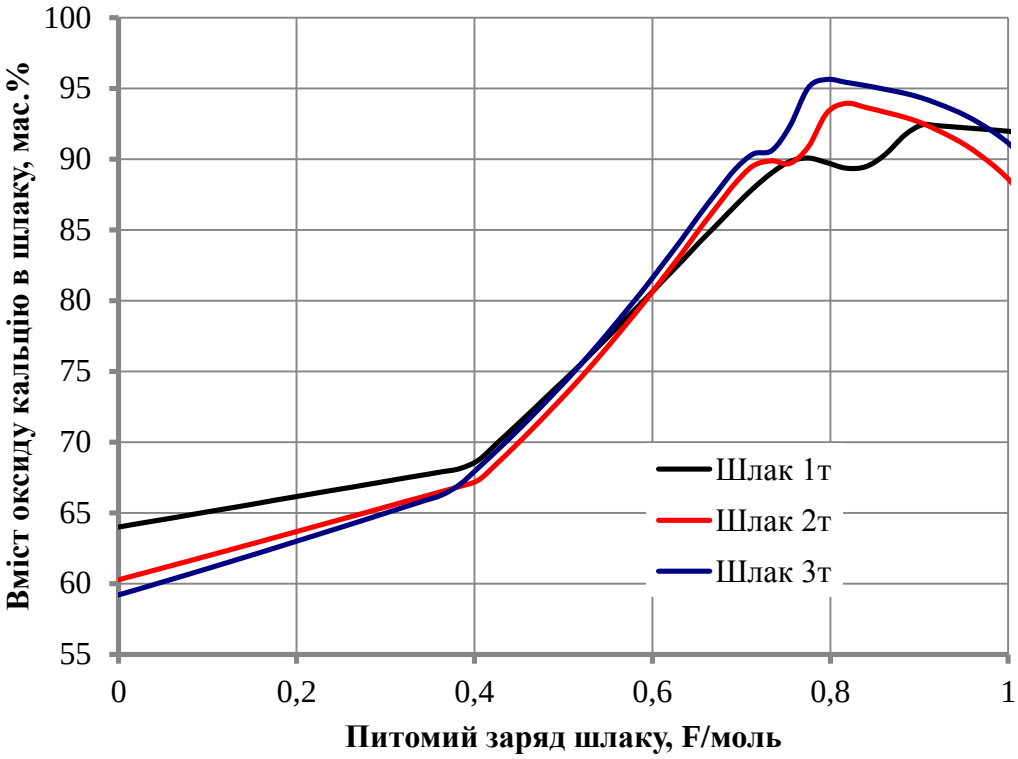


г)

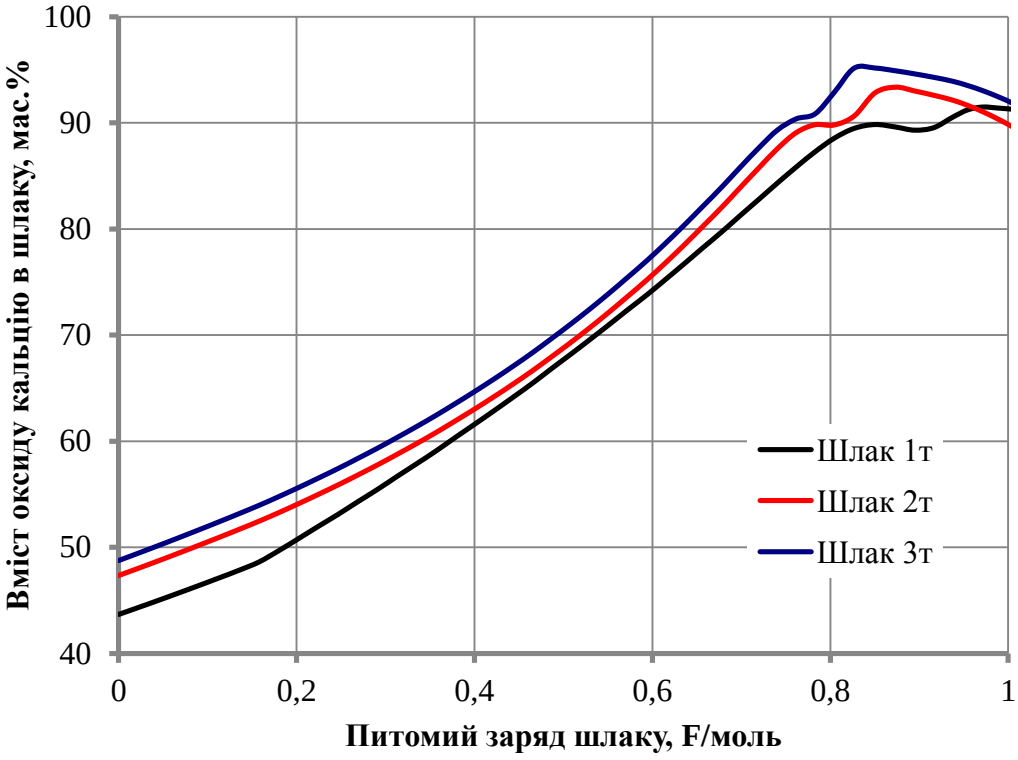
Рисунок 3.22 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксиду магнію в шлаку: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)



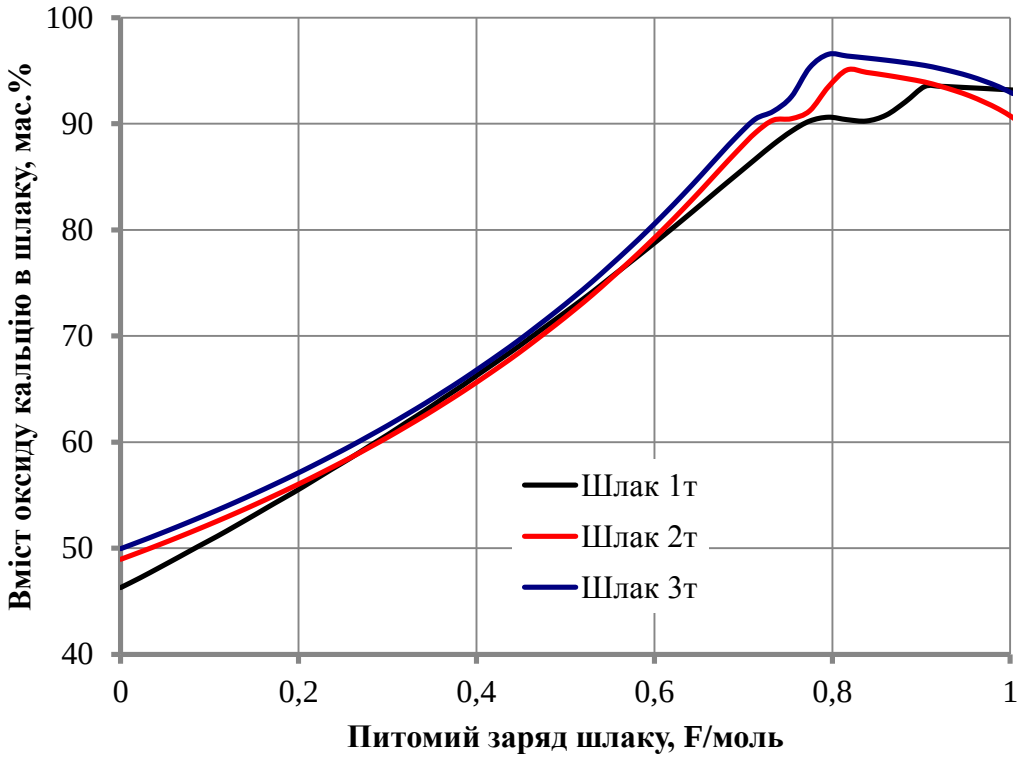
а)


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)


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

в)



г)

Рисунок 3.23 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на вміст оксиду кальцію в шлаку: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)

Дані, наведені на рисунках 3.16–3.23, демонструють систематичне збільшення вмісту сірки у шлаку при легуванні всіх марок сталі під час процесу ВЕЛР зі зростанням питомого заряду шлаку.

Важливо зазначити, що за високого рівня кисню й сірки шлак, який не є електронейтральним, може втратити стабільність, що зрештою перешкодить подальшому перебігу процесу ВЕЛР.

З підвищенням питомого заряду шлаку до значення 0,85 F/моль вміст оксиду кальцію у шлаку зростає з 50 до 90 мас.% Однак це не свідчить про абсолютне збільшення його кількості, якщо до системи не додається вапно. Збільшення процентного вмісту оксиду кальцію обумовлене переходом інших елементів у метал. У подальшому рівень оксиду кальцію залишається стабільним, частково завдяки додаванню вапна, що компенсує втрату маси

шлаку. При значному вмісті оксиду кальцію для його розрідження до складу шлаку необхідно вводити плавиковий шпат.

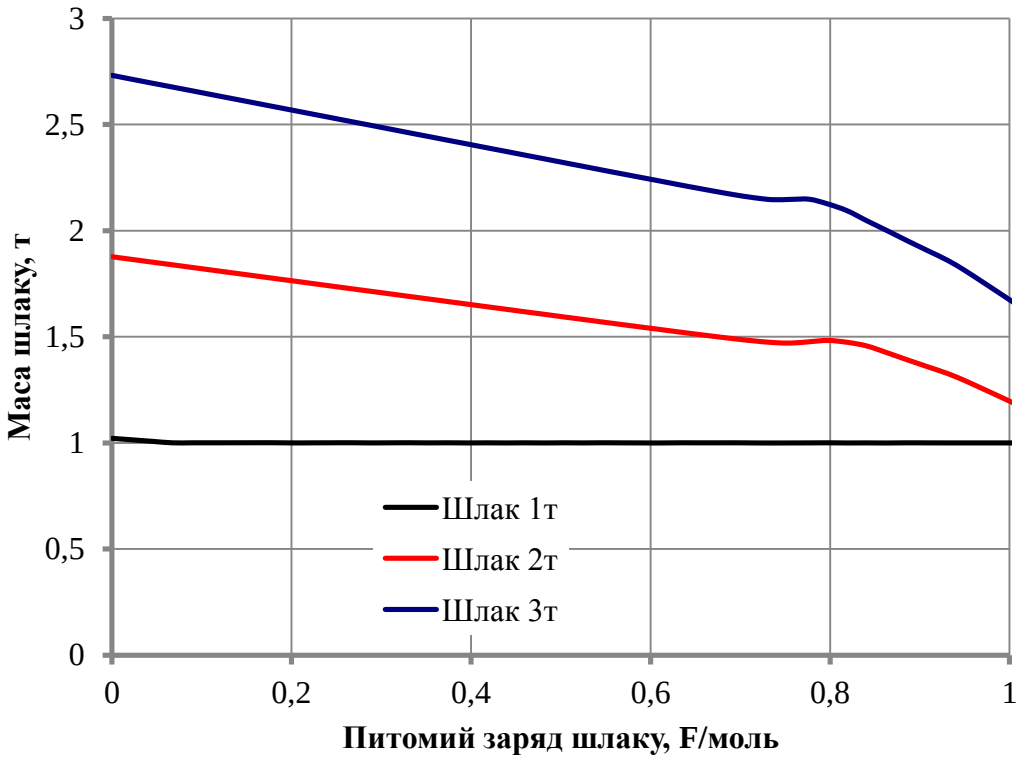
Елементи, такі як кремній, марганець, залізо та алюміній, при підвищенні питомого заряду шлаку до рівня ≥ 0,8 F/моль майже повністю відновлюються і переходять у метал. До досягнення цього значення їх концентрація у складі шлаку поступово знижується.

До рівня 0,75 F/моль у шлаку зростає процентний вміст магнію через зменшення кількості елементів, які перейшли до металу внаслідок відновлення. Згодом магній активно переходить у газову фазу і частково в метал, що призводить до його швидкого зниження у складі шлаку.

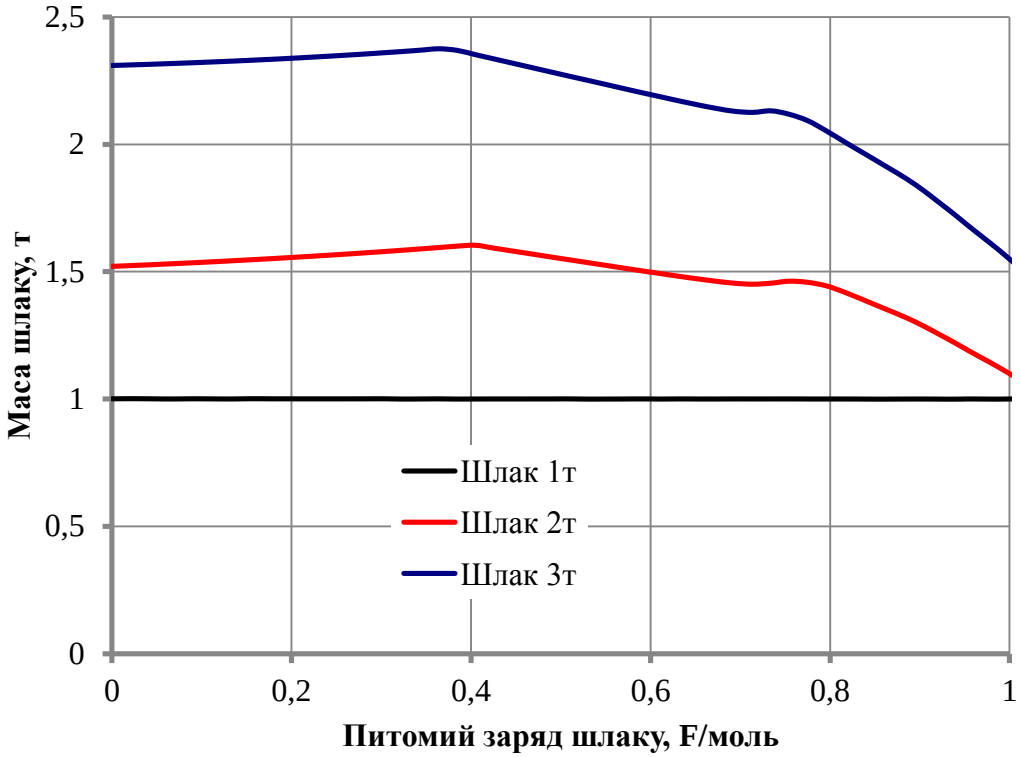
Аналогічно кальцій при високому рівні питомого заряду шлаку також активно переходить у газову фазу і частково до металу.

3.2.4 Вплив питомого заряду шлаку на кінцеву масу шлаку

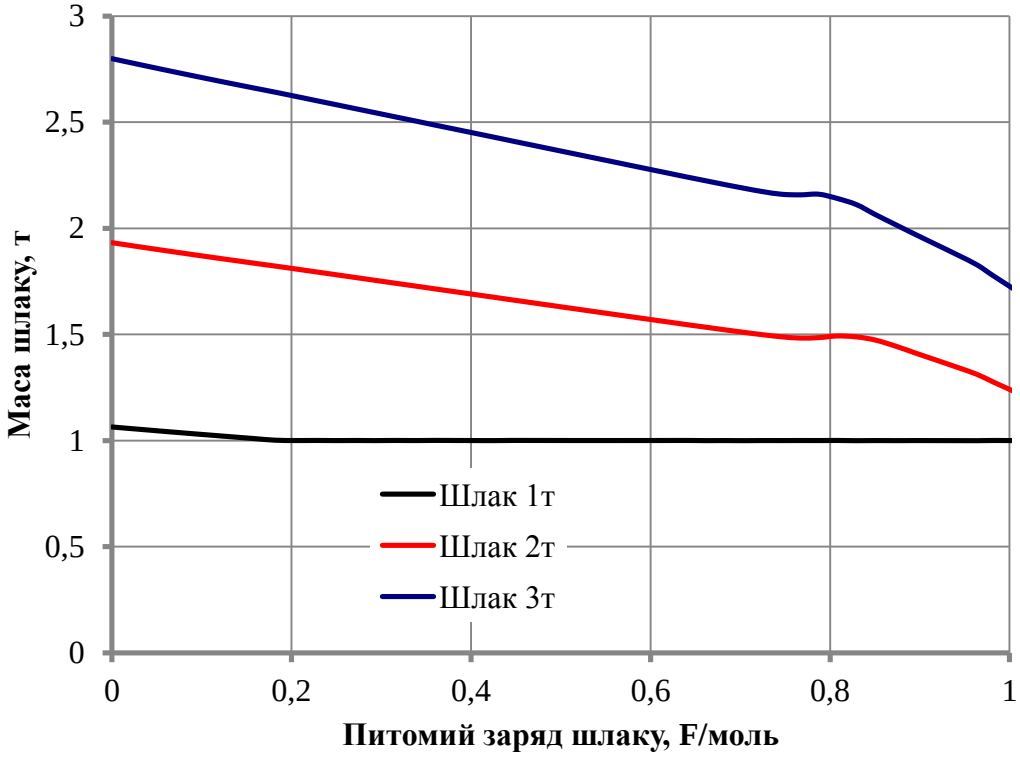
У проведеному експерименті застосовували сталі марок 14ХГС, 09Г2С, 30ГС та 12ГС. Аналізували вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на його кінцеву масу. Результати розрахунків представлені на рисунку 3.24.



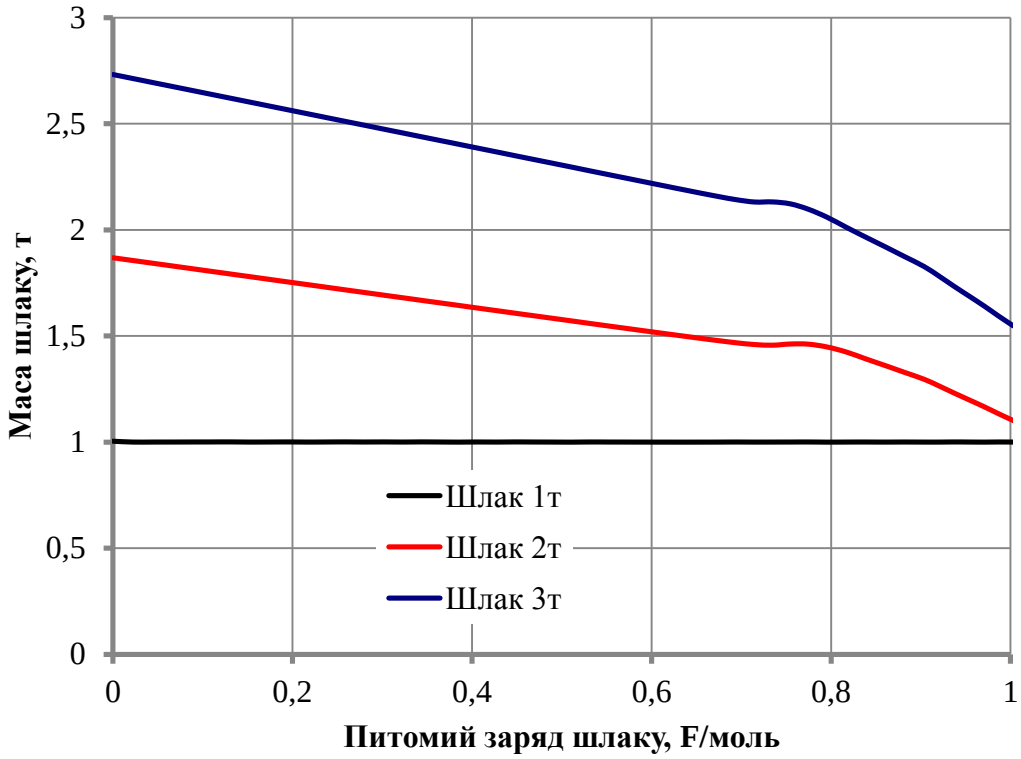
а)


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)


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

в)



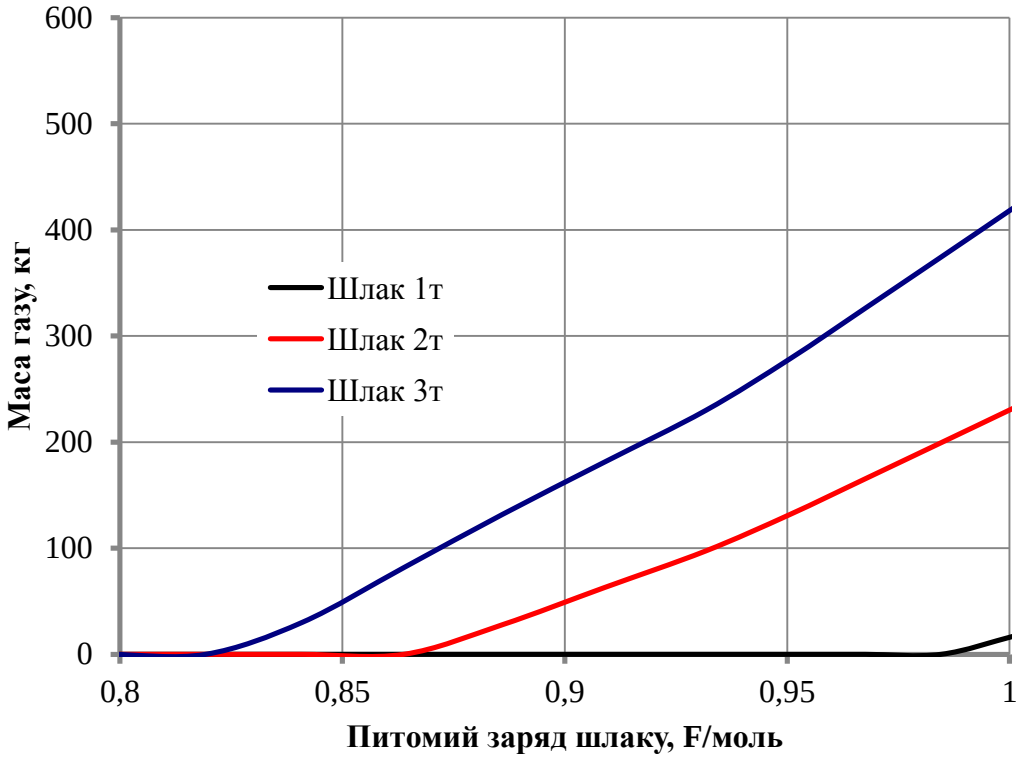
г)

Рисунок 3.24 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на кінцеву масу шлаку для сталей: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)

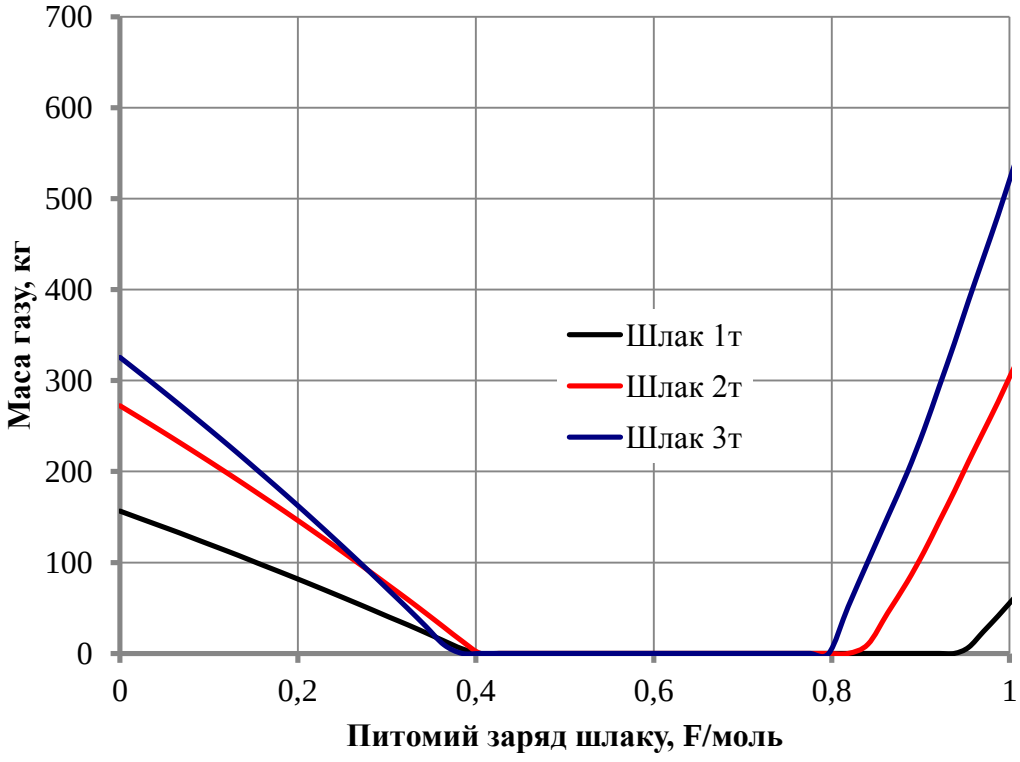
Дані, представлені на рис. 3.24 свідчать про те, що кінцева маса шлаку при легуванні сталі усіх марок системно знижується в процесі ВЕЛР при збільшенні питомого заряду шлаку за рахунок елементів, що відновилися і перейшли до металу. Виняток становить початкова маса шлаку 1 т, оскільки за умовами оптимізації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

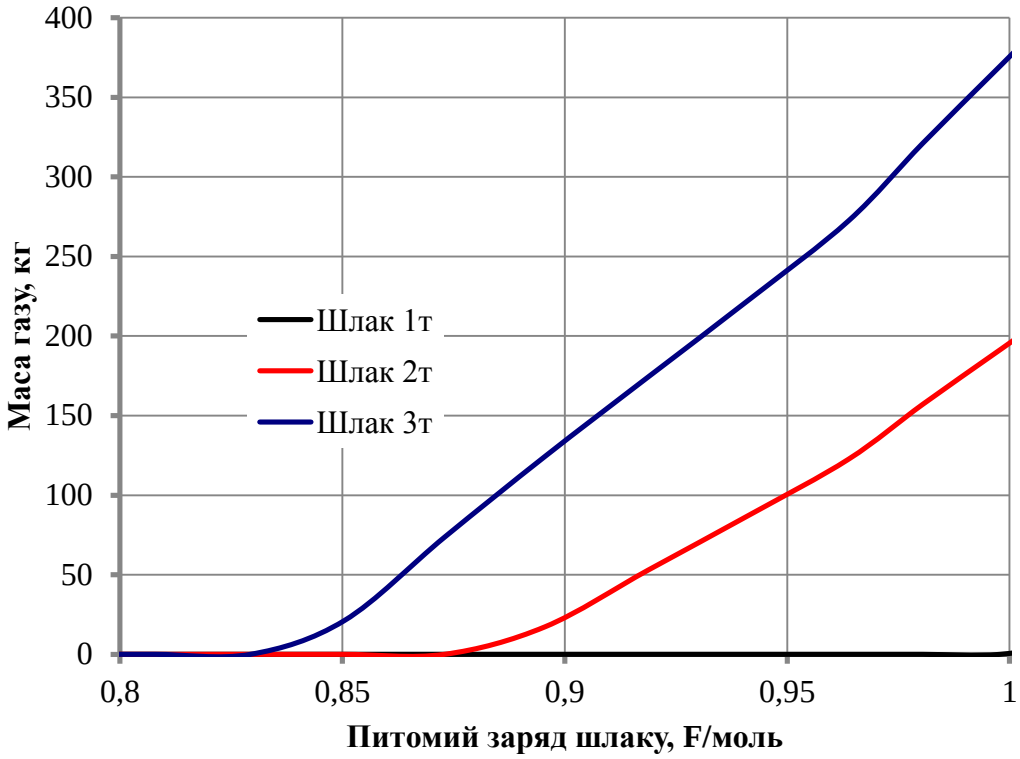
У проведеному експерименті застосовували сталі марок 14ХГС, 09Г2С, 30ГС і 12ГС. Вивчався вплив питомого заряду та маси шлаку на кількість утвореної газової фази. Результати відповідних розрахунків представлені на рисунку 3.25.


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

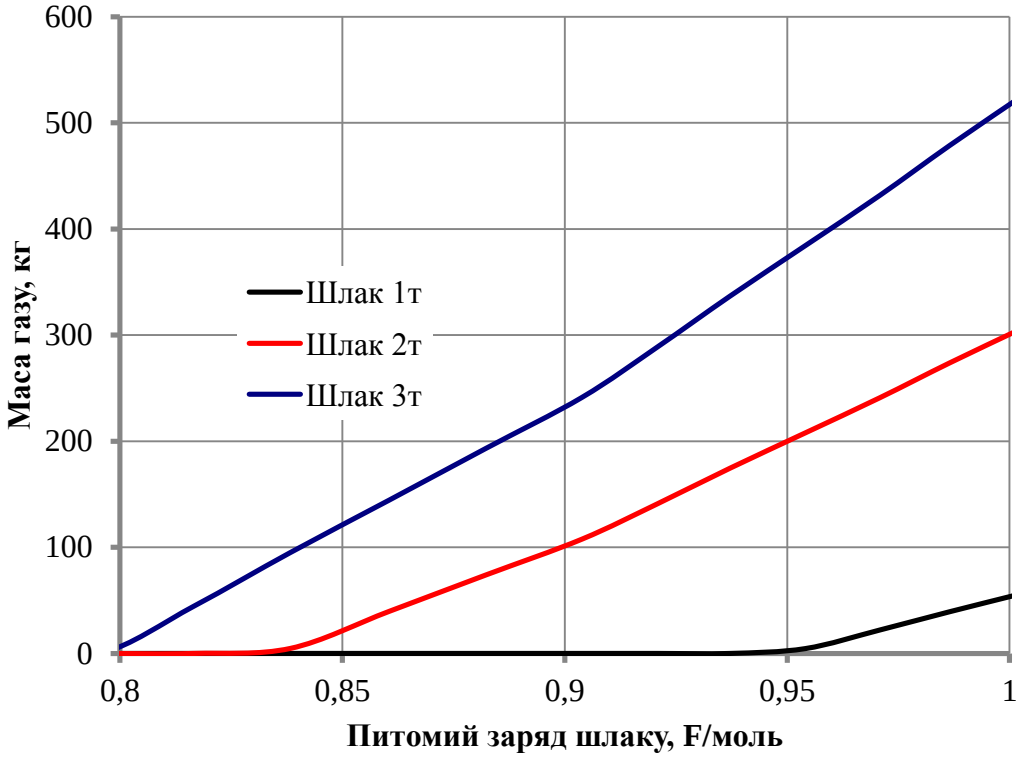
а)


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)



в)



г)

Рисунок 3.25 – Вплив питомого заряду та початкової маси шлаку на масу газової фази для сталей: 12ГС (а); 30ГС (б); 09Г2С (в); 14ХГС (г)

Дані, наведені на рисунку 3.25, демонструють, що маса газової фази збільшується під час легування сталей усіх марок у процесі ВЕЛР із ростом питомого заряду шлаку до рівня 0,8 F/моль і вище. За таких умов із системи переважно випаровуються кальцій і магній.

Водночас сталь марки 30ГС є винятком: при її легуванні газова фаза утворюється навіть за відсутності позитивного заряду шлаку. У діапазоні питомого заряду шлаку 0,4–0,8 F/моль утворення газів у системі повністю придушується завдяки розкисленню металу.

Склад газової фази під час легування будь-якої сталі у процесі ВЕЛР залишається стабільним за питомого заряду шлаку менше ніж 0,8 F/моль. За таких умов газова фаза, якщо вона утворюється (наприклад, у сталі марки 30ГС), переважно складається з монооксиду вуглецю CO.

При досягненні питомого заряду шлаку 0,8 F/моль і більше склад газової фази значно змінюється. Цей етап супроводжується активним утворенням газів. Найпершим починає випаровуватися магній, який досягає максимальної концентрації на рівні питомого заряду шлаку понад 0,9 F/моль. Одночасно відбувається інтенсивне випаровування кальцію, пік концентрації якого спостерігається за питомого заряду шлаку не менше 1,0 F/моль.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Забезпечення техногенної безпеки на підприємствах

Для забезпечення збереження життя, здоров’я та працездатності працівників у процесі їхньої трудової діяльності, Закон України «Про охорону праці» передбачає створення на підприємствах однойменної служби. Її функція полягає у контролі виконання низки заходів, спрямованих на підвищення рівня техніки безпеки. Основні завдання цієї служби включають:

1. Розробку та затвердження положень з питань охорони праці.

2. Створення інструкцій щодо виконання робіт та правил поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на робочих місцях і будівельних майданчиках.

3. Організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці.

4. Проведення вступних інструктажів з охорони праці при прийомі на роботу.

5. Забезпечення проведення регулярних медичних оглядів працівників.

6. Атестацію робочих місць відповідно до умов праці.

7. Надання працівникам засобів індивідуального захисту. Ці заходи спрямовані на створення безпечних умов праці та дотримання встановлених норм у всіх виробничих процесах.

Залежно від кількості працівників на підприємстві, функції служби охорони праці можуть виконуватися як окремим виробничим відділом, так і особами за сумісництвом, які пройшли відповідну профільну підготовку.

Техногенна безпека передбачає відсутність ризику виникнення аварій і катастроф на потенційно небезпечних об’єктах, здатних створити реальну загрозу.

Вимоги до дотримання техногенної безпеки повинні відповідати нормам захисту територій і населення від надзвичайних ситуацій, забезпечення охорони навколишнього середовища, підтримання санітарно-епідеміологічного благополуччя, а також вимогам пожежної, екологічної та

промислової безпеки, будівельних стандартів, охорони праці та національних стандартів.

Основні вимоги щодо організації техногенної безпеки в установах, на підприємствах, у зонах підвищеного ризику та організаціях визначені у «Правилах техногенної безпеки», затверджених наказом МВС від 05.11.2018 № 879.

Забезпечення техногенної безпеки на об’єктах здійснюється у випадках:

1. Наявності будівель або споруд із порушеннями умов експлуатації.

2. Ризику впливу зовнішніх факторів, таких як природні, соціальні, терористичні явища, що можуть загрожувати безпеці або діяльності об'єкта.

3. Наявності об’єктів із критичним станом виробничих фондів та значними порушеннями експлуатаційних умов.

4. Виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру через порушення правил експлуатації небезпечних об’єктів чи ядерних установок.

Для досягнення необхідного рівня техногенної безпеки підприємства здійснюють такі заходи:

1. Дотримуються вимог Кодексу цивільного захисту (КЦЗ), правил і стандартів у сфері техногенної безпеки, а також виконують розпорядження, приписи й постанови посадових осіб Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

2. Розробляють організаційно-розпорядчі документи з питань забезпечення техногенної безпеки та регулярно контролюють їхнє виконання.

3. Забезпечують працівників засобами колективного та індивідуального захисту.

4. Організовують навчання персоналу щодо дій у надзвичайних ситуаціях.

5. Проводять розробку інженерно-технічних заходів із цивільного захисту під час будівництва, реконструкції чи модернізації об’єктів, які

входять до переліку тих, що потребують проектування з урахуванням цих заходів відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 № 6.

6. Забезпечують навчання працівників із питань укриття в захисних спорудах цивільного захисту та підготовку персоналу, відповідального за утримання та експлуатацію цих споруд, згідно з наказом Міністерства внутрішніх справ № 579 від 09.07.2018.

7. Регулярно проводять об’єктові тренування та навчальні заходи з питань цивільного захисту із врахуванням вимог техногенної безпеки.

Відповідно до порядку видачі дозволів на виконання робіт підвищеної небезпеки та експлуатацію (застосування) машин, механізмів та устаткування підвищеної небезпеки, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1107 від 26 жовтня 2011 року, суб’єкти господарювання, чия діяльність пов’язана з такими роботами або експлуатацією відповідного обладнання, зобов’язані отримати відповідний дозвіл. Цей документ видається територіальним органом Держпраці за місцем державної реєстрації юридичної особи або фізичної особи-підприємця.

Для визначення об’єктів підвищеної небезпеки серед потенційно небезпечних об’єктів на підприємствах, у власності або користуванні яких знаходяться місця, де використовуються, виготовляються, переробляються, зберігаються чи транспортуються небезпечні речовини, проводиться їхня ідентифікація.

Якщо за результатами ідентифікації об’єкт визначається як об’єкт підвищеної небезпеки відповідно до Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» (із внесеними змінами згідно із Законом №762-IV від 15 травня 2003 року), підприємство повинно розробити Декларацію безпеки такого об’єкта. Крім того, для кожного подібного об’єкта розробляється План локалізації і ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС), що охоплює всі аспекти експлуатації чи запланованої діяльності цього об’єкта.

4.2 Мікроклімат

Метеорологічні умови робочого середовища залежать від таких основних чинників, як температура, відносна вологість, рух повітря та рівні теплового випромінювання. Несприятливі погодні й кліматичні фактори можуть призводити до серйозних патологічних змін в організмі людини та спричиняти захворювання.

Для підтримання оптимальних умов праці в різні пори року на робочих місцях впроваджуються системи опалення та вентиляції.

Влітку для очищення повітря та забезпечення його необхідної якості застосовуються аераційні системи, до складу яких входять аераційні ліхтарі. У теплий сезон температура повітря у виробничих приміщеннях не повинна перевищувати температуру зовнішнього повітря більше ніж на 5°С і має залишатися у межах до 28°С.

В холодну пору року в приміщеннях з постійною чи тривалою присутністю обслуговуючого персоналу обов’язково встановлюються системи опалення та опалювальні прилади, зокрема батареї. Ворота та інші великі отвори забезпечуються повітряними або тепловими завісами з механічним приводом для мінімізації тепловтрат.

Як надмірно низька, так і занадто висока вологість повітря негативно впливають на здоров’я працівників. Оптимальний рівень відносної вологості повітря становить 75%, а швидкість його руху – 0,5 м/с.

4.3 Склад повітря робочої зони

Склад повітря робочої зони наведено у таблиці 4.1. Гранично допустима концентрація (ГДК) речовин у повітрі за більшості показників має відповідати вимогам ГОСТ 12.1005-88 «Загальні вимоги до повітря робочої зони».

Для очищення забрудненого повітря рекомендується використовувати загальнообмінну витяжну вентиляцію.

Таблиця 4.1 – Склад повітря робочої зони

Інгредієнт	Фактичний, мг/м^3	ГДК, мг/м^3
Пил (з домішкою SiO_2)	3.8	4.0
Сірчаний ангідрид	2.66	10
Оксиди азоту	1.79	5
Оксид вуглецю	3.3	20

4.4 Виробниче освітлення

У виробничих цехах зазвичай передбачене як штучне, так і природне освітлення. Сонячне світло потрапляє до приміщення через світлові отвори. Вибір джерела освітлення залежить від специфіки виконуваних робіт, умов довкілля та розмірів приміщення.

Лампи розжарювання зазвичай використовуються у приміщеннях, де виконуються порівняно грубі роботи (із нормованою освітленістю до 50 лк), а також для локального освітлення робочих зон. Для загального освітлення у цехах найчастіше застосовують газорозрядні лампи, які обов’язково оснащуються захисними плафонами.

Природне освітлення в цехах забезпечується через вікна у стінах та світлові ліхтарі, розташовані у покрівлі будівлі. При цьому коефіцієнт природної освітленості повинен становити 3.

На окремих робочих місцях може бути організоване виключно штучне освітлення.

У випадку виходу з ладу основного робочого освітлення для забезпечення безперебійного функціонування приміщення, а також для полегшення евакуації у разі аварійних ситуацій, у цехах передбачають аварійне освітлення. Таке освітлення підключається до незалежного джерела електроживлення.

Для контролю за рівнем освітленості використовуються спеціальні прилади – люксметри.

4.5 Виробничий шум

Занадто багато шуму погано впливає на здоров'я, викликає травми і знижує ефективність роботи. Працюючи в шумному середовищі протягом усього дня, ми відчуваємо втому в вухах. Якщо шум триває занадто довго і перевищує допустимі рівні, це може призвести до втрати слуху. Шум високих частот шкодить органам, які допомагають нам зберігати рівновагу. Допустимий рівень шуму становить 80 дБ.

Щоб зменшити рівень шуму, рекомендується використовувати засоби індивідуального захисту, такі як антифони та спеціальні комбіновані рукавички з бавовняної тканини та гуми.

4.6 Виробничі вібрації

Нормативні документи щодо класифікації, гігієнічних стандартів та вимог до вібраційних параметрів промислового обладнання, включно з транспортними засобами, регламентуються державним стандартом ГОСТ 12.1.012-90 «Вібраційна безпека».

При значних частотах, що перевищують 16-20 Гц, вібрація, як правило, супроводжується шумом. Сприйняття вібрації людиною починається при коливальній швидкості на рівні $1 \cdot 10^{-4}$ м/с, тоді як больові відчуття виникають при швидкості понад 1 м/с.

Пролонгований вплив високочастотної вібрації може спричинити розвиток вібраційної хвороби, яка уражає нервово-м'язову та серцево-судинну системи організму, а також призводить до пошкодження суглобів. У таких випадках можлива повна втрата функціональності або працездатності. Для моніторингу та вимірювання вібрації у виробничих приміщеннях застосовуються віброщупи, які належать до категорії неелектричних вимірювальних пристроїв.

З метою захисту від вібрації та шуму рекомендується:

- Впровадження менш шумних та віброактивних технологічних процесів замість існуючих;
- Влаштування масивних фундаментів, конструктивно відокремлених від основних будівельних конструкцій, з використанням акустичних розривів (швів);
- Застосування віброізолюючих прокладок та амортизаторів;
- Обладнання джерел підвищеного шуму звукоізолюючими кожухами;
- Використання звукоізоляційних та звукопоглинальних матеріалів;
- Застосування засобів індивідуального захисту від шуму та вібрації, а також реалізація комплексних організаційно-гігієнічних заходів.

4.7 Виробничі випромінювання

На виробничих ділянках гарячої прокатки металу фіксуються значні теплові випромінювання. Відповідно до санітарних норм, допустимий рівень теплового випромінювання становить 140 Вт/м², тоді як на пресових ділянках він сягає 245 Вт/м².

З метою запобігання осліпленню персоналу рекомендується використання захисних окулярів із кольоровими лінзами (світлофільтрами).

Для зниження теплового випромінювання у виробничих приміщеннях максимально зменшують температуру джерел променистого тепла.

Крім зменшення інтенсивності випромінювання, для захисту персоналу від надмірного тепла між джерелами тепловипромінювання та робочими місцями встановлюють екрани або захисні завіси, що поглинають інфрачервоне випромінювання.

Повне блокування теплового випромінювання досягається за допомогою пустотілих екранів з циркулюючою водою або при постійному зволоженні водою звичайних екранів, виготовлених з листової сталі. У випадках, коли технологічний процес вимагає постійного візуального

контролю, екрани виготовляють із прозорих матеріалів або дрібнокоміркової металевої сітки.

Гідравлічні завіси у вигляді суцільного потоку води, а також водоструминні або водоповітряні завіси, дозволяють знизити вплив теплового випромінювання на робочих місцях на 60-85%, при цьому видимість крізь них істотно не погіршується. Застосування гідравлічних завіс є доцільним в операційних отворах камерних печей та печей із висувним подом, а також у зонах маніпуляцій з гарячим металом.

4.8 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Юридичною підставою для діяльності у сфері пожежної безпеки слугують Конституція України та Закон України «Про пожежну безпеку».

Відповідно до ДСТУ 2272-93, пожежна безпека на об'єкті досягається за допомогою системи попередження пожеж, системи протипожежного захисту та організаційних заходів. Необхідно в будь-яких умовах гарантувати пожежну безпеку об'єкта та безпеку людей.

Під час проєктування промислових об'єктів необхідно дотримуватися обов'язкових вимог пожежної безпеки. До них належать: обґрунтоване розташування будівель і споруд на території підприємства з огляду на вибухонебезпечність, вибухопожежонебезпечність та пожежонебезпечність технологічних процесів окремих цехів, а також створення оптимальних умов для недопущення поширення та ліквідації пожеж. Також важливими є наявність доріг, що забезпечують безперешкодний доступ пожежних підрозділів у випадку пожежі, та оптимальне прокладання комунікацій відповідно до вимог пожежної безпеки.

Цехи повинні бути обладнані пожежними гідрантами, ємностями з піском, пожежними шлангами, стендами з інструментом для пожежогасіння, відрами, а кожне робоче місце має бути забезпечене вогнегасником.

З метою попередження пожеж та вибухів у цехах слід суворо дотримуватися правил пожежної безпеки. До ключових умов запобігання

пожежі належать недопущення утворення горючого середовища та виникнення джерел займання.

Потенційними джерелами горючого середовища можуть бути випари мастильних матеріалів у разі порушення герметичності трубопроводів, а також ризик витоку газу від методичних печей.

Ключові ризики загорянь від електрообладнання пов'язані із займанням ізоляції проводів та коротким замиканням. Головною причиною займання ізоляції є надмірний нагрів проводів. Для попередження займання ізоляції та короткого замикання проводів необхідно використовувати плавкі запобіжники або спеціальні автоматичні вимикачі, що відключають електричну мережу у випадку перевантаження.

Організаційні заходи із забезпечення пожежної безпеки включають: організацію пожежної охорони об'єкта спеціалізованими формуваннями; розробку та впровадження правил і норм пожежної безпеки, правил дотримання протипожежного режиму та визначених заходів для ліквідації виниклих пожеж; а також навчання персоналу заходам пожежної безпеки.

Протипожежний захист реалізується шляхом використання негорючих або важкогорючих матеріалів, обмеженням обсягів займистих речовин та ізоляцією горючого середовища. Він також передбачає застосування ефективних засобів пожежогасіння, забезпечення вільної евакуації людей, використання засобів індивідуального та колективного захисту, впровадження систем сигналізації та організацію протипожежної служби.

Для унеможливлення розповсюдження вогню встановлюються протипожежні бар'єри. До них належать негорючі перекриття та протипожежні стіни. Протипожежні відстані між будівлями та спорудами визначаються відповідно до класу вогнестійкості будівель та категорії вибухопожежонебезпеки виробництва.

У разі виникнення надзвичайних ситуацій, зокрема пожеж, персонал керується планом ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Підтверджена можливість глибокого розкислення і десульфурації сталі за умови підвищеного питомого заряду та збільшеної маси шлаку. Однак фактичний вміст кисню і сірки залежить від кінетичних та технологічних особливостей процесу ВЕЛР. В експериментальних дослідженнях найменший рівень сірки був зафіксований на позначці 0,003-0,005%, а кисню – 0,001-0,002%.

2. Зі збільшенням питомого заряду шлаку концентрація алюмінію в металі зростає. Зокрема, для сталей марок 12ГС та 09Г2С вона підвищується з 0,01-0,02% до 0,02-0,03%, для 14ХГС – до 0,03-0,04%, а для 30ГС – до 0,052-0,062%. Ці показники зафіксовані за відсутності оптимізації та з додаванням вторинного алюмінію. Аналогічно, зростання маси шлаку також веде до підвищення концентрації алюмінію. Досягнутий рівень алюмінію в сталі є достатнім для ефективного мікролегування. При подальшому збільшенні питомого заряду шлаку понад 0,8 F/моль концентрація алюмінію залишається незмінною. Така поведінка алюмінію демонструє значне покращення асиміляції високоактивних легуючих елементів у процесі ВЕЛР.

Якщо легуючі матеріали оптимізовані, вторинний алюміній не потрібен. У цьому випадку концентрація алюмінію поступово зростає з 0,003% до максимальних 0,015-0,017% при досягненні питомого заряду шлаку 0,9 F/моль. Проте, вищу концентрацію алюмінію у сталі можна отримати шляхом збільшення вмісту оксиду алюмінію в шлаку.

3. Вміст фосфору змінюється в допустимих межах, що відповідають вимогам до якісних конструкційних сталей.

4. При збільшенні питомого заряду та маси шлаку рівноважна концентрація кремнію в сталі перебуває в діапазоні 0,68–0,82% для марок сталі 12ГС, 14ХГС і 30ХГС, а для сталі 09Г2С – в межах 1,075–1,2%.

5. Ефективність переходу марганцю в металевий розплав зростає при збільшенні обсягу шлаку та за умови адекватного питомого заряду шлаку.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патон Б.Є., Медовар Б.І., Латаш Ю.В. Електрошлаковий переплав металів та перспективи його розвитку. Вісн. АН УРСР. 1969. № 3. С. 86-91.

2. Українська радянська енциклопедія: близько 12 т.гол. ред. Бажан М. П.; редкол.: Антонов О. К. та ін. 2-ге вигляд. Київ : Головна редакція УРЕ, 1974-1985.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

15. 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.

16. Харченко О.В., Кириченко О.Г., Бєлоконь Ю.А. та ін. Термодинаміка та кінетика процесу вторинного електротермічного легування та рафінування металу. *Наукові праці ЗДІА. Металургія*, 2015. Вип. 1 (33). С. 8-12.

17. 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.

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

19. Патент України №132087. Спосіб позапічної обробки сталі / Харченко О.В., Синяков Р.В., Воденніков С.О., Лічконенко Н.В.; заявл. 06.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.5с.

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

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

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. Харченко О. В., Синяков Р. В. Програма «Excalibur» – можливості та перспективи використання у металургійному виробництві. Зб. наукових праць ДонНТУ. Серія: Металургія. 2005. Вип 102. С. 82-91.

26. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Можливості та перспективи використання програми «Excalibur» у навчальному процесі. Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія. 2013. Вип. 1 (29). С. 169-175.

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