

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та організації виробництва

«Допущено до захисту»
Гарант освітньої програми
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Металургія чорних металів»
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Оцінка ефективності процесу розкислення під час
випуску і обробки на установці «ківш-піч»**

Керівник роботи

Олександр СТОЯНОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело*

Здобувач

Роман ФЕДОРОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2025

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет гірничо-металургійний
Кафедра металургії та організації виробництва
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 136 Металургія
ОПП Металургія чорних металів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми

Христина МАЛІЙ
«04» квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Федоров Роман Федорович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

- Тема роботи Оцінка ефективності процесу розкислення сталі під час випуску і обробки на установці «ківш-піч»
керівник роботи Стоянов Олександр Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету №81/31.03.2025 від 31.03.2025 р.
- Термін подання роботи 27.06.2025 р.
- Вихідні дані до роботи розробка заходів по підвищенню засвоєння феросплавів під час позапічної обробки сталі на %,5%.
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітичні дослідження сучасних технологій розкислення сталі Розділ 2.Основна частина. Аналіз технології розкислення напівспокійних марок сталі. Рекомендації щодо покращення технології розкислення сталі Розділ 3. Охорона праці. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.
- Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 5 листів основної частини з показниками, які впливають на ступінь засвоєння феросплавів.
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	Стоянов О.М., доцент кафедри МОВ
2	Стоянов О.М., доцент кафедри МОВ
3	Стоянов О.М., доцент кафедри МОВ
4	Стоянов О.М., доцент кафедри МОВ

- Дата видачі завдання 04 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналітичний розділ	19 – 31.05.2025
2	Основна частина	02 – 21.06.2025
3	Охорона праці	16 – 25.06.2025
4	Техніко-економічні розрахунки	16 – 25.06.2025
5	Оформлення пояснювальної записки	25 – 27.06.2025
6	Захист	за графіком

Здобувач

Роман ФЕДОРОВ

Керівник роботи

Олександр СТОЯНОВ

АНОТАЦІЯ

ФЕДОРОВ РОМАН ФЕДОРОВИЧ. Оцінка ефективності процесу розкислення під час випуску і обробки на установці «ківш-піч». - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Об'єктом дослідження є процеси розкислення сталі у киснево-конвертерному виробництві.

Предметом дослідження є технологічні параметри, що впливають на ефективність розкислення та мінімізацію втрат легуючих елементів у сталеплавильному виробництві.

У першому розділі проаналізована сучасна технологія виробництва сталі в киснево-конвертерному процесі. Надана загальна характеристика хімічних процесів, що відбуваються під час розкислення сталі. Приведено аналіз рішень щодо зниження втрат марганцю, кремнію та вуглецю при розкисленні. В результаті визначена необхідність оптимізації режимів розкислення, сформульована невирішена частина проблеми, яку планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи.

У другому розділі проведено аналіз впливу температурного режиму, складу шлаку, вмісту вуглецю та втрати розкислювачів. визначено критичні параметри, через які виникає нестабільність процесу, обґрунтовано доцільність зниження передування та використання оптимізованого складу розкислювачів, наведено графічні залежності угару від технологічних параметрів.

У третьому розділі обґрунтовано комплекс заходів з охорони праці на дільниці позапічної обробки сталі, розглянуто основні інструкції та нормативні документи, що регламентують безпечне виконання робіт, описано порядок дій у аварійних ситуаціях, вимоги до роботи газовідвідного тракту, фурми, димососів, а також правила завантаження шихти та заливки чавуну.

У четвертому розділі розраховану економічну доцільність впровадження запропонованих змін у процес розкислення. Оцінено потенційне зниження втрат, покращення якості сталі та підвищення загальної ефективності виробництва.

У висновках узагальнено результати дослідження, підтверджено ефективність запропонованих технічних та організаційних рішень і наведено практичні рекомендації щодо впровадження їх у виробництво.

РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ, УГАР, МАРГАНЕЦЬ, КРЕМНІЙ, ВТРАТА, ПАРАМЕТРИ, ОПТИМІЗУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОЦЕСИ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ	7
1.1 Визначення розкислення та його роль у виробництві сталі	7
1.2 Класифікація методів розкислення і обладнання	11
1.3 Сучасні технології розкислення сталі	16
2. ОСНОВНА ЧАСТИНА. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗКИСЛЕННЯ НАПІВСПОКІЙНИХ МАРОК СТАЛІ	20
2.1 Опис технології розкислення напівспокійних марок сталі в конвертерному цеху	20
2.2 Статистичний аналіз технології розкислення напівспокійних марок сталі	21
2.3 Визначення основних параметрів технології, що впливають на процес розкислення сталі	31
2.4 Рекомендації щодо покращення технології розкислення сталі	36
3 .ОХОРОНА ПРАЦІ	37
4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	42
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

ВСТУП

У сучасній металургії якість сталі визначається не лише хімічним складом, але й досконалістю кожного етапу її виробництва. Однією з ключових операцій є розкислення — процес, без якого неможливо досягти високих механічних властивостей і довговічності сплаву. Присутність розчиненого кисню у рідкій сталі сприяє утворенню пористості, неметалевих включень та зниженню пластичності, що унеможливорює її використання в критично важливих конструкціях. Саме тому розкислення виступає не просто як обов'язковий етап, а як складний технологічний процес, від якого залежить якість кінцевого продукту.

У літературі все частіше зустрічаються дослідження, що розглядають розкислення не лише з точки зору термодинаміки, а й кінетики, впливу різних факторів та комбінованого використання феросплавів. Окрім теоретичних підходів, важливим є практичний досвід металургійних підприємств, який дозволяє виявити найефективніші схеми та методи.

Метою цієї роботи є виявлення ключових параметрів, що впливають на процес розкислення сталі, шляхом аналізу сучасних технологій та конкретного виробничого досвіду. У першому розділі проведено аналітичний огляд наукових джерел, у якому розглянуто суть процесу розкислення, класифікацію методів та обладнання, а також новітні технології. У другому розділі зосереджено увагу на практичному аналізі технології розкислення напівспокійних марок сталі: від опису виробничого процесу до статистичного аналізу й графічного моделювання. Третій розділ присвячений питанням охорони праці під час комбінованого розкислення, а в четвертому розділі обґрунтовано економічну доцільність запропонованих удосконалень.

Апробація результатів досліджень проведено в рамках міжнародних та всеукраїнських конференцій:

1. Ягольник М.В., Федоров Р.Ф. Оцінка ефективності використання відходів металургійних підприємств з метою ресурсо- та енергозбереження. International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1. PP 129-131.

<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/384/10477/21901-1>

2. Федоров Р.Ф., Стоянов О.М. Аналіз технологій глибокого розкислення сталі алюмінієм. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. PP 104-108.

<http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/542/14419/30354-1>

3. Нізяєв К. Г., Федоров Р. Ф., Малій Х. В., Рубан В. О. Особливості розкислення сталі при використанні ферохрому. Литво. Металургія. 2025: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції (27-29 травня 2025 р., м. Харків-м. Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Харків, НТУ «ХПІ». С. 423-425. ISBN 978-617-05-0544-

<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/384/10477/21901->

1. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ

1.1. Визначення розкислення та його роль у виробництві сталі

Розкислення — це ключовий етап виробництва сталі, під час якого усувається розчинений кисень з рідкого металу з метою зменшення вмісту неметалевих включень, зокрема оксидів.

При плавці металу однією з умов є окислення елементів у сталеплавильних агрегатах, це призводить до підвищеної активності кисню у розплаві. Для зниження активності до необхідних меж використовується розкислення вуглецем, кремнієм, марганцем, алюмінієм, лужноземельних металів [1].

Розкислююча здібність елемента, що вводять в сталь, визначається вмістом розчиненого кисню, що залишається у рівновазі з залишковими молекулами в рідкій сталі розкислювача та продуктами їх взаємодії.

Першим основним завданням розкислення є зниження кількості кисню у рідкій сталі та зв'язування його у міцні з'єднання, які запобігають утворенню газоподібних з'єднань при твердінні сталі.

При отриманні спокійних марок сталей кількість розчиненого кисню повинна бути як можна менше. При отриманні марок сталей киплячих — кількість розчиненого кисню повинна бути знижена до норм відповідних нормативних документів, задля того, щоб забезпечити нормальне кипіння сталі у виливницях.

По ступеню розкисленості існують наступні типи сталі: спокійна, полуспокійна та кипляча.

У спокійних типах сталей весь розчинений кисень в рідкому металі пов'язан з добавками розкислювачів, в основному алюмінію та кремнію.

При кристалізації такого типу сталі при атмосферному тиску окис вуглецю не створюється, через відсутність реакції кисню та вуглецю.

У полуспокійних типах сталей добавки кремнію, марганцю, алюмінію та концентрація розчиненого кисню регулюється таким чином, щоб при кристалізації сталі утворювалась певна кількість окису вуглецю, щоб він створив достатній протитиск, який заважав би та не давав проникати кисню у посадкову раковину. У результаті кристалізації структура полуспокійного типу сталі нагадує структуру спокійної, ліквация при цьому спостерігається незначна (ліквация - неоднорідність хімічного складу металів (сплавів), що виникає при їхній кристалізації). Такий злиток дає більш високий вихід прокату.

У киплячому типі сталі протікає реакція між киснем та вуглецем, у рідкому металі, що сприяє утворенню окису вуглецю. Зниження вмісту кисню у такому типі сталі зазвичай відбувається через цю реакцію. Інтенсивне кипіння металу та відсутність розкислювачів в сталі сприяє утворенню у зовнішній частині злитку зони, яка майже вільна від оксидних включень та створюється дуже чиста поверхня злитку. У результаті кипіння сірка, фосфор та вуглець лікують до центру злитка.

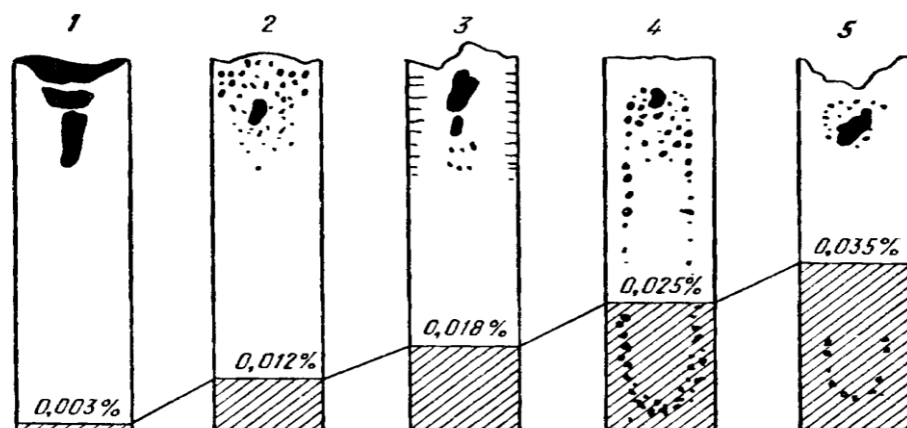


Рисунок 1.1 - Схематична структура спокійного (1), напівспокійного (2), закупореного (3) та киплячого (4, 5) злитків (Цифри ліній — концентрація кисню в сталі)

Другим завданням розкислення є видалення неметалевих включень, які виникають у процесі розкислення сталей.

Одним з найефективніших розкислювачів є алюміній, його використання тягне за собою глибоке вивчення термодинамічних та технологічних параметрів процесу. У сталеплавильному виробництві розкислення відбувається за допомогою алюмінію, так як він має високу розкислювальну здатність відносно інших розкислювачів.

При кінцевому розкисленні витрата алюмінію становить 1,5-3 кілограми на тону. У результаті плавки у рідкій сталі виникають міцні з'єднання тугоплавких високоглиноземистих оксидів. Локально перегрітий розплав у зонах взаємодії з доданою великою кількістю алюмінію у рідкий метал, частинки оксидів виникають в першу чергу в рідкому вигляді та при перемішуванні рідкої маси інертними газами (аргон або інші) частинки оксидів зіштовхуються одна з одною та збільшуються у розмірах. Ці частинки оксидів мають високе міжфазовий натяг та погано змочуються металом. По цим причинам оксиди спливають до гори розплавленого металу, де вони з високою швидкістю переходять до складу шлаку. Таким чином вміст кисню у рідкому металі у кінці досягає мінімального рівня.

При введенні алюмінію в метал, який має у складі кисень, може створюватись чистий глинозем (він створюється у разі великої кількості оксиду алюмінію), або $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (герцит), температура плавлення якого становить 2050 °C.

При розкисленні алюмінієм утворення глиноземів та нітридів алюмінію спостерігається вплив на процес кристалізації, у тому числі й на розмір зерна, чим більше було введено алюмінію, тим розмір зерна менший. Також алюміній взаємодіє з сіркою (при його великій кількості) та азотом.

Також було виявлено, що залишковий алюміній в залежності від концентрації може впливати на якість сталі та мати як негативний вплив,

так і позитивний. Низькі концентрації алюмінію призводять до недорозкисленості сталі, що призводить до газових раковин, пористості, тріщин.

Високий залишковий вміст алюмінію знижує рідкотекучість сталі, що в свою чергу ускладнює її розливу. При розливці таких сталей на струмені створюється тверда плівка та може бути і корка, у результаті вторинного окислення сталі. При розливанні у виливниці таких сталей створюються дефекти по включенням.

У результаті цього потрібно і дуже важливо забезпечити стабільність процесу розкислення, високу ступінь засвоєння алюмінію та оптимальний його вміст у складі сталей.

Низька щільність алюмінію (2700 кг/м³), яка більше ніж в 2 рази нижче щільності рідкої сталі та нижче щільності шлаку, сприяє високому угару та нестабільності засвоєння металевого алюмінію у рідкому металі. Через це спостерігається проблема прогнозування та стабільного протікання процесу отримання оптимальної кількості алюмінію в складі металу в інтервалі 0,03-0,04 % [1].

У мало вуглецевій легованій алюмінієм сталі (вміст Al не менше 0,02%) неметалеві включення представлені у вигляді частинок корунду, що не деформуються (Al₂O₃) [2].

Їх кількість залежить від вмісту кисню в металі перед розкисленням та ступенем видалення продуктів розкислення. Чим більший вміст кисню в металі перед початком розкислення, тим більше оксидних включень до готової сталі. При цьому слід зазначити, що при використанні розкислення отримати чисту від неметалевих включень сталь – практично не можливо.

Важливим є також те, що підвищена окисленість сталі перед розкисленням значно збільшує кількість неметалевих включень, особливо за використання осаджувального методу. Саме тому контроль

активності кисню в металі є критичним для оптимального підбору розкислювачів і підвищення якості сталі [2].

Також є фактом те, що сталь яка має пластинчасті включення руйнується значно раніше, ніж сталі з глобулярними включеннями.

Існуюча технологія розкислення вуглецевих та низьколегованих марок сталей має за основу розкислення металу в ківші на випуску з мартенівської печі алюмінієм та феросплавами [3]. Кінцеве розкислення кремнієм відбувається 65% - вим FeSi та SiMn.

Періодичний аналіз витрати кремнія при виплавці мартенівської сталі з обробкою на установці піч-ківш демонструє, що існує динаміка надто високої витрати кремнійвмісних феросплавів, що головним чином спостерігається на установці піч-ківш. До головних причин перевитрати можна віднести нестабільне засвоєння кремнію на установці ківш-піч, що загалом пов'язано з використанням легковагових феросплавів – 65% феросиліція, та з його невеликими порціями (60-70 кг).

1.2. Класифікація методів розкислення і обладнання

Один із перспективних напрямів зниження вмісту неметалевих включень у сталі — впровадження технології комплексного розкислення. Такий підхід забезпечує формування легкоплавкої фази, що сприяє укрупненню включень і полегшує їхнє виведення з розплаву. Стосовно таких розкислювачів як алюміній та кальцій, комплексне розкислення може також розглядатися як модифікація НВ із глинозему кальцієм [4].

В роботі [6] було виконано практичний експеримент з маркою сталі СтЗсп, ціллю якої була оцінка впливу варіантів розкислення на кінцевий вміст кисню в металі. Для експерименту використовувалась піч Таммана.

Як початковий матеріал були відібрані проби з 350-тонного конвертера комбінату ВАТ «МК«Азовсталь» перед розкисненням з масовою часткою вуглецю 0,04 - 0,07 %; марганцю 0,07 - 0,14 %; сірки 0,020-0,030 %; фосфору 0,008 – 0,015 %. Метал масою 0,6 - 0,7 кг поміщали в лунковому тиглі в піч і розплавляли. Плавлення проводили в атмосфері чистого аргону (99,8 % Ar), який подавали зі швидкістю 0,05 м³/год у робочу зону печі Таммана для створення нейтральної атмосфери. Температуру контролювали термопарою ПР 30/6, що працювала разом з переносним потенціометром Р307, його використання обумовлено тим, що на нього не впливають струмені наведення на показники приладів.

У результаті дослідів [6] хімічним аналізом було виявлено, що при використанні осаджувального методу з основними елементами-розкислювачами кремнієм, марганцем та алюмінієм, які вводилися у вигляді феросиліція в комбінації з сілікомарганцем або металевим марганцем, масова частка вуглецю до розкиснення змінювалась у межах від 0,05 та в кінці розкиснення до 0,16-0,13% та склад кремнію та марганцю змінювався у межах допустимих марки сталі СтЗсп. Зниження складу кисню в металі протікає інтенсивно на початку розкиснення. Мінімальний рівень окисленості при цьому способі склав 0,007% кисню.

У серії розкиснення порошкоподібними матеріалами [6] в якості розкислювачів для початкового розкиснення – фракції 0,25 мм алюмінію та сілікокальція, а для кінцевого – феросиліція та металевого марганцю. Характерною особливістю процесу розкиснення за цим варіантом є більш швидке, порівняно з способом, що осаджує, очищення металу від кисню. Мінімальна масова частка кисню склала 0,003%.

Розкиснення рідкими лігатурами є складним технічним процесом. Для отримання рідких феросплавів у графітовому тиглі одночасно сплавляли передільний чавун, феросиліцій, сілікомарганець та алюміній в складі, який забезпечує потрібний хімічний склад

комплексного розкислювача. З практичного експерименту [6] стало відомо, що розкислення рідкими лігатурами є найдовшим процесом з вищенаведених, а масова частка кисню склала 0,0022%. Інші ж способи розкислення не забезпечують такого ж ефективного зниження рівню окисленості, при введенні рідких лігатур у метал можливо контролювати та змінювати кількість вуглецю.

При проведенні розкислення сталі екзотермічними феросплавами паливом слугував порошок алюмінію, окислювачем – натрієва селітра та як флюс використовувався плавиковий шпат. Масова частка кисню при використанні цього методу розкислення становила 0,0042%, що є більш низькою ніж при осаджувальному методу розкислення, але є не таким глибоким, як розкислення порошкоподібними розкислювачами або рідкою лігатурою.

На рисунку 1.2 представлено зміну вмісту кисню в залежності від обраного типу розкислення, найбільш низька масова частка кисню в сталі СтЗсп при розкисленні двома методами: рідкою лігатурою та порошкоподібними розкислювачами.

Ці методи також сприяють мінімізації кількості неметалевих включень у металі. Окрім того, включення в сталь, розкислену порошкоподібним алюмінієм і силікокальцієм, мають глобулярну форму.

У досліді [7] зазначено закономірності варіативної технології розкислення сталі у сталерозливному ківші кусковими феросплавами, де під час випуску використовуються спеціальні апарати для вводу матеріалу у глиб металу, щоб засвоєння матеріалу розплавом було максимальним.

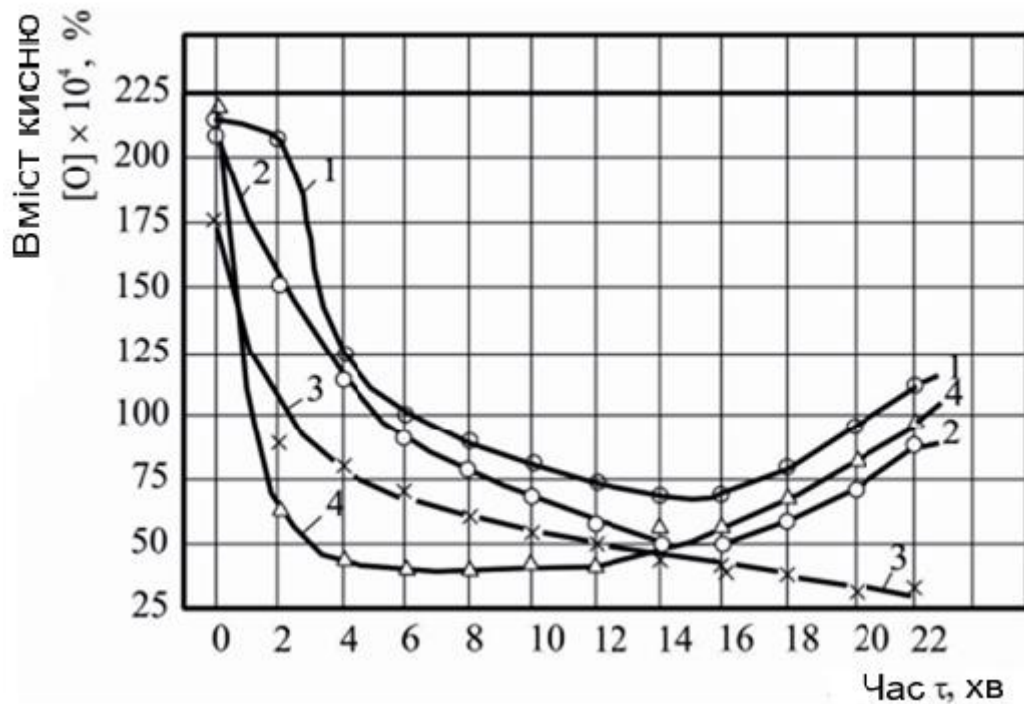


Рисунок 1.2 - Зміна вмісту кисню в процесі розкислення сталі Ст3сп різними способами: 1-осаждальними; 2-порошкоподібними матеріалами; 3 – рідкими лігатурами; 4 – екзотермічними феросплавами

Практично та теоретично було виявлено умови необхідного диспергування матеріалів задля стабільності протікання процесу та взаємодії з реагентом. Процес інжекції порошкоподібних матеріалів та основні газодинамічні параметри процесу було розраховано для високопродуктивної та надійної роботи пристроїв для інжекції, та створення необхідної кінетики процесу розкислення.

Основною проблемою процесу розкислення є угар розкислюючих елементів, отже за [7] дослідом було виявлено, що при заданих параметрах налаштувань обробки сталі та проведенні розрахунків, математичних модулювань, аналізу фізико-хімічних властивостей та теплофізичних явищ встановлено, що запропонована технологія глибокої інжекції у розплав під час випуску сталі сприяє зниженню

угару феромарганцю до 4-7 %, в свою чергу це призводить до фактичного зниження витрат на 0,64 кг/т сталі.

Дослід [8] передбачає аналіз фізико-хімічних комбінацій металів та їх взаємодію з розчиненим киснем у діапазоні температур від 1500 К до 2500 К. Метою дослідження стало отримання високоякісної нержавіючої сталі. Фізико-хімічний метод включає в себе перетворення неметалевих включень за допомогою розкислення та модифікації у комплексне з'єднання, яке здатне легко видалятися з розплаву та у разі залишення його у розплаві не оказувати критичного впливу на якість кінцевого металу.

Аналізуючи термодинамічний потенціал утворення оксидів, найкращі показники виявили у ванадію (V_2O_5), титану (Ti_3O_5), алюмінію (Al_2O_3) та бору (B_2O_3).

У теперешній час широко використовуються проведення комплексного розкислення за допомогою двох або більше елементів металевих добавок. Технологія передбачає послідовне введення розкислювачів.

Для проведення фізико-хімічного аналізу використовували ряд металевих добавок виходячи з їх розкислювальної здатності, таких як:

Ti, V, Al, B, Cr, Zr, Mn, Si, Ca, Be, Mg та інших і були побудовані відповідні розрахунки [8]. Наступна частина включає розрахунок з використанням комплексу розкислювачів, таких як $2Mg+4Al+5Si+18O$, та інші. Основною ціллю розрахунків було визначення енергії Гіббса, та визначено, що найбільша ефективність спостерігається при комплексному використанні алюмінію та кремнію з кальцієм та вуглецем, але такий комплекс призводить до погіршення якості сталі.

Висновок проведеного дослідження полягає у використанні комплексного розкислення з комбінацією металів з ряду їх спорідненості з киснем.

1.3. Сучасні технології розкислення сталі

У час коли вимоги до якості сталі стають з кожним роком все вище, сучасні технології розкислення сталі не можуть обійтися без спеціальних приладів для контролю активності кисню та температури металу. Контролю здійснюється за допомогою активометрів типу Celox, який вже багато років використовується у металургійній промисловості в зарубіжних країнах, у поєднанні з реєструючими приладами Multi-Lab Celox, у наш час це поєднання є найбільш надійним та затребуваними. Активометр Celox визначає активність кисню в металі за допомогою електрохімічного виміру з ячейками:



В них як електрод порівняння використовується електрод у вигляді хрому та його оксиду, датчика електрорушійної сили (е.д.с.) – твердий стабілізований оксидом магнію цирконієвий елемент; а також Pt – Rh термопара для вимірювання температури. Контакт з ванною здійснюється за допомогою молібденового стрижня.

При зануренні зонда в розплав вимірюються та реєструються на двоканальному самописці е.р.с. осередки та термо- е.д.с. термopари, яка необхідна для розрахунку активності кисню.

У публікаціях закордонних та вітчизняних є інформація про те, що активометр при визначенні активності кисню в не розкисленій сталі у випадках низької концентрації вуглецю, існує великий діапазон експериментальних даних. Основними причинами такого широкого діапазону були неточні виміри, нестабільний склад шлаку, висока швидкість продувки або відсутність рівноваги вуглець-кисень.

У роботі [2] проведено аналіз окисленості 100 плавok трубної сталі марки X70. Після виплавлення сталі в конверторі, її передають на

установку ківш-піч (УКП). Розкислення в УКП здійснювалося за допомогою FeSi, Al, FeMn та/або металевого марганцю. Легуючі переважно вводять у складі порошкоподібного дроту. Часткове видалення та модифікування неметалевих включень проводять силікокальцієм та наведенням основного шлаку, який формують присадками вапна та плавикового шпату [2].

Для виміру окисленості металу використовуються спеціальні зонди, під назвою Celox-Al та реєструючий прибор Multi-Lab Celox II. Усі розрахунки виконуються програмно, а також закладено розрахунок витрат алюмінію згідно статистики виробництва на той час.

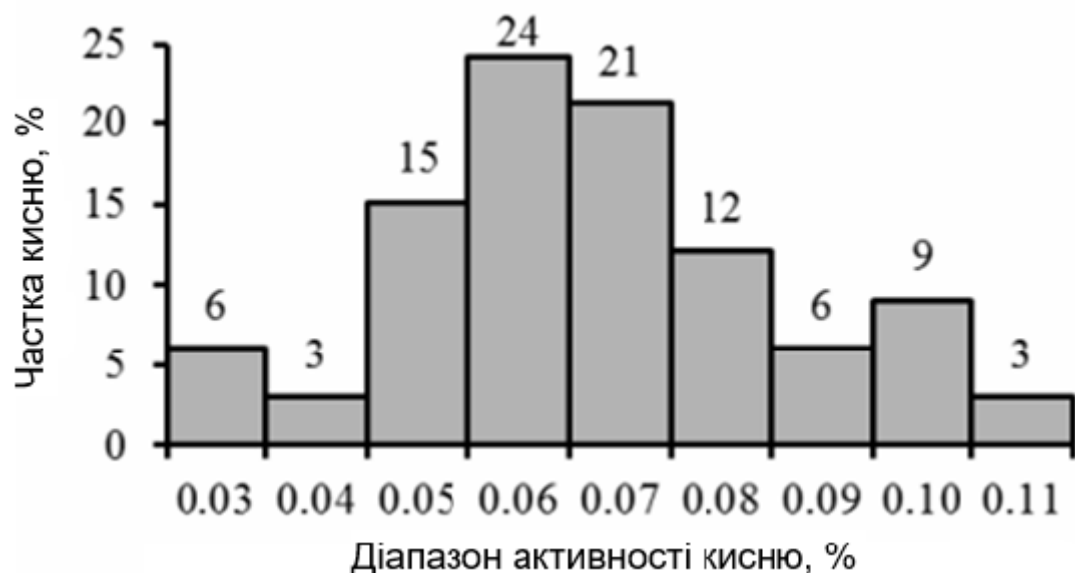


Рисунок – 1.3 Розподіл активності кисню в металі наприкінці рафінування

Згідно отриманих результатів аналізу, в залежності від складу вуглецю в металі, активність кисню після рафінування має великий діапазон (0,033-0,116%), у середньому це 0,072%.

У роботі [3] було проведено практичний дослід в якому для збільшення та стабільності засвоєння кремнію коригується хімічний склад напівпродукту кремнієм у процесі позапічної обробки сталі.

Для експерименту при випуску сталі з мартенівської печі, прийнято не використовувати вторинний алюміній, у початку обробки на установці ківш-піч робити присадку алюмофлюсу та інжектувати алюмінієвий дріт, проводити корегування складу кремнію в металі робилось за допомогою 45% FeSi замість 65% FeSi через те, що 45% FeSi має більш високу питому вагу.

Дослід проводили на марках сталі, не легованих кремнієм (масова частка Si до 0,45%).

Було отримано результати 386 плавок, у яких витрата алюмінієвої катанки становила 100 м на плавку. Питома витрата чистого кремнію на установці ківш-піч склала 0,03 кг/т, що менше ніж на дослідних плавках. Ступінь засвоєння кремнію у середньому зросла на 8,5% через використання саме 45% FeSi.

Зазначено, що вміст кисню в металі в кінці обробки на дослідних плавках знаходився в межах 26–38 ppm, в дослідних плавках вміст кисню складав 34–66 ppm. Це означає більш стабільну окисленість і відповідно якість сталі. Зменшено також витрату алюмінію в порівнянні з дослідними плавками на 0,09 кг/т, при цьому вміст алюмінію в складі металу вище.

Очікуваний економічний ефект від впровадження вдосконаленої технології розкислення становить 1,1 грн/т сталі, що також свідчить про її виробничу доцільність.

У першому розділі було проведено детальний аналіз теоретичних основ та сучасних технологій процесу розкислення сталі. Встановлено, що розкислення є критично важливою стадією сталеплавильного процесу, від якої безпосередньо залежить якість готової продукції.

Описано основні методи розкислення — осаджувальний, порошковий, із застосуванням рідких лігатур та екзотермічних феросплавів — кожен з яких має свої переваги і недоліки в залежності від умов виробництва. Зазначено, що найкращі результати досягаються при використанні методів глибокої інжекції та комплексного розкислення з використанням декількох елементів, таких як Al, Si, Ca, Mg, що дозволяє знизити втрати розкислювачів і підвищити стабільність процесу.

Розглянуто сучасні засоби контролю за активністю кисню в металі, зокрема зонди типу Celox, що дозволяють в режимі реального часу визначати окисленість сталі та своєчасно корегувати технологічні параметри.

Згідно з проведеними дослідженнями, найбільш ефективними є технології, які забезпечують мінімізацію втрат розкислювачів, зменшення вмісту залишкового кисню та економію витратних матеріалів. Це, своєю чергою, сприяє підвищенню якості сталі та зниженню собівартості її виробництва.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Виконання всіх технологічних операцій, передбачених цією інструкцією, проводиться у суворій відповідності до таких нормативних актів з охорони праці:

Закон України "Про охорону праці" (остання редакція від 25.06.2011 року №345 8-VI) [7];

Правила охорони праці у металургійній промисловості НПАОП 27.0-1.01-08 [8];

Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві НПАОП 27.1-1.01-09 [9];

Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії НПАОП 27.1-1.09-09 [10];

Інструкції з охорони праці №10.58.10 для операторів завантаження конвертера ділянки підготовки виробництва КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.60.10 для міксерового міксерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.41.10 для конвертерного сталевара конвертерного від поділу КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.45.10 для підручного сталевару конвертера (перший, другий) конвертерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці №10.48. для машиніста транспортувальника гарячого металу 3р. (шлаковоза) конвертерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці №10.52. для машиніста транспортувальника гарячого металу 4р. (Сталевоза) конвертерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.39.10 для машиніста дистриб'ютора 7 розряду (без дистанційного керування) конвертерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.40.10 для машиніста дистриб'ютора 8 розряду (з дистанційним керуванням) конвертерного відділення КЦ;

Інструкція з охорони праці №10.46.10 для газовиків КЦ;

Інструкція з охорони праці №10.31.10 для машиністів газодувних машин (димососів) КЦ;

Інструкція з охорони праці № 10.35.10 для бригадира шихтового двору у сталеплавильному та феросплавному виробництві КЦ;

Інструкція з охорони праці №10.19.10 для шихтувальника шихтового двору КЦ.

Для забезпечення безпечної експлуатації газовідвідних трактів необхідно після кожного перефутерування або ремонту перед проведенням плавок з частковим допалюванням окису вуглецю перевірити газощільність газовідвідного тракту, правильність налаштування блокувань, сигналізації, готовність до роботи контрольно-вимірювальних приладів. Результати перевірки майстер-енергетик записує в змінному журналі та повідомляє майстру конвертерів про готовність газовідвідного тракту до роботи.

Перевірку газощільності проводити на одній плавці з недопалом при зменшеній витраті дуття за допомогою газоаналізаторів за димососом: вміст окису вуглецю має бути не вище 10%, вміст кисню при цьому не вище 2%. Зменшений витрата дуття при перевірці газощільності встановлювати приблизно в 2.5 рази нижче за проектний.

При вмісті кисню більше 2% повинні бути знайдені та усунені місця підсмоктування, після чого перевірку необхідно повторити. Допалюючий пристрій при цьому вмикати забороняється.

При пуску конвертера або газовідвідного тракту після ремонту або тривалого простою дистриб'юторник починає продування по команді змінного майстра-технолога. Майстер-технолог дозволяє початок

продування після повідомлення майстра-енергетика щодо готовності енергетичного обладнання.

У випадках, не пов'язаних з пуском конвертера або газовідвідного тракту після ремонту або тривалого простою, продування починати після повідомлення оператора газовідвідного тракту про готовність до роботи безпосередньо дистриб'юторів. За 1-2хв до початку продування дистриб'юторник попереджає оператора газовідвідного тракту про початок продування.

Забороняється проводити продування при продуктивності димососа нижче встановленої за умовами вибухобезпеки. При зупинці димососа продування плавки має бути припинено, проводити подачу пари на допалюючий пристрій і підняти фурму зі швидкістю не більше 0,2 м/с. Через 5хв після припинення продування необхідно припинити подачу пари. Після пуску димососа газовідвідний тракт необхідно провентилювати протягом хвилини при повній продуктивності димососа, потім продування можна відновити.

Забороняється завантаження брухту та заливка чавуну за наявності в конвертері води, пропусків води через фурму або котла-охолоджувача, зменшення товщини днища більш ніж на 700мм. Введення продувної фурми у фурмове вікно та висновок проводити під контролем технологічного персоналу.

Для забезпечення безпечних умов проведення плавок необхідно при повороті конвертера перед заливкою чавуну переконатися у відсутності рідкої фази. Забороняється заливання чавуну в конвертер за наявності рідкого шлаку.

Обслуговуючому персоналу забороняється перебувати перед горловиною конвертера при його повалці, після підігріву брухту і заливки чавуну. Заливання здійснювати повільним струменем. При сильному вибиванні смолоскипа конвертер нахилити під котел-охолоджувач газів. Після падіння факела злити решту чавуну.

Присадка в період продування вологих сипучих, що призводить до появи більше 3% водню в газах, що відходять, не допускається.

При аварійному припиненні продування (спрацювало блокування) подати пару на свічку. "Спідницю" підняти після гасіння смолоскипа на свічці. Підйом фурми до виходу з горловини робити зі швидкістю 0,2м/с. Аварійну подачу пари припинити через 5 хвилин після початку її подачі. При вимушеному перериванні продування необхідно подати пару на свічку і закрити подачу газу на запальний пристрій, знизити витрату кисню до 550м³/хв, знизити положення фурми на 0,2м, після роботи в такому режимі підняти "спідницю", підняти фурму і через 2хв закрити подачу пари.

Тривалість роботи на зниженій витраті кисню повинна забезпечити у газах, що відходять, вміст окису вуглецю менше 10% і кисню не більше 5.6%.

Пропуск води з фурми під час продування виявляється в газі за наявністю водню.

Ознаками великих перепусток води є одночасно вибивання газів з-під "спідниці", зниження витрати газу та температури за котлом, підвищення тиску газів на вході в газовідвідний тракт та температури за газоочищенням.

При виявленні пропусків води з фурми під час продування або додування необхідно закрити засувки на підведення води до фурми, зупинити живлення насоса високого тиску та припинити продування.

При виявленні перешкод підйому фурми необхідно їх усунути, потім переїхати на запасну фурму. При цьому конвертер повинен бути у вертикальному положенні до з'ясування наявності в ньому води.

Додування плавки проводити за відсутності води в конвертері з дозволу майстра виробництва для старшого майстра. При розриві кисневого шлангу необхідно відкрити аварійну подачу пари на свічку, закрити подачу газу на пристрій, що допалює, підняти фурму.

Відновлення продування проводити після усунення причин, що спричинили її переривання. При відновленні перерваного продування необхідно опустити фурму, встановивши знижену витрату кисню та висоту фурми як при вимушеному перериванні, що забезпечить вміст кисню в газі не більше 5-6%.

Після витримки на цьому режимі протягом 20-40с необхідно збільшити витрату до експлуатаційного та опустити "спідницю".

З метою запобігання викидам із конвертера в період заливання чавуну витримувати в конвертері завалений брухт для видалення вологи. У період витримки конвертер повинен знаходитись у похилому положенні у бік зливу металу на кут 60 градусів.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу впливу технологічних параметрів на процес розкислення сталі марки 5ПСМ1 у конвертерному виробництві можна зробити наступні висновки:

Температурний режим випуску сталі є критичним фактором, що визначає ефективність розкислення. Встановлено, що за температур вище °С спостерігається значне зростання угару кремнію та марганцю. Дотримання оптимального температурного діапазону – °С сприятиме зниженню втрат феросплавів і покращенню витратних характеристик.

Виявлено чітку залежність між вмістом FeO у шлаку та інтенсивністю угару розкислювачів. Зменшення концентрації FeO шляхом часткового відсікання шлаку дозволяє мінімізувати реакційну здатність шлаку до окислення кремнію та марганцю.

Випуск плавки на заданій концентрації вуглецю дозволяє уникнути подальшого навуглецьовування металу, що зменшує додаткові витрати на технологічні операції та сприяє стабільності хімічного складу готової сталі.

Упровадження зазначених заходів дає змогу очікувати зниження вугару розкислювачів у середньому на ..–..%, що позитивно впливає як на якість металу, так і на економічні показники процесу.

Результати дослідження підтверджують доцільність удосконалення параметрів технології розкислення сталі з метою підвищення ефективності та зниження витрат феросплавів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трибушевський В. Л., Трибушевський Л. В., Немененок Б. М., Румянцева Г. А. Особенности раскисления стали алюминием // Черная металлургия. — С. 201–202.
2. Назюта Л. Ю., Денисенко В. С. Анализ окисленности конечного металла при выплавке стали в большегрузных конвертерах // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2011. — С. 68–76.
3. Крикунов Б. П., Переворочаев Н. М., Цуканов В. И. та ін. Совершенствование технологии раскисления стали // Металл и литье Украины. — 2009. — № 1–2. — С. 26–28.
4. Казачков Є. А., Бойчук Л. Є. Комплексне раскисление стали алюминием и кальцием // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2010. — С. 11–14.
5. Харлашин П. С., Носенко О. А., Яценко А. Н. Разработка рациональной технологии раскисления спокойных марок стали // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2011. — С. 52–55.
6. Нізяєв К. Г., Хотюн В. І., Стоянов О. М. Розкислення сталі порошкоподібними матеріалами // Литво. Металургія. — 2019. — С. 320–321.
7. Шульга В. О. Об эффективности комплексного раскисления стали // Технологічний аудит і резерви виробництва. — 2012. — С. 15–16.
8. Якин М. Н., Коваль С. А., Стефанец А. В. та ін. Оптимизация раскисления стали с использованием данных об активности растворённого кислорода // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2012. — С. 62–68.
9. Paek M.-K., Jang J.-M., Kang Y.-B., Pak J.-J. Aluminum Deoxidation Equilibria in Liquid Iron: Part I. Experimental // Metallurgical and Materials Transactions B. — 2015. — Vol. 46. — DOI: 10.1007/s11663-015-0368-0.

10. Keskin İ., Tetik Y., Kacar Y. Developing Ideal Deoxidation Practices by Design of Experiment (DOE) Method in Steelmaking Process.
11. Beskow K., Jonsson L., Sichen D. et al. Study of the deoxidation of steel with aluminum wire injection in a gas-stirred ladle // Metallurgical and Materials Transactions B. — 2001. — Vol. 32. — P. 319–328; Institute of Ferrous Metallurgy. Zhdanov Metallurgical Combine “Azovstal’.” // Metallurg. — 1986. — No. 4. — P. 18–20.
12. Федоров Р. Ф., Стоянов О. М. Аналіз технологій глибокого розкислення сталі алюмінієм // International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”: conference proceedings (November 28–29, 2024, Riga, Latvia). — Riga: Baltija Publishing, 2024. — Vol. 1. — С. 104–108. — URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/542/14419/30354-1>
13. Крикунов Б. П., Переворочаев Н. М., Цуканов В. И. та ін. Совершенствование технологии раскисления стали // Металл и литье Украины. — 2009. — С. 26–28.
14. Шульга В. О., Червоний І. Ф., Єгоров С. Г., Грицай В. П. Физико-химический анализ процесса раскисления стали. — Запорожье: Запорожская государственная инженерная академия, 2012.
15. Нізяєв К. Г., Федоров Р. Ф., Малій Х. В., Рубан В. О. Особливості розкислення сталі при використанні ферохрому // Литво. Металургія. 2025: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції (27–29 травня 2025 р., м. Харків–м. Київ) / за ред. О. І. Пономаренка. — Харків: НТУ «ХПІ», 2025. — С. 423–425. — ISBN 978-617-05-0544-6. — URL: https://ptima.nas.gov.ua/images/stories/Conf/conf2025/Conference_proceeding_Foundry_2025.pdf
16. Феросплави // Ukrsplav. — URL: <https://ukrsplav.in.ua/catalog/ferrosplavy/> (дата звернення: 18.06.2025)