

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«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 впливу параметрів виплавки сталі в кисневому
конвертері на техніко-економічні показники плавки»

Керівник роботи

Євген СИНЕГІН

Консультант
від бази практики

Віталій КРАВЧЕНКО

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

Здобувач

Ірина НЕФЬОДОВА

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

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

| | |
|----------------------|--|
| Факультет | <u>гірничо-металургійний</u> |
| Кафедра | <u>металургії та інноваційних технологій</u> |
| Ступінь вищої освіти | <u>бакалавр</u> |
| Спеціальність | <u>136 Металургія</u> |
| ОПП | <u>Металургія чорних металів</u> |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Христина МАЛІЙ
«10» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Нефьодова Ірина Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Оцінка впливу параметрів виплавки сталі в кисневому конвертері на техніко-економічні показники плавки

керівник роботи Синегін Євген Володимирович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Навчальна, наукова та методична література зі спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики сталеплавильного виробництва, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ» м. Кам'янське.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітичні дослідження технології виплавки сталі в кисневих конвертерах з верхньою продувкою, продуктивність виплавки сталі. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз паспортів виплавки сталі в кисневому конвертері. Визначення взаємозв'язків між параметрами виплавки сталі в кисневому конвертері та техніко-економічними параметрами процесу (виходом придатної сталі, питомими витратами шихтових матеріалів та ін.). Розробка пропозицій щодо покращення технології виплавки сталі в кисневому конвертері. Розділ 3. Охорона праці у конвертерному відділенні. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): _____

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта |
|----------|---|
| Розділ 1 | Синегін Є.В., доцент |
| Розділ 2 | Синегін Є.В., доцент |
| Розділ 3 | Синегін Є.В., доцент |
| Розділ 4 | Синегін Є.В., доцент |
| | |

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи |
|-------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Технологічна частина | 11.05 – 13.06.2026 |
| 2 | Спеціальна частина | 11.05 – 13.06.2026 |
| 3 | Охорона праці та екологія | 06 – 13.06.2026 |
| 4 | Економічно-організаційна частина | 06 – 13.06.2026 |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 13 – 20.06.2026 |
| 6 | Захист | за графіком |

Здобувач

Ірина НЕФЬОДОВА

Керівник роботи

Євген СИНЕГІН

АНОТАЦІЯ

Нефьодова Ірина Володимирівна. Оцінка впливу параметрів виплавки сталі в кисневому конвертері на техніко-економічні показники плавки - 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, 2026.

Об'єкт дослідження — технологічний процес виплавки сталі в кисневому конвертері з основною футерівкою.

Предмет дослідження — газодинамічні режими продувки, шлаковий і температурний режими, а також параметри металошихти, що впливають на техніко-економічні показники плавки.

Проаналізовано вплив якості та фракційного складу металобрухту (легковагового, великовагового та пакетованого) на теплову роботу конвертера, кінетику його плавлення та температурний профіль ванни. Досліджено газодинамічні особливості продувки за допомогою трикоаксіальних багатосоплових фурм із соплами Лаваля. Зіставлено режими «жорсткої» та «м'якої» продувки, їхній вплив на швидкість зневуглецьовування, хід шлакоутворення, стійкість магнезитової футерівки та запобігання аварійним викидам металошлакової емульсії. Також приділено увагу системам сухої й мокрої утилізації та очищення високотемпературних конвертерних газів, багатих на СО.

Практичне значення отриманих результатів полягає в узагальненні оптимальних параметрів проведення плавки, що забезпечують повний плавильний цикл із мінімальною собівартістю та низьким вмістом шкідливих домішок (N_2 , H_2).

КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИЙ ПРОЦЕС, РІДКИЙ ЧАВУН, СТАЛЕВИЙ БРУХТ, СОПЛО ЛАВАЛЯ, «ЖОРСТКА» І «М'ЯКА» ПРОДУВКА, ШЛАКОУТВОРЕННЯ, ДЕФОСФОРАЦІЯ, ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС, ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 5 |
| 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ | 6 |
| 1.1 Конвертерне виробництво сталі | 7 |
| 1.2 Технологічні особливості проведення продувки | 15 |
| 1.3 Теплова робота конвертерів у залежності від температурного режиму продувки і якості металобрухту | 17 |
| 1.4 Газодинамічні режими конверторної плавки та їх вплив на показники плавки | 21 |
| 1.5 Шлаковий режим як фактор забезпечення якості сталі | 24 |
| Висновки за розділом | 25 |
| 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В УМОВАХ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» | 27 |
| 2.1 Характеристика конвертерного цеху та основні техніко-економічні показники | 27 |
| 2.2 Методика статистичного аналізу паспортів плавок | 37 |
| 2.3 Результати статистичного аналізу | 39 |
| 2.4. Висновки та рекомендації щодо вдосконалення технологічного процесу | 49 |
| 3. ОХОРОНА ПРАЦІ | 52 |
| 3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки | 52 |
| 3.2 Заходи щодо поліпшення умов праці | 60 |
| 3.3 Захист навколишнього середовища | 62 |
| Висновки за розділом | 65 |
| 4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ | 68 |
| 4.1. Розрахунок матеріального балансу та витрат на шихту | 68 |
| 4.2. Калькуляція собівартості тонни конвертерної сталі | 69 |
| 4.3. Розрахунок річного економічного ефекту | 71 |
| Висновки за розділом | 72 |
| ВИСНОВОК | 73 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕ | 75 |

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку чорної металургії киснево-конвертерний процес є домінуючим способом виплавки сталі у світі. Це зумовлено його високою техніко-економічною ефективністю, здатністю забезпечувати великі обсяги виробництва та гнучкістю у виготовленні широкого сортаменту металопродукції.

Сутність киснево-конвертерного виробництва полягає в інтенсивному продуванні рідкого чавуну газоподібним киснем, що вводиться через фурму під високим тиском. Під час плавки відбувається спрямоване окиснення основних домішок чавуну — вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору та сірки, — що перетворює його на сталь із заданим хімічним складом. Завдяки високій швидкості хімічних реакцій та використанню чистого кисню, процес переробки плавки триває лише близько 30–45 хвилин, що значно випереджає за продуктивністю мартенівський та інші традиційні методи.

Актуальність удосконалення цього процесу сьогодні полягає у необхідності глибшого контролю над фізико-хімічними явищами, що протікають у конвертерній ванні. Ефективність плавки безпосередньо залежить від точності керування дуттям, шлаковим режимом та температурним графіком. Оптимізація цих параметрів, зокрема інтенсивності подачі кисню та рафінувальних властивостей шлаку, є фундаментом для підвищення якості металу, зниження вмісту шкідливих домішок та мінімізації витрат енергоресурсів.

Таким чином, дослідження та аналіз технологічних параметрів киснево-конвертерної плавки залишаються критично важливими завданнями для досягнення стабільно високих показників металургійного виробництва.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

На сьогоднішній день за допомогою конвертерного способу із застосуванням кисню виплавляється понад дві третини від загального світового обсягу сталі. Поточний етап розвитку цього напрямку характеризується фокусом на технологічну гнучкість, оптимізацію витрат ресурсів та мінімізацію деструктивного впливу на навколишнє середовище.

Найбільш затребуваною є схема, що поєднує верхнє нагнітання кисню крізь охолоджувану фурму із придонним барботажем ванни інертними газами або паливно-кисневими сумішами. Такий підхід інтенсифікує гідродинаміку розплаву, обмежує окиснення заліза (зменшує концентрацію FeO у шлаковій фазі) та максимізує кінцевий вихід рідкої сталі.

Оперативний контроль ходу плавки базується на розгортанні комплексних математичних моделей (як статичного, так і динамічного типу). Вони прогнозують температурний режим та фракційний склад металу в режимі "live", усуваючи потребу в проміжних зупинках агрегату для виконання експрес-аналізів [1].

Сучасне обладнання адаптоване під переробку значних обсягів амортизаційного брухту (на рівні 25–30% від маси завалки). Завдяки впровадженню інтегрованих систем допалювання оксиду вуглецю до діоксиду безпосередньо у робочому просторі конвертера, цей показник можна додатково збільшити .

Особлива увага приділяється безперервній евакуації високотемпературних газів, їх глибокому очищенню від пилових часток та подальшій акумуляції для використання як енергетичного палива всередині підприємства.

Безпосередній етап продувки киснем забирає не більше 15–20 хвилин, тоді як повна тривалість всього плавильного циклу вкладається у 40–50 хвилин.

Мінімальна собівартість готового продукту поєднується з його високими експлуатаційними властивостями, оскільки сталь містить гранично низьку концентрацію шкідливих газових домішок — азоту (N_2) та водню (H_2).

Конвертер дозволяє успішно синтезувати практично будь-які типи сталей — від рядових низьковуглецевих до відповідальних легованих марок.

1.1 Конвертерне виробництво сталі

Суть конвертерних процесів (бесемерівського й томасівського) полягає в наступному. У конвертер заливають чавун і продувають його знизу повітрям, кисень якого окислює складові в розплаві, у першу чергу – вуглець. Теплота, що виділяється під час окиснення компонентів чавуну, забезпечує нагрівання металу до температури близько $1600^{\circ}C$.

Конвертер – це грушоподібна футерована ємність зі сталевим корпусом. Конвертер складається з нижньої конічної, середньої циліндричної та верхньої частини у формі зрізаного конуса. Зверху конвертер має отвір – горловину, через яку заливають чавун та випускають сталь. Знизу до корпусу конвертера прикріплене днище з трубою для подачі повітря.

Із труби через фурми, що розміщені в днищі, у конвертер надходить повітря під надлишковим тиском 0,30-0,35 МПа. Стійкість днища в бесемерівському конвертері становить 15-25 плавок, а в томасівському – 50-100 плавок. Стійкість футерівки бесемерівського конвертера 1300- 2000 плавок, а томасівського – 250-400 плавок.

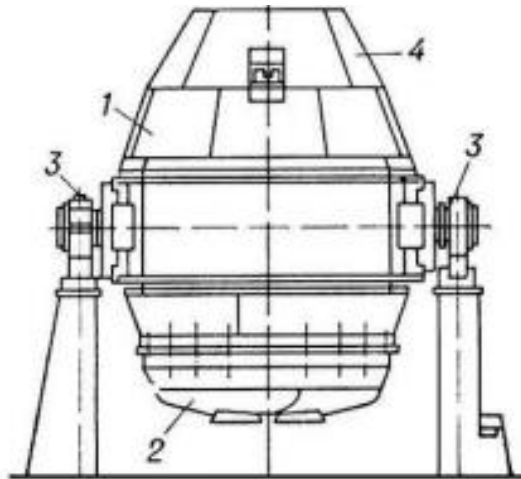


Рисунок 1.1 - Схема кисневого конвертера: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – опорні цапфи; 4 – горловина

Бесемерівський процес названий за ім'ям його винахідника Г. Бесемера. Він у 1856 р. запропонував спосіб і одержав рідку сталь шляхом продування чавуну повітрям через дно конвертера, футерованого динасовою цеглою (кисла футерівка). У цей конвертер заливають чавун із низькою концентрацією сірки та фосфору (мас. %: 3,8-4,4% С; 0,7-1,25% Si; 0,5- 0,8% Mn; P < 0,06%; S < 0,06%). Рідкий метал продувають повітрям за температури 1250-1300°C.

Томасівський процес проводять у конвертері з основною футерівкою (випалений доломіт). Для утворення основного шлаку в конвертер завантажують вапно – (12-18)% від маси металу і заливають чавун, який не має обмежень по небажаним домішкам: (2,8-3,3)% С , (1,6-2,0)% P, (0,2-0,6)% Si, (0,8-1,3)% Mn, S > 0,06 %. Рідкий метал при температурі 1180-1250°C продувають повітрям 16-22 хв. Чавун для томасівського процесу містить меншу кількість вуглецю та більшу – фосфору порівняно з бесемерівським. Це обумовлено тим, що при основному процесі виплавки сталі існують умови для ефективного видалення фосфору з розплаву. При цьому кількість вуглецю, який видаляють з металу при продувці його повітрям,

зменшується через низьку температуру процесу. Під час продувки чавуну в конвертері окислюються С, Si і Mn, а P і S переходять у шлак. Продування металу в конвертері закінчують, коли вміст фосфору в розплаві досягає 0,05-0,07%, після чого метал зливають у ківш і вводять розкислювачі. Конвертерний шлак містить велику кількість P_2O_5 , тому його можна використовувати як добриво: 42-45% CaO, 16-24% P_2O_5 , 5-10% SiO_2 , 8-15% FeO, 7-10% MnO.

У фасонно-ливарних цехах машинобудівних заводів зазвичай встановлюють бесемерівські конвертери малої ємності (1-3 т) з бічним дуттям. Їх запускають у роботу залежно від потреби металу для лиття виробів. Конвертер із бічним дуттям має глухе днище. У бічній стінці конвертера приблизно на рівні спокійної ванни розміщені в один ряд сопла, які поєднані з повітряною коробкою. Футерівку стін і днища в конвертері виконують із динасової цегли. Шлак у конвертерах малого бесемерування є кислим, тому сірка й фосфор практично не переходять у шлак і залишаються в металі.

Киснево-конвертерний процес (ККП) – це виплавка сталі з рідкого чавуну з добавкою сталевого брухту. Виплавку сталі здійснюють у конвертері з основною футерівкою. Рідкий метал у конвертері продувають киснем зверху крізь водоохолоджувану фурму.

Маса кисневого конвертера разом із футерівкою досягає 1000 т. Металевий корпус конвертера симетричний відносно вертикальної осі й футерований усередині вогнетривкими матеріалами. На відміну від конвертера з нижнім дуттям, кисневий конвертер має глухе днище. При цьому кисень у розплав подають зверху крізь водоохолоджувану фурму з витратою газу 2-6 м³/(т·хв.). Вертикальна фурма довжиною до 20 м може переміщуватися вертикально в процесі продувки металу. Фурму охолоджують водою, яку подають за допомогою насосів під тиском 0,8- 1,6 МПа. Кисень для продувки розплаву подають від його магістралі

під тиском 1,6-2,5 МПа через гофровані труби з нержавіючої сталі, які захищені дротовим обплетенням.

Основною складовою киснево-конвертерної плавки є рідкий чавун, частка якого становить 70-90% від маси сталі. Можливість переробки чавуну різного хімічного складу є головною перевагою кисневоконвертерного процесу. При виробництві сталі в таких конвертерах використовують чавуни з різним вмістом основних домішок: 3,9-4,5% С, 0,3-1,2% Si, 0,3-2,2% Mn, 0,08-0,3% P, 0,02-0,06% S та інші. На показники киснево-конвертерного процесу найбільше впливає вміст кремнію в чавуні, від якого залежить кількість SiO_2 та шлаку, а також витрата вапна на плавку. Шлак формується внаслідок розчинення вапна при його взаємодії з SiO_2 . Наприклад, при підвищенні вмісту кремнію в чавуні від 0,5 до 0,9% необхідно збільшувати витрату вапна з 4,8 до 7,4% від маси металу. При цьому вихід рідкої сталі зменшується з 92,7 до 91,7%. Залежно від кількості вапна в конвертері утворюється шлак, який по-різному впливає на стійкість футерівки. Окрім кремнію, на показники даного процесу впливає також марганець. Підвищення його концентрації в чавуні призводить до значного збільшення кількості шлаку і втрат заліза.

Фосфор і сірка за концентрації в чавуні відповідно $\leq 0,15$ і $\leq 0,045\%$ слабо впливають на шлакоутворення та показники конвертерної плавки. При підвищеній ($> 0,3\%$) концентрації в чавуні фосфору вміст його в металі знижують шляхом скачування з конвертера первинного шлаку і наведення нового. Оптимальним для киснево-конвертерних процесів є чавун, що містить: 0,6-0,9% Si; 0,6 -0,7% Mn; $\leq 0,15\%$ P; $\leq 0,045\%$ S.

Кількість сталевого брухту, який подається на плавку, становить 23-27% від маси металевих шихти. Легковаговий брухт для конвертерної плавки потрібно пакетувати. При використанні непакетованого брухту збільшується тривалість завалки і значно знижується температура

ванни на початку продувки через швидке розчинення брухту в розплаві. Щільність пакетів брухту має бути не нижчою за 1800 кг/м^3 . Замість брухту в конвертер можна завантажувати руду з обмеженим (до 8%) вмістом кремнезему в ній.

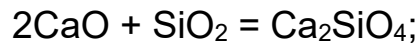
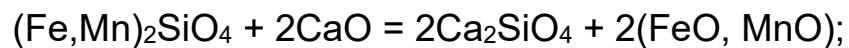
Технологія плавки полягає в наступному. У повалений (горизонтально розташований) конвертер завантажують брухт, а потім заливають рідкий чавун, який підвозять до конвертера в спеціальних ковшах. Після цього конвертер повертають у вертикальне положення і в його порожнину вводять кисневу фурму. На початку продувки в конвертер подають перші порції шлакоутворювальних матеріалів (вапна, бокситу або плавикового шпату). Тривалість кисневої продувки залежить від її інтенсивності та місткості конвертера й складає 12-30 хв. Після продувки кисневу фурму піднімають угору й повертають конвертер у горизонтальне положення. За результатами аналізу металу і його температури приймають рішення про випускання з конвертера сталі, або проведення коригуючих операцій (додаткова продувка та введення необхідних матеріалів) для одержання певного її складу. Загальна тривалість киснево-конвертерної плавки сталі складає 30-55 хв.

Істотним недоліком ККП виготовлення сталі є обмежена кількість сталевого брухту, який використовують на плавку. У тепловому балансі конвертерного процесу важлива роль належить монооксиду вуглецю (CO). Тому для збільшення маси сталевого брухту в конвертері використовують твердий вуглець, мазут, природний газ, які сприяють утворенню CO при продувці металу.

У процесі киснево-конвертерного виробництва утворюється 60- 80 м^3 димових газів на тонну сталі, які складаються з 80-90% CO, 7-8% CO₂, 2-5% H₂ та незначної кількості N₂, CH₄ й інших газів. Вказані гази необхідно очищувати від пилу та шкідливих домішок. Конвертерний пил переважно складається з оксидів заліза і містить 60-65% Fe,

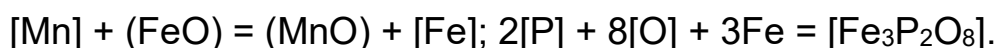
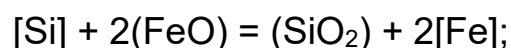
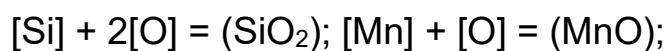
2-6% Mn, а решта – SiO₂, CaO, Al₂O₃ та інші оксиди. При цьому 50-80% частинок пилу мають розміри менше, ніж 10-5 м, що ускладнює очищення газів від них.

Для сухого очищення газу часто використовують електрофільтри. Принцип дії їх полягає в тому, що газ із пилом проходить через систему електродів, до яких подається електричний потенціал. В електричному полі, що утворюється при цьому, частинки пилу набувають заряду та осідають на електродах, які мають протилежну полярність. Для очищення димових газів використовують також мокрі системи, якими обладнані близько 80% всіх киснево-конвертерних цехів. Формування шлаку в конвертері відбувається згідно реакцій:

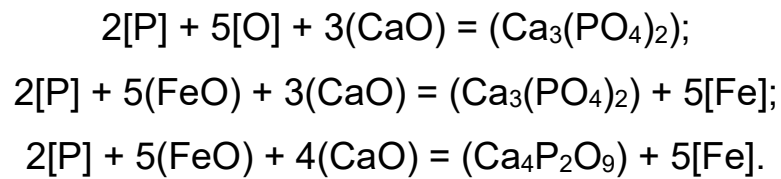


Шлакоутворення – найважливіша складова в технології конвертерної плавки. Саме шлак визначає ефективність процесу десульфурації й дефосфорації металу. При цьому шлак негативно впливає на стійкість футерівки в конвертері. Раннє утворення активного шлаку значно зменшує винос й викиди металу з конвертера.

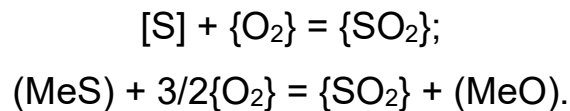
Окислення Si, Mn та P відбувається на міжфазній межі металшлак шляхом взаємодії їх із розчиненим в розплаві киснем та з оксидами заліза в шлаці:



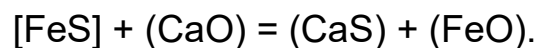
Продуктом окислення фосфору в конвертері є фосфати:



Вміст сірки в готовій сталі залежить від кількості її в шихтових матеріалах і ступеню десульфурації металу, що досягається в процесі плавки. Суть різних способів десульфурації полягає у зв'язуванні сірки в сульфіді MnS , CaS , MgS та Na_2S . Ці сульфіді практично не розчиняються у металі й переходять у шлак. При цьому невелика кількість окисленої сірки переходить у газову фазу:



Багато сірки переходить з металу в основний шлак за рахунок взаємодії з оксидами кальцію, магнію або марганцю:



Розкислення сталі з підвищеним вмістом кисню проводять у ковші під час випускання металу. При виробництві спокійної сталі розкислювачі додають на струмінь металу в такій послідовності: спочатку феромарганець або силікомарганець, потім феросиліцій і в останню чергу – алюміній.

Основним способом легування сталі, який використовують найчастіше, є обробка рідкого металу феросплавами у твердому стані. Феросплави вводять у ківш під час випускання сталі з конвертера. Легування сталі можна здійснювати також рідкими феросплавами. Для

цього перед випуском сталі в ківш заливають легуючі добавки, які заздалегідь розплавляють в окремій печі.

Можна проводити легування сталі екзотермічними сумішами. До складу таких сумішей входять подрібнені легувальні компоненти (ферохром, феромарганець та ін.), окисники (натрієва селітра), відновники (алюмінієвий порошок) та зв'язуючі матеріали (кам'яновугільний пек). Екзотермічну суміш у вигляді брикетів завантажують у розливальний ківш перед випуском сталі з конвертера. У конвертери комбінованого дуття разом із подаванням кисню зверху вводять різні присадки через дуттьові пристрої, які встановлені в днищі. За такою технологією можна регулювати процес шлакоутворення в конвертері шляхом зміни режимів дуття та збільшення кількості сталевого брухту на плавку. За рахунок інтенсивного перемішування металу в конвертері підвищується вихід придатного металу, шлак менше окислюється, повніше відбуваються процеси зневуглицювання, десульфурзації та дефосфорації сталі.

При донному дутті кисень подають через пористі вогнетривкі блоки або через фурми, що встановлені в днищі конвертера. Для підвищення стійкості днищ і керамічних фурм кисень подають знизу у вигляді струменів, оточених кільцевою захисною оболонкою із вуглеводнів. Така оболонка переміщує зону інтенсивного окиснення домішок і тепловиділення в рідкому металі від фурм у глибину ванни.

На комбінатах із повним металургійним циклом рідкій чавун із доменного цеху передають по залізничній колії в ковшах місткістю 80- 140 т у міксерне відділення. У міксерах чавун різних плавок усереднюють за хімічним складом і температурою. Потім його переливають у ківш і перевозять в конвертерне відділення. У вітчизняних цехах використовують міксери місткістю 600, 1300, 2500 т для конвертерів на 50, 150, 250, 350 т чавуну. Такий запас чавуну в міксерах забезпечує безперебійну роботу конвертерів [3].

1.2 Технологічні особливості проведення продувки

Стандартна конструкція кисневої фурми базується на трьох коаксіальних (вкладених одна в одну) суцільнотягнутих трубах. Крізь внутрішню трубу безпосередньо надходить кисень, тоді як зовнішні труби утворюють контур для циркуляції охолоджувальної рідини. Завершується фурма спеціальним мідним наконечником (головкою). Якщо на початкових етапах розвитку технології використовували переважно односоплові фурми, то сьогодні галузевим стандартом є застосування багатосоплових систем. Мета такого вдосконалення — розподілити потік окиснювача для більш стабільного та рівномірного виходу газів, таких як CO та CO₂, із металевої ванни.

Динаміка струменя: Використання сопел Лавалю дозволяє досягти надзвукової швидкості виходу газу, що максимізує кінетичну енергію потоку. У середньому швидкість кисню на виході з такого сопла варіюється в діапазоні 450–550 м/с.

Регулювання в процесі продувки: Висота розміщення фурми над рівнем металу не є статичною і змінюється в ході процесу. Коли на початку плавки фурма знаходиться на значній відстані від поверхні, в зоні реакції формується кратер або специфічна порожнина, насичена краплями металу та киснем (див. рис. 1.2).

У першому випадку (позиція а) рух рідини зумовлений виключно дією відбитого струменя. У міру заглиблення фурми на стінках кратера виникають хвилі, що призводить до порушення суцільності розплаву. Струмінь проникає в метал, де відбувається його дроблення; при цьому реакційна зона формується з газових бульбашок та крапель металу, а в початковій ділянці залишається зона прямого контакту газового потоку з металом. Варто зазначити, що значна частка кисню за таких умов втрачається разом із відбитим струменем.

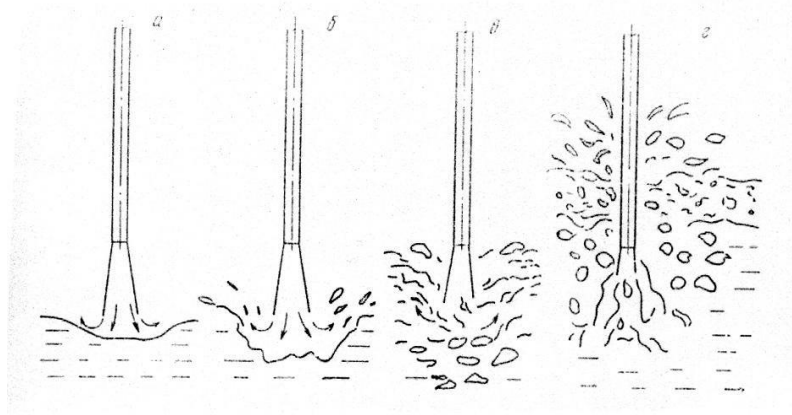


Рисунок 1.2 – Схема взаємодії газового струменя з розплавом: а — відкрита лунка зі стабільною поверхнею; б — відкрита лунка з активним викидом крапель металу; в — глибоке проникнення струменя в рідкий метал; г — продування у спіненій ванні

При продуванні заглибленим струменем (позиція в) відбитий газовий потік відсутній, а реакційна зона трансформується в порожнину всередині ванни, оточену газовими бульбашками. Для стандартного конвертерного процесу найбільш характерними є режими, наведені на схемах в та г. Важливо враховувати, що під час зміни положення фурми відносно дзеркала спокійного металу відбувається спінювання ванни, що призводить до підвищення її фактичного рівня.

Розташування первинної зони реакції у верхній частині ванни сприяє інтенсивному переходу оксидів заліза до шлаку. Коригування висоти фурми та тиску дуття дозволяє оперативно керувати локалізацією зони реакції та хімічним складом шлаку в широких межах.

На виробництві типовим є наступний алгоритм:

1. Позиціонування: На початковому етапі фурму встановлюють на висоті 2,5–4,0 м від рівня металу, згодом її опускають на 2–3 м.
2. Тиск: Протягом продувки тиск у киснепроводі зазвичай утримують на рівні 1,5–2,0 МПа, а безпосередньо перед фурмою — не нижче 1,2 МПа.

3. Інтенсивність: Ці параметри забезпечують питому інтенсивність продувки 2,5–4,0 м³/т·хв. Для конвертерів великої ємності (350–400 т) завдяки застосуванню багатосоплових фурм цей показник може бути підвищений до 5–7 м³/т·хв.

Тривалість продування, незалежно від місткості агрегату, становить у середньому 12 хвилин.

1.3 Теплова робота конвертерів у залежності від температурного режиму продувки і якості металобрухту

У робочому просторі конвертера поза межами високотемпературного вогнища (первинної реакційної зони) спостерігається практично гомогенний розподіл температур. Локальні термічні градієнти у рідкому розплаві виникають переважно у моменти завантаження кускових охолоджувачів або флюсуючих добавок. Контроль теплового стану ванни зазвичай здійснюють за допомогою занурювальних термопар через механізовані системи або вручну.

Кінетику плавлення кусків металозавалки під час найбільш активного періоду описують такою математичною залежністю:

$$- dx/dt = \alpha(T_v - T_{лікв}) / [q_{схов} + C_b(T_{лікв} - T_{поч})] \gamma_b, \quad (1.1)$$

де x - маса брухту, що розплавився за час t ; α - коефіцієнт теплообміну в рідкій ванні, Вт/(м² · К); $T_{лікв}$ - температура ліквідуса, К; $q_{схов}$ - прихована теплота плавлення, Дж/кг; C_b - теплоємність брухту, Дж/(Дкг·К); $T_{поч}$ - початкова температура брухту, К; γ_b - щільність брухту, кг/м³

Величина температури ванни (T_v) безпосередньо корелює з масою та характеристиками металозавалки. Наприклад, інтенсифікація

використання брухту спричиняє помітне зниження середньої температури розплаву під час операції. Цей ефект став одним із ключових факторів досягнення високої стійкості сучасної вогнетривкої футеровки агрегатів.

Якісні характеристики металошихти, а також графік її завантаження суттєво трансформують кінетику вигорання домішок, стабільність газодинамічного режиму (наявність або відсутність викидів) та загальний час операції через зміну температурного профілю плавки.

Легковаговий брухт (товщина менше 10 мм, насипна щільність від 0.5 до 1.0 т/м³, питома площа поверхні близько 50–60 м²/т): надзвичайно швидко акумулює тепло і переходить у рідкий стан. Значна його частина розчиняється ще на етапі заливання рідкого чавуну.

Великоваговий брухт (габарити до 350–400 мм, насипна щільність понад 3.5 т/м³, питома площа не більше 3 м²/т): плавиться значно повільніше, через що температурна крива ванни за його використання зміщується в область вищих значень на пізніх етапах плавки.

Пакетована шихта: приблизно після третини періоду продувки демонструє нестандартний характер зміни температури. Це пов'язано з деструкцією пакетів, що різко збільшує зону контакту металу з розплавом, прискорюючи плавлення та дещо гальмуючи ріст температури ванни.

З погляду гідродинамічних процесів, інтенсивність розчинення жорстко лімітується площею активного контакту фаз (F), яка розраховується за геометричними моделями:

Для металошихти прямокутного (або близького до нього) профілю:

$$F = 0,256(1/\delta + l/b) + 2\delta b, \quad (1.2)$$

Для металошихти циліндричної (круглої) форми:

$$F = (0,5l/d) + (\pi d^2 / 2),$$

де δ - товщина брухту, b - ширина брухту, м; d - діаметр куска брухту круглого перерізу, м; 0,256 та 0,51 - статистичні коефіцієнти, м³

Хоча швидке розчинення тонкостінного брухту знижує теплові втрати в навколишнє середовище за рахунок зменшення температурного напору та активізує допалювання CO до CO₂, використання непідготовленого легковагового матеріалу супроводжується низкою технологічних вад. Наявність оксидів (іржі) та сторонніх забруднень призводить до переокиснення шлаку, що провокує:

- інтенсивне спінювання та евакуацію металошлакової емульсії через горловину;
- аварійні викиди та шлейфи металу;
- збільшення часу плавки через необхідність проміжного скачування рідкого шлаку.

Для стабілізації процесу брухт товщиною менше 10 мм доцільно піддавати пакетуванню (з формуванням блоків перерізом приблизно 700 × 1000 мм, довжиною 1000 мм та щільністю 3.0–3.5 т/м³). Габарити великовагової фракції мають становити від 10 до 400 мм за товщиною та до 500 мм за довжиною. У разі гострої потреби використання легковагового лому без підготовки, його введення слід переносити на другу порцію (після вигорання від 30% до 50% вуглецю).

Несприятливий температурний хід та спінювання ванни перебудовують теплову роботу агрегату: частина енергії витрачається на прогрів верхніх зон футеровки (що за нормального режиму компенсується теплом відхідних газів), збільшуючи загальні втрати тепла (які зазвичай становлять 2–5% від сумарного приходу). Також варто пам'ятати, що температура шлакової фази через специфіку

реакційної зони перевищує температуру металу: на 40–50°C на початковому етапі та до 100°C наприкінці операції.

Масообмінні процеси утворення пилу та диму в реакційній зоні підпорядковуються такій залежності:

$$V_{\text{вип}} = \kappa V_r (P_{\text{вр}}/P), \quad (1.4)$$

де $V_{\text{вип}}$ - загальний потік пари за одиницю часу; κ - поправочний коефіцієнт; V_r - обсяг газів, що виділяються з реакційної зони; $P_{\text{вр}}/P$ - пружність пари речовини, що випаровується, і загальний тиск, відповідно.

Зміна пружності пари заліза залежно від температурного поля описується рівнянням:

$$\text{Log } P_{\text{Fe}} = - (18500/T) + 10,15, \quad (1.5)$$

де P_{Fe} - тиск, Па; T - температура, К.

Це вказує на те, що для мінімізації унесення заліза з газами необхідно знижувати локальний перегрів у первинній зоні, підвищувати тиск у конвертері або інтенсифікувати фільтрацію пилу рідким розплавом і шлаком.

Пригнічення випаровування заліза двояко впливає на тепловий баланс:

1. Якщо випаровується чистий метал, збереження його у ванні економить тепло фазового переходу, дозволяючи збільшити частку брухту в завалці.

2. Якщо ж переважає випаровування оксидів заліза, утримання диму знижує прихід тепла від екзотермічних реакцій окиснення.

Практичні дані та розрахунки (зокрема для донного киснево-паливного дуття) свідчать про зниження частки металобрухту на 2–3%, що підтверджує домінування схеми з утворенням та винесенням оксидних фаз, хоча обидва механізми можуть протікати паралельно.

1.4 Газодинамічні режими конверторної плавки та їх вплив на показники плавки

Основою киснево-конвертерного процесу є окислення домішок чавуну високошвидкісними струменями кисню. Ефективність протікання фізико-хімічних реакцій, швидкість нагрівання металу та формування шлаку безпосередньо залежать від газодинамічних параметрів подачі дуття. Керування газодинамічним режимом є головним інструментом технолога для ведення плавки без викидів, забезпечення високого виходу придатного металу та досягнення заданого хімічного складу сталі.

При подачі кисню через сопла фурми надзвуковий струмінь впроваджується у металеву ванну, утворюючи реакційну зону (лунку). Газодинамічний режим визначається двома основними керованими параметрами:

1. Витратою кисню V_{O_2} ($m^3/xв$ або $m^3/(т \cdot хв)$).
2. Висотою розташування фурми над рівнем спокійної ванни H_f (м).

Глибина проникнення кисневого струменя в метал h і площа взаємодії залежать від кінетичної енергії струменя. Збільшення витрати газу або зниження фурми призводить до поглиблення лунки, інтенсифікації циркуляції металу та прискорення масообмінних процесів. Навпаки, зменшення витрати газу або підйом фурми розосереджує кисневий потік по поверхні шлако-металевої емульсії.

Залежно від співвідношення витрати газу та положення фурми, виділяють два основні граничні режими продувки:

1. «Жорстка» продувка: Характеризується високою витратою кисню та низьким положенням фурми. Струмінь глибоко проникає в метал. Це забезпечує інтенсивне перемішування ванни, швидке окислення вуглецю (зневуглецювання) та зниження вмісту оксидів заліза (FeO) у шлаку.

2. «М'яка» продувка: Здійснюється при підвищеному положенні фурми та/або зниженій витраті кисню. Енергія струменя витрачається переважно у верхніх шарах ванни. Це сприяє швидкому окисленню заліза, накопиченню FeO в шлаку та прискоренню розчинення вапна (раннє шлакоутворення).

На практиці завжди застосовується комбінований (ступінчастий або плавний) графік зміни витрати газу та висоти фурми протягом плавки, що дозволяє адаптувати газодинаміку до поточного періоду плавки.

Регулювання витрати газу має комплексний вплив на ключові техніко-економічні показники конвертерного виробництва:

1. Швидкість зневуглецювання та температурний режим

Підвищення інтенсивності подачі кисню (збільшення V_{O_2}) прямо пропорційно збільшує швидкість вигорання вуглецю. Однак надмірна витрата газу на початку плавки, коли шлак ще не сформований, може призвести до холодного початку процесу, оскільки тепло від окислення вуглецю (утворення CO) частково виноситься з відхідними газами. Оптимальне регулювання витрати дозволяє синхронізувати швидкості зневуглецювання та нагрівання ванни.

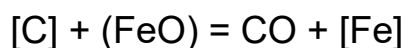
2. Шлакоутворення та процеси дефосфорації

Для успішного видалення фосфору необхідний високоосновний залізистий шлак на ранніх стадіях плавки. Застосування «м'якої» продувки (обмеження витрати газу з високим положенням фурми) в

перші хвилини плавки дозволяє накопичити 15–20% FeO у шлаку, що прискорює асиміляцію вапна. Перехід до «жорсткої» продувки в середині плавки змушує кисень реагувати переважно з вуглецем, знижуючи окисленість шлаку і запобігаючи його надмірному спінюванню.

3. Вихід придатного металу (мінімізація викидів та виносів)

Некоректне регулювання витрати газу є головною причиною викидів металу та шлаку з горловини конвертера. Якщо витрата газу занадто низька при високому вмісті вуглецю, шлак переокислюється. Подальше раптове збільшення інтенсивності перемішування призводить до лавиноподібної реакції:



Величезний об'єм газу CO викидає емульсію з агрегату. Плавне регулювання витрати кисню та використання акустичних систем контролю рівня шлаку дозволяє підтримувати спінений шлак у межах агрегату, підвищуючи вихід рідкої сталі на 1–2%.

4. Стійкість вогнетривкої футерівки

«Жорстка» продувка з надмірною витратою газу створює високотемпературні зони біля днища та стінок конвертера, що прискорює механічний та термічний знос вогнетривів. З іншого боку, тривала «м'яка» продувка утворює агресивний шлак з високим вмістом FeO, який хімічно розчиняє магнезитову футерівку. Оптимізація витрати кисню дозволяє формувати гарнісаж на стінках агрегату, значно подовжуючи кампанію конвертера.[4,5,6].

1.5 Шлаковий режим як фактор забезпечення якості сталі

Формування рафінувального шлаку є ключовим технологічним етапом конвертерної плавки, від ефективності якого безпосередньо залежить якість готової сталі, зокрема ступінь видалення шкідливих домішок — фосфору та сірки. Процес «наведення» шлаку починається з моменту подачі кисню і полягає у створенні рідкорухливого оксидного розплаву з необхідною основністю (CaO/SiO_2), здатного ефективно поглинати продукти окиснення металу та домішок. Цей процес базується на присаджуванні вапна та допоміжних флюсових матеріалів (бокситів, плавикового шпату) безпосередньо в конвертер у розрахункових кількостях, що забезпечують необхідний хімічний склад шлаку до кінця плавки.

Основою успішного шлакоутворення є швидке розчинення твердого вапна у рідкій шлаковій фазі. На початковій стадії продувки, коли відбувається інтенсивне окиснення кремнію та марганцю, утворюється первинний шлак, збагачений оксидами кремнію (SiO_2). Збільшення вмісту SiO_2 у цей період сприяє зниженню температури плавлення шлакової системи, що активізує процес розчинення вапна. Проте для стабільного перебігу реакцій дефосфорації, які вимагають високої основності, необхідно підтримувати достатній вміст оксидів заліза (FeO) у шлаку. Саме оксиди заліза є активним розчинником вапна, тому керування режимом шлакоутворення нерозривно пов'язане з динамікою окиснювальних процесів у ванни.

Управління шлакоутворенням здійснюється переважно шляхом зміни положення кисневої фурми. Розташування фурми у верхньому положенні на початковому етапі продувки сприяє розвитку зони окиснення металу, що призводить до накопичення оксидів заліза в шлаку та пришвидшує перехід вапна у розчин. У міру того, як шлак стає більш основним та в'язким, виникає потреба у застосуванні флюсуючих

добавок. Присадка плавикового шпату або бокситів дозволяє знизити в'язкість шлаку та інтенсифікувати його обмін з металом без необхідності перегріву ванни, що є критично важливим для збереження стійкості футеровки конвертера. Важливим технологічним аспектом є недопущення переокиснення шлаку на фінальних стадіях плавки. Після виконання основних завдань з дефосфорації, рівень оксидів заліза в шлаку необхідно стабілізувати, щоб забезпечити належний вихід металу. Успішне наведення шлаку досягається шляхом узгодження графіка присадки вапна з темпом продувки, що дозволяє забезпечити стабільність хімічного складу шлаку, мінімізувати втрати заліза з відходами та отримати сталь, що відповідає встановленим технічним вимогам.

Висновки за розділом

У результаті науково-теоретичного аналізу киснево-конвертерного процесу (ККП) обґрунтовано його ключові закономірності та сучасні технологічні тренди:

Сучасний ККП із комбінованим дуттям та використанням математичних моделей у режимі «live» дозволяє стабільно виплавляти широкий масогабаритний спектр сталей за повний цикл у 40–55 хвилин. Ефективне видалення шкідливих домішок (фосфору та сірки) лімітується раннім наведенням високоосновного залізного шлаку, що досягається за рахунок раціонального узгодження графіків присадки вапна, флюсів та висоти кисневої фурми. Регулювання «жорсткої» (інтенсивне зневуглицювання та перемішування ванни) та «м'якої» (накопичення FeO для асиміляції вапна) продувки через багатосоплові фурми Лаваля підвищує вихід придатного металу на 1–2% та мінімізує аварійні викиди.

Швидкість розчинення металобрухту (частка якого становить 23–30%) жорстко залежить від площі контакту фаз. Для оптимізації

теплого балансу та виключення переокиснення шлаку легковагову фракцію брукту необхідно пакетувати до щільності понад 1800 кг/м³. Сучасний процес орієнтований на глибоке мокре або сухе очищення димових газів від дрібнодисперсного оксидного пилу та повну термічну утилізацію (CO\С₂) або акумуляцію відхідних газів як палива.

2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СТАЛІ В УМОВАХ

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є підприємством із повним металургійним циклом. Виробнича структура сталеплавильного комплексу орієнтована на забезпечення високої якості металопродукції відповідно до міжнародних стандартів (DIN, EN, ASTM, API). Основною виробничою ланкою сталеплавильного переділу є конвертерний цех.

Технологічна схема цеху побудована на базі використання міксерного або безміксерного способу підготовки чавуну, виплавки сталі в кисневих конвертерах із верхнім продуванням, позапічної обробки рідкого металу та безперервного розливання на машинах безперервного лиття заготовок (МНЛЗ). На комбінаті впроваджено сучасні технічні рішення, що дозволяють отримувати сталь із низьким вмістом шкідливих домішок — сірки й фосфору .

Асортимент сталей, що виплавляються на підприємстві, охоплює:

- вуглецеві сталі звичайної якості та якісні конструкційні сталі;
- низьколеговані сталі (у тому числі з мікролегуванням титаном, ванадієм, молібденом);
- спеціальні сталі для виробництва катаної осьової заготовки залізничного транспорту, шпунтових паль типу «Ларсен» та рейкових профілів.

2.1 Характеристика конвертерного цеху та основні техніко-економічні показники

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Нормативно-правове регулювання державної політики у сфері охорони праці в Україні базується на положеннях Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю (КЗпП), а також комплексі чинних санітарно-гігієнічних та протиепідемічних норм .

З огляду на тематику кваліфікаційної роботи, присвячену вивченню особливостей донної продувки розплаву під час позапічної обробки сталі, у даному розділі проведено комплексний аналіз умов праці в умовах сталеливарного цеху. Основну увагу приділено питанням забезпечення виробничої безпеки, пожежної профілактики, а також мінімізації техногенного впливу технологічного процесу на стан навколишнього середовища.

3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки

Сталеплавильне виробництво характеризується високим рівнем техногенного навантаження. Згідно з вимогами Державних санітарних правил ДСП 173-96 [8], сталеливарні підприємства за ступенем шкідливості та небезпечності технологічних процесів належать до I класу небезпеки. Це зумовлює потребу в організації нормативної санітарно-захисної зони (СЗЗ) радіусом не менше 1000 метрів від меж житлової забудови.

Відповідно до класифікації, регламентованої ГОСТ 12.0.003-74 [9], технологічний комплекс конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» супроводжується постійним або періодичним впливом на персонал низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ):

- хімічні чинники: аерозольне забруднення та підвищена запыленість робочої зони, а також високий рівень загазованості токсичними сполуками;

- фізичні чинники: підвищений рівень шуму від роботи газодинамічних і дутьових систем, несприятливі параметри мікроклімату та освітленості;

- термічні небезпеки: випромінювання від розплавленого металу й шлаку (температура понад 1500–1600 °С), ризик контакту з нагрітими поверхнями обладнання, вплив відкритого полум'я та викидів іскор;

- психофізіологічні фактори: значні статичні й динамічні фізичні зусилля, високий рівень нервово-психічної напруги під час керування складними металургійними агрегатами;

- ризики механічного та просторового характеру: експлуатація важкого вантажопідйомного обладнання, рух залізничного складу і спеціального транспорту, а також виконання робіт на висоті;

- техногенні загрози: загальна вибухопожежонебезпека виробничого середовища.

3.1.1 Аналіз санітарно-гігієнічних умов праці на робочих місцях

Підвищену загазованість у робочій зоні конвертерного цеху створюють переважно гази оксид азоту (NO), діоксид азоту (NO₂) та монооксид вуглецю (CO). Оцінку токсикологічних ризиків проведено шляхом зіставлення фактичних концентрацій із гранично допустимими концентраціями (ГДК) шкідливих речовин згідно з чинними санітарними нормами [9]. Класифікацію речовин за ступенем токсичної дії виконано за ГОСТ 12.1.007-76 [10]. Незважаючи на те, що фактичний рівень загазованості не перевищує гранично допустимі межі, висока абсолютна концентрація CO вимагає постійного приладового контролю та надійної роботи аспіраційних систем.

Інтенсивний шум у сталеплавильному виробництві здійснює деструктивний вплив на центральну нервову та серцево-судинну

системи персоналу, що за тривалого впливу може призвести до розвитку професійної «шумової хвороби» та приглухуватості.

Згідно з ГОСТ 12.1.003-83 [12], допустимий еквівалентний рівень звуку на робочих місцях становить 80 дБ. Проте інструментальні вимірювання в цеху зафіксували фактичний рівень шуму на рівні 115 дБ. Перевищення нормативу на 35 дБ вимагає жорсткого застосування засобів індивідуального захисту органів слуху (протишумні навушники, беруші) та звукоізоляції кабін керування агрегатами.

Освітлення конвертерного цеху організовано за комбінованою схемою (поєднання природного денного світла та штучних джерел). Відповідно до будівельних норм ДБН В.2.5-28-2006 [13], процеси у цеху віднесені до VII розряду зорової роботи (зоровий контроль загального ходу процесу).

Основні нормативні параметри світлового середовища згідно з ДБН В.2.5-28-2006 [13]:

- Штучне загальне освітлення: не менше 200 лк при показнику осліпленості 40% та коефіцієнті пульсації світлового потоку 20%.

- Коефіцієнт природної освітленості (КПО): при верхньому або комбінованому природному освітленні — 3%, при боковому — 1%. При суміщеному (штучному + природному) освітленні нормативи становлять 1,8% (для верхнього) та 0,6% (для бокового).

- Евакуаційне освітлення: забезпечує мінімальну освітленість на підлозі основних проходів та сходах у приміщеннях — 0,5 лк, на відкритих територіях підприємства — 0,2 лк.

- Чергове та охоронне освітлення: нормується в розмірі 5% від робочого освітлення загальної системи, але має становити не менше 2 лк всередині будівель та не менше 1 лк на зовнішній території підприємства.

3.1.2 Протипожежний захист та безпека електроустановок

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [48] та ДБН В.1.1-7-2002 [14], будівля конвертерного цеху за вибухопожежною небезпекою належить до категорії Г (наявність гарячих, розплавлених матеріалів, що виділяють променисте тепло, іскри та полум'я). Будівля має II ступінь вогнестійкості. За Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) приміщення класифікується як пожежонебезпечна зона класу П-III.

Для захисту складного електроустаткування від струмів короткого замикання та тривалих перевантажень, які є поширеними причинами пожеж, застосовується комплексна тривірнева система захисту:

- автоматичні вимикачі (миттєве розмикання кола при КЗ);
- плавкі запобіжники;
- теплові реле (захист електродвигунів від перегріву).

Технічне оснащення цеху засобами первинного пожежогасіння охоплює:

Внутрішній протипожежний водопровід, обладнаний пожежними кранами, рукавами та стволами.

Зовнішні пожежні гідранти, розташовані у спеціальних підземних колодязях на території підприємства.

Стаціонарні зовнішні пожежні драбини для забезпечення швидкого доступу ліквідаційних бригад до покрівлі споруди.

З метою підвищення загального рівня протипожежної стійкості цеху пропонуються такі організаційно-профілактичні заходи:

регулярний тепловізійний моніторинг стану кабельних ліній та силових шаф із негайним усуненням дефектів ізоляції;

чітке регламентне обслуговування, ревізія та випробування пожежних кранів із періодичністю не рідше одного разу на 7 місяців.

3.1.3 Нормативно-правове регулювання та інструкції з охорони праці

Виконання всіх технологічних операцій на робочих місцях конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» здійснюється у суворій відповідності до базового законодавства України та державних нормативно-правових актів з охорони праці (НПАОП).

1. Перелік державних регуляторних актів:

- Закон України «Про охорону праці»;
- НПАОП 27.1-1.01-09 «Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві»;
- НПАОП 27.0-7.04-21 «Мінімальні вимоги щодо безпеки та здоров'я на роботі в металургійній промисловості»;
- НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» (Наказ МВС №1417 від 30.12.2014);
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- НПАОП 27.1-1.09-09 «Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії»;
- НПАОП 0.00-1.80-18 «Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання»;
- НПАОП 27.1-1.06-08 «Правила охорони праці під час ремонту обладнання на підприємствах чорної металургії».

2. Перелік чинних цехових інструкцій з охорони праці (ІОП) для персоналу:

- ІОП №10.58.22 для оператора завантаження конвертера дільниці підготовки виробництва КЦ;
- ІОП №10.60.22 для міксерової дільниці підготовки виробництва КЦ;

- ІОП №10.41.22 для сталевара конвертера КВ КЦ;
- ІОП №10.45.22 для підручного сталевара конвертера (перший, другий) КВ КЦ (Зміна №1);
- ІОП №10.53.22 для підручного сталевара конвертера 5-го розряду КВ КЦ;
- ІОП №10.43.22 для робітників, які виконують обов'язки плавильників розкислювачів КВ КЦ;
- ІОП №10.61.22 для міксерових, що суміщають професію машиніста-транспортувальника гарячого металу міксерного відділення ДПВ КЦ;
- ІОП №10.09.22 для шихтувальника шихтового двору дільниці підготовки виробництва КЦ;
- ІОП №10.48.22 для машиніста-транспортувальника гарячого
- ІОП №10.39.22 для машиніста дистриб'ютора 7-го розряду (без дистанційного керування) КВ КЦ;
- ІОП №10.40.22 для машиніста дистриб'ютора 8-го розряду (з дистанційним керуванням) КВ КЦ;
- ІОП №10.31.22 для машиніста газодувних машин (димососів) КЦ;
- ІОП №10.46.22 для газівників КЦ;
- ІОП №10.35.22 для бригадира з переміщення сировини, напівфабрикатів і готової продукції дільниці ПВ КЦ;
- ІОП №10.19.22 для шихтувальника шихтового двору КЦ.

3.1.4 Корпоративна система безпеки: Аналіз безпеки виконання робіт (АБВР) та кардинальні правила

З метою мінімізації виробничого травматизму на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» впроваджено систему превентивного менеджменту ризиків, ключовим елементом якої є обов'язкове проведення Аналізу безпеки

виконання робіт (АБВР) безпосередньо перед початком робочої зміни чи операції.

Алгоритм проведення АБВР передбачає такі кроки:

Визначення наявних та потенційних джерел небезпеки під час виконання конкретного завдання.

металу 3-го розряду (шлаковоза) КВ КЦ;

- ІОП №10.52.22 для машиніста-транспортувальника гарячого металу 4-го розряду (шлаковоза) КВ КЦ;

Оцінка можливих наслідків для здоров'я людей та стану довкілля.

Визначення та реалізація технічних і організаційних дій для надійного захисту від виявлених джерел небезпеки.

Розробка та узгодження заходів швидкого реагування на випадок виникнення нештатної чи аварійної ситуації.

Прийняття остаточного усвідомленого рішення про можливість безпечного початку робіт.

Кардинальні правила підприємства

Дотримання Кардинальних правил (КП) є основою збереження життя та реалізації права на безпечну працю. Порушення КП, виявлене під час аудиту або аналізу подій, є підставою для жорстких дисциплінарних стягнень аж до звільнення працівника.

Для усунення настилів на конвертері, обробки великих шматків скрапу чи очищення випускної льотки застосовують метод спалювання металу за допомогою технічно чистого кисню та сталеві трубки (спису).

Безпечне виконання операції вимагає дотримання такого алгоритму:

- Перевірка цілісності кисневих шлангів, редукторів та надійності закріплення трубки-списа у тримачі.

- Роботи проводяться виключно у спеціальних захисних костюмах металурга (із сукняних або спеціальних термостійких тканин) з використанням захисних щитків типу ОД із дзеркальним покриттям.

- Подача кисню у спис здійснюється плавно, після підпалювання кінця трубки від гарячого металу. Забороняється допускати контакт кисневого шланга з мастилами або відкритим вогнем.

Під час розкислення та легування сталі на випуску або на УКП використовуються алюмовмісткі матеріали (чушки, дріт, відсів шлаків, що містять Al а його сплави, оксид алюмінію Al_2O_3 , оксид кремнію SiO_2 та хлориди лужних металів).

Відповідно до санітарних класифікацій, ці матеріали утворюють аерозолі переважно фіброгенної дії і належать до шкідливих речовин 4-го класу небезпеки (речовини малонебезпечні). Вони характеризуються такими властивостями:

- Алюмовмісткий шлак не є токсичним, при його термічному розкладі чи горінні не відбувається виділення в повітря робочої зони вільного хлору або його газоподібних сполук, що не погіршує базові санітарно-гігієнічні характеристики робочих місць.

- Дрібнодисперсні відсів шлаків та порошоків не є вибухонебезпечними від ударів та тертя.

- Для контролю повітряного середовища встановлюється графік періодичного відбору проб безпосередньо на робочих майданчиках УКП та конвертерів.

Головною загрозою при роботі з алюмінієвими порошками й флюсами є їхня взаємодія з вологою, що може призвести до бурхливого виділення водню та ризику вибуху при контакті з рідкою сталлю. Тому регламентуються такі правила зберігання: матеріали повинні зберігатися виключно в окремих закритих сухих бункерах чи силосах, пристрій яких повністю виключає потрапляння всередину вологи (води, пари), відкритого полум'я або горючих речовин. Перед введенням матеріалу в ківш із рідкою сталлю здійснюється його обов'язковий попередній підігрів для видалення залишків гігроскопічної вологи.

3.2 Заходи щодо поліпшення умов праці

Для поліпшення умов праці, зниження впливу шкідливих і небезпечних виробничих факторів, а також мінімізації ризиків травматизму в конвертерному цеху пропонується комплекс технічних, організаційних та медико-профілактичних заходів.

Оскільки фактичний рівень шуму в цеху становить 115 дБ і значно перевищує норму у 80 дБ, необхідно провести повну модернізацію та герметизацію кабін керування конвертерами, міксерами та установками «Ківш-Піч» із використанням сучасних звукоізоляційних сендвіч-панелей та подвійних склопакетів.

Для утримання фактичних концентрацій токсичних газів (NO, NO₂, CO) та пилу в межах встановлених гранично допустимих норм (ГДК) [10] необхідно оптимізувати роботу газоочисних споруд і димососів [10]. Потрібно впровадити локальні відсмоктувачі у місцях інтенсивного виділення газів (біля випускної льотки та на ділянці позапічної обробки).

Для безпечного зберігання алюмовмістких матеріалів необхідно модернізувати систему завантаження та повністю герметизувати окремі накопичувальні бункери, що унеможливить потрапляння вологи, яка викликає реакцію з виділенням вибухонебезпечного водню.

Для забезпечення стабільного штучного освітлення на рівні не менше 200 лк (для VII розряду зорової роботи за ДБН В.2.5-28-2006) пропонується заміна застарілих газорозрядних ламп на енергоефективні промислові LED-світильники із матовими розсіювачами, що дозволить знизити коефіцієнт пульсації нижче 20% та усунути ефект осліплення.

Забезпечити 100% охоплення персоналу цеху процедурою проведення Аналізу безпеки виконання робіт перед початком будь-якої

технологічної операції. Кожен робітник повинен чітко реалізувати своє право на відмову від роботи у разі виявлення не усунених небезпек.

Впровадити систему постійного внутрішнього аудиту та відеомоніторингу для виявлення порушень Кардинальних правил (зокрема, знаходження людей у зоні роботи кранів, переміщення між вагонами або робота на висоті без засобів захисту від падіння) Організувати обов'язкове безперервне автоматичне вимірювання складу повітряного середовища в газонебезпечних місцях I та II груп за допомогою стаціонарних та індивідуальних багатоконпонентних газоаналізаторів.

Забезпечити суворе дотримання графіків регламентного технічного обслуговування внутрішнього протипожежного водопроводу та пожежних кранів з періодичністю не рідше одного разу на 7 місяців.

Персонал цеху повинен бути повністю укомплектований спецодягом із термостійких та сукняних тканин, касками з термостійкими щитками (для захисту від випромінювання розплаву та іскор), а також засобами індивідуального захисту органів слуху високого класу ефективності (протишумні навушники з шумозаглушенням понад 35 дБ).

Облаштувати в кімнатах відпочинку та на робочих місцях стаціонарні сатураторні установки або кулери з підсоленою газованою грошовою водою (для компенсації втрати солей та вологи організмом в умовах інтенсивного теплового випромінювання). Кабіни відпочинку та пультової мають бути оснащені системами кондиціонування повітря для нормалізації мікроклімату.

Проведення обов'язкових періодичних медичних оглядів працівників, які піддаються тривалому впливу виробничого шуму потужністю 115 дБ та фібро генного пилу, для раннього виявлення ознак професійних захворювань («шумової хвороби», приглухуватості, пневмоконіозів) та своєчасного надання санаторно-курортного лікування.

3.3 Захист навколишнього середовища

Забезпечення екологічної безпеки, охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів є фундаментальними передумовами сталого економічного та соціального розвитку України. Державна екологічна політика спрямована на формування гармонійної взаємодії між антропогенною діяльністю та природними комплексами, мінімізацію ризиків для здоров'я населення та збереження біо- і ландшафтної різноманітності.

Відповідно до положень Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» [51], ключовими завданнями законодавчого регулювання є запобігання деградації природних систем, ліквідація наслідків негативного впливу господарської діяльності та збереження об'єктів, що мають історико-культурну цінність.

З метою мінімізації антропогенного навантаження на довкілля та забезпечення відповідності підприємства сучасним вимогам сталого розвитку, у конвертерному цеху впроваджено системну інтеграцію екологічних принципів у виробничу діяльність.

Під час виплавки сталі та експлуатації технологічних агрегатів обов'язковим є виконання вимог таких нормативно-правових актів та корпоративних документів.

Державне законодавство:

- «Водний кодекс України» № 213/95-ВР;- «Земельний кодекс України» № 2768-III;
- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» № 1268-XII [51];
- Закон України «Про охорону атмосферного повітря» № 2535-III;
- Закон України «Про управління відходами» № 2320-IX;
- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення» № 4004-XII.

Внутрішні регламенти та розпорядчі документи підприємства:

- Настанова щодо інтегрованої системи екологічного управління і управління охороною здоров'я та безпеки праці;
- Положення «Забезпечення безпеки робіт підвищеної небезпеки, які виконуються підрядними організаціями» (затверджене внутрішнім наказом);
- Регламент експлуатації установок очистки газу (ГОУ);
- Регламент управління відходами;
- Паспорт місць збору та збереження відходів у конвертерному цеху;
- Реєстр екологічних аспектів конвертерного цеху.

Для реалізації запобіжного підходу та екологізації виробництва, два діючі конвертери цеху обладнані високоефективними газовідвідними трактами. Вони виконують функції організованого відводу, радіаційно-конвекційного охолодження, глибокого очищення від пилу та часткового допалювання конвертерних газів перед їхнім викидом в атмосферу.

Газовідвідний тракт кожного конвертера є замкнутим технологічним ланцюгом, що включає такі основні вузли:

Котла-охолоджувач конвертерних газів марки ОКГ-130бд-М: Конструктивно складається з кесона зі зсувною юбкою, трьох кесончиків та стаціонарного газоходу з охолоджуваними кришками і трубними ширмами в опускному газоході.

Елементи циркуляції: циркуляційні трубопроводи котла-охолоджувача із запірною-регулюючою та запобіжною арматурою.

Тяго дуттьове обладнання: потужний центральний нагнітач газу.

Фінальний вузол: вертикальна свічка допалювання з інтегрованим допалюючим пристроєм у верхній частині ствола.

Очищення та еволюція параметрів конвертерного газу вздовж газоочисного тракту відбуваються за такою кінетичною схемою:

Гази, виходячи з конвертера, проходять крізь котел-охолоджувач (ОКГ), де їхня температура знижується до $700 \text{ } ^\circ\text{C}$. Далі по опускному газоходу вони спрямовуються у вузол попереднього охолодження (УПО). В апараті УПО за рахунок першого ярусу зрошення водою відбувається миттєве зниження температури газу до $85 \text{ } ^\circ\text{C}$ та первинне конденсаційне вловлювання великих часток пилу.

Охолоджений пило газовий потік надходить у скруббер, куди через зрошувальні пристрої безперервно подається освітлена вода з оборотного циклу. Тут відбувається відмивання крупнодисперсного пилу. Ефективність вловлювання пилу на цьому етапі становить до 70%. Шламова вода скидається через бункер першого ступеня очищення. Попередньо очищений газ через перехідний газопровід (де встановлені додаткові яруси зрошення для стабілізації вологості) надходить у прямокутну трубу Вентурі. За рахунок звуження горловини, переріз якої регулюється гідроциліндром, швидкість газового потоку різко зростає. Кисневий газ вступає у високотурбулентну взаємодію з форсунковим водяним розпиллом. Це дозволяє скоагулювати та видалити дрібнодисперсні фракції субмікронного пилу до значень кінцевої запиленості, що суворо регламентовані чинним Дозволом на викиди забруднюючих речовин. Одночасно газ охолоджується до $55 \text{ } ^\circ\text{C}$. Очищений газовий потік разом із краплями води потрапляє в бункер другого ступеня, де встановлено краплєвловлювач із двосекційним регульованим завихрювачем.

Під дією відцентрових сил важкі краплі води відкидаються до стінок краплєвловлювача і стікають через трубопроводи у бак-гідрозатвор другого ступеня, звідки шламова вода видаляється у цехові шламопроводи. Очищений та осушений конвертерний газ по чистій газовій магістралі Ду3000 засмоктується нагнітачем.

Після нагнітача газ під тиском подається у ствол свічки допалювання. У верхній частині ствола, на виході в атмосферу,

встановлено спеціальний допалювальний пристрій. Тут відбувається повне окиснення (згоряння) токсичного монооксиду вуглецю до безпечного діоксиду вуглецю що виключає ризик отруєння приземних шарів атмосфери над територією підприємства та СЗЗ.

Окрім охорони атмосферного повітря, важливим аспектом є захист земельних та водних ресурсів від забруднення твердими промисловими відходами (шлами газо очистки, відпрацьовані вогнетриви, скрап). Поводження з ними базується на таких правилах:

Персонал цеху зобов'язаний здійснювати роздільний збір та сортування відходів виключно у спеціально обладнаних та маркованих місцях, визначених Паспортом місць збору/збереження відходів у конвертерному цеху.

Територія структурного підрозділу та закріплені за ним зони повинні утримуватися в належному санітарному стані.

Категорично забороняється організовувати несанкціоновані звалища чи накопичення відходів на території цеху та підприємства. Всі утворені шлами підлягають зневодненню та подальшому передаванню на утилізацію (агломераційне виробництво) або захоронення у встановленому законом порядку.

Висновки за розділом

У розділі кваліфікаційної роботи, присвяченому екологічній безпеці та охороні навколишнього природного середовища в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», проведено детальний аналіз нормативно-правової бази та інженерно-технічних рішень, спрямованих на зниження антропогенного навантаження на довкілля. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

Охарактеризовано державну екологічну політику та нормативно-законодавче регулювання металургійного виробництва, що базується на Водному, Земельному кодексах України та Законах

України «Про охорону навколишнього природного середовища» [15], «Про охорону атмосферного повітря» та «Про управління відходами». Конвертерний цех повністю інтегрований у систему екологічного менеджменту підприємства через чинні технологічні регламенти, Паспорт місць збереження відходів та Реєстр екологічних аспектів.

Розглянуто конструктивні особливості та вузли газовідвідного тракту двох діючих конвертерів, який забезпечує ефективний відвід, радіаційно-конвекційне охолодження в котлах ОКГ-130бд-М (до температури 700 \ 850°C) та багатокомпонентне очищення конвертерних газів.

Описано кінетику та двоступеневу схему мокрого очищення пилю газового потоку: первинне вловлювання великих фракцій пилю та охолодження газу до 85 \ 90 °C у вузли попереднього охолодження та скрубери (ефективність до 70%), з наступним тонких очищенням від субмікронного пилю у високо турбулентній прямокутній трубі Вентурі з регульованою горловиною та охолодженням газу до 55 \ 60 °C.

Доведено екологічну ефективність роботи краплевловлювача з двосекційним завихрювачем, який за рахунок відцентрового ефекту відокремлює крапельну вологу від очищеного газу, спрямовуючи шламову воду через баки-гідрозатвори в цеховий оборотний цикл водопостачання, що мінімізує споживання свіжої річкової води.

Обґрунтовано технологію термічної утилізації монооксиду вуглецю, яка реалізується у спеціальному допалювальному пристрої на зрізі вертикальної свічки допалювання після нагнітача. Цей захід забезпечує повне переведення токсичного СО у безпечний діоксид вуглецю (СО₂) перед викидом в атмосферне повітря, гарантуючи виконання вимог Дозволу на викиди та захист приземного шару атмосфери.

Сформульовано жорсткі операційні вимоги до експлуатації газоочисних установок (ГОУ), що включають контроль герметичності

з'єднань для виключення витоків газу або підсосів повітря, моніторинг безперервного виводу шламових вод із бункерів та суворе дотримання графіків планово-попереджувальних ремонтів (ТО і ТР).

Визначено чіткий регламент поводження з промисловими відходами в цеху, який зобов'язує персонал здійснювати роздільний збір та сортування у спеціально обладнаних зонах відповідно до Паспорту місць збору/зберігання відходів, категорично забороняючи створення несанкціонованих звалищ.

Таким чином, впроваджений комплекс газоочисного устаткування, систем зворотного водопостачання та термічного допалювання оксиду вуглецю в конвертерному цеху забезпечує високий рівень екологічної безпеки виробництва, мінімізує негативний вплив на атмосферне повітря та гідросферу регіону, задовольняючи принципам сталого розвитку.

4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Метою цього розділу є розрахунок собівартості однієї тонни рідкої конвертерної сталі в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та оцінка економічної ефективності оптимізації шлакового і дуттьового режимів.

Завдяки впровадженню раціонального поєднання «жорсткої» та «м'якої» продувки, оптимізації витрати вапна залежно від вмісту кремнію [Si] (згідно з табл. 2.1) та зменшенню кількості проміжних скачувань шлаку, досягається підвищення виходу придатного рідкого металу на 1,5% (з 87,0% до 88,5%) за рахунок зниження втрат заліза з викидами, виносками та шлаком.

4.1. Розрахунок матеріального балансу та витрат на шихту

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на оцінку впливу ключових технологічних і газодинамічних параметрів киснево-конвертерної плавки на її техніко-економічні показатели. За результатами проведеного теоретичного аналізу, математичного моделювання та обробки експериментальних даних сформульовано такі висновки:

Проаналізовано сучасний стан та науково-технічні тенденції розвитку киснево-конвертерного процесу. Встановлено, що ключовим резервом підвищення ефективності сучасних великовантажних конвертерів є оптимізація газодинамічних параметрів подачі кисню (висоти фурми Нф та витрати VO_2) та інтенсифікація раннього шлакоутворення, що забезпечує стабільний хід плавки без викидів металошлакової емульсії.

На основі розрахунку матеріального балансу плавки визначено, що питома витрата рідкого чавуну становить ___ кг/т сталі, а металобрухту — ___ кг/т (при загальній масі металошихти ___ кг на тонну придатної сталі). Розраховано, що підвищення вмісту кремнію в чавуні на кожні ___% призводить до зростання витрати вапна на ___% та збільшення виходу шлаку, що, відповідно, знижує прямий вихід придатного рідкого металу на ___%.

Складено тепловий баланс процесу, згідно з яким основними прихідними статтями є фізичне тепло рідкого чавуну (___%) та екзотермічний ефект реакцій окиснення домішок, переважно вуглецю та кремнію (___%). Визначено, що оптимізація допалювання оксиду вуглецю (CO , CO_2) у робочому просторі конвертера дозволяє додатково залучити до ___% тепла, що створює умови для збільшення частки брухту в завалці на ___%

Оцінено вплив шлакового та рафінувального режимів на якість готового металу. Встановлено, що підтримання кінцевої основності шлаку (CaO/SiO_2) на рівні ___ та вмісту оксидів заліза (FeO) в межах ___ – ___% забезпечує ступінь дефосфорації металу не менше ___% та десульфурзації — ___%, що дозволяє стабільно отримувати заданий хімічний склад сталі із мінімальним вмістом шкідливих домішок (вміст фосфору та сірки в готовій сталі _____%).

Шляхом статистичного аналізу виробничих логів доведено, що перехід на оптимізований комбінований графік продукції (зниження фурми на ___ м на ___-й хвилині плавки із одночасним коригуванням витрати кисню) забезпечує:

- Збільшення виходу придатного рідкого металу на _____% за рахунок зниження виносів та королькових втрат;
- Зниження питомої витрати кисню на ___ $\text{м}^3/\text{т}$;
- Скорочення тривалості продукції на ___ хв, що підвищує загальну продуктивність агрегату.

Розраховано економічний ефект від впровадження запропонованих рекомендацій. За рахунок зниження собівартості шихтових матеріалів (заміщення частини чавуну дешевшим брухтом), зменшення втрат заліза зі шлаком та підвищення стійкості футеровки конвертера очікуване зниження витрат на виробництво однієї тонни сталі становить ___ грн, що при річній продуктивності цеху забезпечує умовний економічний ефект у розмірі _____ млн грн.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойченко Б. М., Охотський В. Г., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія : підручник. Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-Вал», 2004. 454 с.
2. Сталеплавильне виробництво : навч. посіб. / В. І. Баптизманський, Б. М. Бойченко, О. П. Величко та ін. Київ : ІЗМН, 1996. 400 с.
3. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технологія одержання металів і сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / за ред. В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.
4. Баптизманський В. І., Меджибожський М. Я., Охотський В. Б. Конвертерні процеси виробництва сталі: теорія, технологія, конструкції агрегатів. Київ : Вища школа, 1984. 343 с.
5. Смирнов О. М. Металургія сталі. Киснево-конвертерний процес : навч. посіб. Донецьк : ДонНТУ, 2012. 386 с.
6. Охотський В. Б. Газодинаміка та тепломасообмін у сталеплавильних процесах. Дніпропетровськ : Системні технології, 2008. 274 с.
7. Основи наукових досліджень / М. В. Гриньов, О. М. Кононенко та ін. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 400 с.
8. Коновалов Ю. В., Назаров О. В. Теплові процеси та агрегати в металургії : навч. посіб. Дніпро : Ліра, 2018. 254 с.
9. Синельников В. О., Паніотов Ю. С. Обґрунтування та вибір раціональних схем позапічної обробки сталі. Сучасна металургія: проблеми та рішення. 2015. № 2. С. 45–52.
10. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 р. № 1596.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text> (дата звернення: 21.06.2026).

11. The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume / ed. by R. J. Fruehan. Pittsburgh : AISE Steel Foundation, 1998.

12. Treatise on Process Metallurgy. Vol. 3: Industrial Processes / ed. by S. Seetharaman. Oxford : Elsevier, 2014. 1744 p.

13. Смирнов О. М. Позапічна обробка сталі : навч. посіб. Донецьк-Покровськ : ДонНТУ, 2014. 292 с.

14. Бубликов В. Б. Нові литі матеріали на основі високоміцного чавуну. Київ : Інститут проблем лиття НАН України, 2012. 360 с.

15. Смирнов В. О., Пілюшенко В. Л., Мінаєв А. А. Позапічна обробка сталі. Донецьк : Норд-Прес, 2005. 344 с.

16. Технологічна інструкція ТІ 230-С320-2026. Виплавка конвертерної сталі. Сталеплавильне виробництво ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Кам'янське, 2026.

17. Конституція України : Закон України від 28.06.1996 р. № 254к/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр> (дата звернення: 21.06.2026).

18. Про затвердження Порядку складання та вимоги до санітарно-гігієнічних характеристик умов праці : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 13.12.2004 р. № 614. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1336-04> (дата звернення: 21.06.2026).

19. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів : ДСП 173-96. Київ : МОЗ України, 1996. 100 с.

20. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. Київ : Держстандарт України, 1999. 31 с.

21. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та

напруженості трудового процесу : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 р. № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 21.06.2026).

22. Безпека машин. Загальні принципи проектування. Оцінення ризиків та зменшення ризиків : ДСТУ EN ISO 12100:2014 (EN ISO 12100:2010, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 82 с.

23. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037-99. Київ : МОЗ України, 1999. 29 с.

24. Системи стандартів безпеки праці. Шкідливі речовини. Класифікація і загальні вимоги безпеки : ДСТУ ГОСТ 12.1.007:2013. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 14 с.

25. Акустика. Визначення впливу виробничого шуму та оцінювання ризику погіршення слуху : ДСТУ EN ISO 9612:2014 (EN ISO 9612:2009, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 32 с.

26. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2006. Київ : Мінбуд України, 2006. 76 с.

27. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : НАПБ Б.03.002-2007. Київ : УкрНДІПБ, 2007. 27 с.

28. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1-7:2002. Київ : Держбуд України, 2003. 42 с.

29. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників : НАПБ Б.03.001-2004. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0554-04> (дата звернення: 21.06.2026).

30. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. Відомості Верховної Ради України. 1991. № 41. Ст. 546.