

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії та організації виробництва

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП



Сергій СЕМІРЯГІН

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Металургія сталі»  
за спеціальністю 136 Металургія

на тему «Дослідження впливу параметрів продувки сталі в конвертері  
на матеріальний баланс плавки»

Керівник роботи

Костянтин НІЗЯЄВ

Наставник від бази  
практики

Костянтин ДЕЙНЕКА

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

Здобувач

Максим ГУСАК

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

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя 2025

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та організації виробництва</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія</u>
ОПП	<u>Металургія сталі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Сергій СЕМІРЯГІН

25 грудня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Гусак Максиму Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Дослідження впливу параметрів продувки сталі в конвертері на матеріальний баланс плавки  
керівник роботи Нізяєв Костянтин Георгійович, проф., докт. техн. наук.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом Університету №238/14.10.2024 від 14.10.2024 р
2. Термін подання роботи: 15 лютого 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Навчальна, методична література з 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 конверторах, матеріальний та тепловий баланс плавки. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз даних роботи конверторів ПрАТ «Каметсталь». Визначення взаємозв'язків між технологічними параметрами конверторної плавки та її результатами.. Розділ 3 . Охорона праці в конверторному відділенні. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.
5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 7 слайдів по розділам 1,2; 1 слайд по розділу 3; 1 слайд по розділу 4.

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

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 1	Нізяєв К.Г., професор
Розділ 2	Нізяєв К.Г., професор
Розділ 3	Нізяєв К.Г., професор
Розділ 4	Латишева О.В, доцент

7. Дата видачі завдання 25.12.2024 р

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Теоретичний розділ (Аналітично-пошуковий)	25.12.2024-03.01.2025
2	Розділ 2. Технологічний розділ	03.01.2025-23.01.2025
3	Розділ 3. Охорона праці	23.01.2025-26.01.2025
4	Розділ 4. Економічний розділ	26.01.2025-30.01.2025
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, автореферат	30.01.2025-03.02.2025
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	03.02.2025-05.02.2025
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	05.02.2025-15.02.2025
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	15.02.2025-20.02.2025

Здобувач

Максим ГУСАК

Керівник роботи

Костянтин НІЗЯЄВ

## АНОТАЦІЯ

*Гусак Максим Геннадійович.* Дослідження впливу параметрів продувки сталі в конвертері на матеріальний баланс плавки. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 136 *Металургія*, ОПП «Металургія сталі» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

*Об'єктом дослідження* є технологія виплавки сталі в кисневому конвертері.

*Предметом дослідження* є дослідження впливу параметрів продувки на матеріальний баланс киснево-конвертерної плавки.

У першому розділі проаналізовано відомі варіації киснево-конвертерного процесу. Надана загальна характеристика впливу хімічного складу чавуну на показники конвертерної плавки. В результаті визначена необхідність встановлення впливу параметрів продувки конвертерної ванни киснем, зокрема інтенсивності продувки, на витрату шихтових матеріалів, яке планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи.

У другому розділі проведено аналіз діючої технології плавки сталі в конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», зокрема методика шихтовки плавки та режими продувки плавки, обґрунтовано методика статистичного аналізу паспортів плавок, наведено його результати та практичні рекомендації, щодо впровадження у виробництво.

У третьому розділі розглянуто основні шкідливі фактори і небезпечності при виконанні робіт, заходи техніки безпеки, пожежної профілактики, екологічної безпеки для конверторного цеху.

У четвертому розділі виконано оцінку планового економічного ефекту від впровадження запропонованих заходів.

**КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, РЕЖИМИ ПРОДУВКИ, ШИХТОВКА ПЛАВКИ**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОЛІПШЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ .....	7
1.1 Аналіз стану питання по літературним даним по удосконаленню технології конвертерної плавки.....	7
1.2 Аналіз сучасних варіацій киснево-конвертерного процесу.....	15
1.3 Аналіз впливу шихтових матеріалів на показники конвертерної плавки.....	23
1.3.1 Вплив вмісту кремнію в чавуні на хід киснево-конвертерної плавки .....	24
1.3.2 Вплив вмісту марганцю в чавуні на хід киснево-конвертерної плавки .....	25
1.3.3 Вплив вмісту фосфору в чавуні та сірки на хід киснево-конвертерної плавки та методи їх видалення .....	26
1.3.4 Вплив вмісту вуглецю в чавуні на вихід придатного металу та час продувки.....	29
Висновки по розділу .....	33
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	34
2.1 Огляд методів шихтовки і режимів продувки в конвертері в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».....	34
2.1.1 Шихтовка плавки.....	34
2.1.2 Режим ведення продувки .....	35
2.2 Методика статистичного аналізу паспортів плавок .....	42
2.3 Результати статистичної обробки масиву плавок.....	45

2.4 Висновки та рекомендації до практичного впровадження.....	55
3 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	56
3.1 Загальна характеристика умов праці.....	56
3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика.....	59
3.3 Захист навколишнього середовища .....	62
4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	64
4.1 Обґрунтування економічної ефективності рекомендованої технології.....	64
4.2 Визначення економічного ефекту від запропонованих заходів .....	66
Висновки за розділом .....	68
ВИСНОВКИ .....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	70

## ВСТУП

Воєнні дії на території України наразі є одним з найвагоміших викликів, з якими доводиться стикатися вітчизняній промисловості і гірничо-металургійному комплексу зокрема. Це пов'язано як зі скороченням виробничих потужностей через їх фізичне пошкодження та руйнування так і з ускладненням і необхідністю переорієнтації логістичних шляхів постачання сировини до підприємств та готової продукції замовникам.

У той же час чорна металургія України поряд із сільським господарством лишається однією з провідних галузей народного господарства. Вона забезпечує поповнення бюджету країни валютою через продаж сталі на міжнародному ринку. Але торгівля українським металом все ще здебільшого має сировинний характер. Для того, щоб утриматись на міжнародному ринку за важких умов сьогодення і за часів повоєнного відновлення у майбутньому, а також збільшити свої прибутки, необхідно звернути увагу на собівартість та якість сталі, що виробляється. Лише покращивши ці показники ми можемо розраховувати на конкурентоспроможність вітчизняної продукції.

Головним завданням української металургії в цей час є збереження й розширення присутності на світовому ринку.

У цьому зв'язку досить актуальними є питання підвищення техніко-економічних показників конвертерної плавки. Основними техніко-економічними показниками конвертерного процесу є витрати шихтових матеріалів, вихід придатної сталі і стійкість футерівки конвертера. Більшість сучасних досліджень в області виробництва конвертерної сталі спрямовано саме на поліпшення цих показників.

Отже тема даної дипломної роботи, присвячена вивченню впливу режиму продувки конвертерної плавки на витрату основних шихтових матеріалів та вихід придатного для умов ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОЛІПШЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

## 1.1 Аналіз стану питання по літературним даним по удосконаленню технології конвертерної плавки

Останніми роками спостерігається значне підвищення конкурентоспроможності киснево-конвертерного процесу, значною мірою завдяки розробці та впровадженню нових варіантів. Серед них особливо багатообіцяючим підходом, що обіцяє велике майбутнє процесу, є комбінована продувка металу киснем та іншими газами. У порівнянні з верхньою продувкою, вищезгаданий метод продувки покращує майже всі параметри процесу, включаючи продуктивність, вихід, якість сталі та інші відповідні показники [1].

Підвищена ефективність комбінованого продування пояснюється унікальними фізико-хімічними властивостями, які сприяють більш рівномірному, інтенсивному перемішуванню і масообміну у ванні. Цей процес також усуває або зменшує неактивні зони, покращує осідання ванни і забезпечує більш ефективну передачу тепла від газової фази агрегату до металу при допалюванні CO до CO<sub>2</sub> в робочому просторі конвертера [2].

Процес донної продувки дав поштовх до розвитку комбінованих методів. Унікальні характеристики цього процесу породили інноваційну концепцію застосування донно-верхньої продувки в конвертерах. Цей підхід передбачає одночасну подачу кисню через верхні або бічні водоохолоджувані фурми і подачу різних комбінацій технологічних газів через днище. Газу, що використовуються, включають кисень, введений в середовищі вуглецевого палива, або нейтральні газу [1].

Не викликає сумніву, що комбінована продувка є більш складним процесом, ніж традиційні конвертерні методи виробництва сталі. При

конвертуванні чавуну з вмістом фосфору понад 0,3% вдування порошкоподібного вапна слід здійснювати через верхню фурму. Або, якщо кисень подається знизу, вдування слід виконувати через нижню фурму.

При комбінованих процесах шлаки містять більше оксидів заліза на початку продувки і менше в кінці, ніж при лише верхній продувці на 4-8% за інших рівних розумів. Реакції видалення фосфору з металу завдяки більш інтенсивному перемішуванню ванни наближаються до рівноваги й оновленні шлаків, тобто за наявності в чавуні 0,06%P у готовій сталі міститься менше 0,003%P. У результаті зниження окисленості металу і шлаку економія розкислювачів і легуючих добавок залежно від марок сталі досягає 5-30% [3].

Внаслідок зниженого вмісту оксидів заліза й марганцю в шлаку, скорочення втрат з викидами вихід придатного при комбінованих процесах збільшується на 0,5-1%. Завдяки більш спокійному перебігу продувки, менш окисленому й не такому агресивному шлаку стійкість футерівки конвертерів зростає на 20-40%, а в окремих випадках – до 80% і складає на європейських заводах більше 2000 плавов; питомі витрати вогнетривів при цьому знизилися на 80%. Причому, стійкість верхніх кисневих фурм зросла удвічі [4].

Для виробництва сталі з особливо низьким вмістом сірки і фосфору на австрійських заводах розроблена технологія комбінованого процесу з двократною продувкою і оновленням шлаку. Після закінчення періоду продувки метал нагрітий приблизно до 1650°C, що дещо нижче за температуру випуску 1680°C. В цей час скачують частину шлаку і досаджують вапно. Потім інтенсивно перемішують ванну інертним газом для досягнення необхідної концентрації [P], при цьому знижується температура. Охолоджений метал нагрівають шляхом продувки киснем з одночасною подачею інертного газу через днище. Вміст [O] під час іншого періоду продувки зростає незначно- у

середньому на 0,065%. Сталь випускають з використанням пристрою для пневматичного відсікання шлаку і залишення частини металу в конвертері; [P] у готовій сталі  $\leq 0,005\%$ , [S] –  $0,003\%$ [3].

При KMS-процесі вміст [S] залежить від концентрації її в чавуні, твердому паливі і шлаковому режимі. При вмісті в паливі 0,3% S особливих труднощів в одержанні сталі з концентрацією сірки, характерною для процесів донного або верхнього дуття без застосування додаткового палива, не виникає. При більш високому вмісті сірки в паливі (0,8%) кінцевий вміст сірки складав 0,033% і збільшення витрат вапна не приводило до її зниження. Вважається необхідним поєднувати роботу з двома шлаками з додатковою десульфурою металу в ковші [5].

Кисневий конвертер верхнього дуття відрізняється відсутністю глухого днища і фурми, на відміну від конвертера нижнього дуття. Подача кисню здійснюється зверху через водоохолоджувану фурму під тиском від 1 до 2 МПа.

Витрата кисню на тонну сталі варіюється від 2 до 6 м<sup>3</sup>/(хв.·т). Питома витрата кисню становить приблизно 50 м<sup>3</sup>/т, а час продувки – 15-20 хвилин.

Футеровка кисневого конвертера складається з периклазо-вуглецевої, смолодоломітмагнезитової, смоло-доломітової або магнезитової цегли. Використання основних вогнетривів, що складаються з основних оксидів, полегшує наведення основного шлаку під час процесу, а також дефосфорацію і десульфурою металу.

Процес виплавки в кисневому конвертері з нормальним вмістом фосфору в чавуні (не більше 0,3%) здійснюється наступним чином. Конвертер нахиляють під кутом 40-70° від вертикального положення і завантажують у нього сталевий брухт. Далі в конвертер заливають чавун. Потім конвертер переводять у вертикальне положення, опускають фурму і проводять продувку ванни [6].

При продувці зверху чавунів із вмістом фосфору 0,4-0,5% активність з'єднань фосфору в шлакам, що утворюється при продувці виявляється настільки високою, що для досягнення низьких значень [P] необхідно мати досить велику масу вапняно-залізного шлаку. Звичайні добавки вапна й окислювачів вже не забезпечують успіху. Раціональним є скачування шлаку, що містить фосфор, і наведення нового вапняно-залізного шлаку. Тому скачування шлаку є необхідним технологічним прийомом при переробці фосфористих чавунів.

Оскільки шлак, який одержується при переробці фосфористих чавунів містить 10-20%  $P_2O_5$ , є цінним добривом, необхідно скачувати його у той момент, коли він представляє максимальну цінність як добриво [7].

У цей же час на ряді українських підприємствах були проведені дослідження по десульфурзації сталі кусковими твердими шлакоутворюючими сумішами різного складу: вапна із плавиковим шпатом, вапна із плавиковим шпатом і глиноземом, вапна із промисловими відходами [8]. Однак, незважаючи на економічність і перспективність цієї технології, авторами отримані нестабільні результати по ступені десульфурзації сталі від 10 до 50%, що можна пояснити недостатнім дослідженням впливу на рафінуючу здатність, формованих синтетичних шлаків гранулометричного складу і якості компонентів сумішей, ступеня розкислення металу й кількості конвертерних шлаків, що попадає, у ківш, матеріалу футерівки ковша й інших технологічних факторів. Ці пропозиції підтверджувалися тим, що в закордонній практиці знайшов промислове застосування високоосновний рідкорухомий шлак, який формується у процесі зливу металу з агрегату в ківш із твердої суміші вапна й плавикового шпату в співвідношенні (0,7-0,9):(0,3-0,1) [9]. Витрата шлакоутворюючої суміші звичайно становила 7-10 кг/т.

По даним [10], оптимальним співвідношенням основних компонентів з сформованих синтетичних шлаків з високою сульфідною ємністю є 3:1. При цьому сумарний вміст (Fe+Mn) у шлаку доцільно забезпечувати не більше 1% [9].

Технологія підготовки чавуну до конвертерної плавки повинна забезпечувати мінімальне вилучення доменного шлака з чавуновозного ковша, обов'язкове скачування шлаку після позадоменної обробки чавуну.

Звичайно надходження доменного шлаку у конвертер змушує витратити додаткову кількість вапна, приводить до збільшення витрат чавуну і металошихти в цілому, підвищення маси кінцевого конвертерного шлаку і зростання вмісту сірки в сталі. А надходження у конвертер шлака після позадоменної обробки чавуну також позбавляє її сенсу, тобто супроводжується тими ж самими наслідками [12].

Найбільш раціональний спосіб скачування шлаку – двостадійний: з чавуновозних ковшів відразу ж після позадоменної обробки чавуну та з заливальних ковшів перед зливанням чавуну в конвертер.

У доменних і міксерних шлаках при постачанні чавуну без обробки міститься 44-50%SiO<sub>2</sub>, 5-7%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 19-23% CaO, 2-8%MgO, 0,03-0,45%S.

Конвертерні цехи забезпечуються рідким чавуном за схемою: Доменний цех – Міксерне відділення – Конвертер.

Сталевий брухт використовується як охолоджувач ванни. Кількість брухту, що додається, визначається надлишковим теплом, яке утворюється під час процесу, і коливається в межах 23-27% від загальної ваги металевої шихти. Лом не повинен містити шматки товщиною більше 300 мм, кольорові метали, уламки і вибухонебезпечні матеріали, а також велику кількість іржі. Великі шматки слід подрібнювати, щоб вони не пошкодили футеровку під час завантаження і встигли розчинитися в рідкому металі до закінчення продувки. Легкий брухт і стружка повинні подаватися в конвертер не більше 20% від

загальної кількості брухту, а решта має бути упакована. Це пов'язано з тим, що при використанні непакетованого брухту збільшується час подачі і значно знижується температура ванни на початку продувки через швидке нагрівання брухту в чавуні. Розміри пакетів не повинні перевищувати 2000x1000x700 мм, при щільності не менше 1800 кг/м<sup>3</sup>. Було помічено, що брухт можна замінити окатишами, кіркою або губчастим залізом [13]. Їх можна додавати в процесі плавки без шкоди для продування через тракт подачі неметалевої шихти.

Подрібнену стружку і фрагментований брухт можна подавати в конвертер таким же чином і з тими ж перевагами.

Залізну руду, агломерат, окотиші із руди і прокатну окалину використовують у якості сипких охолоджувачів - „твердих окислювачів”. Їх можна завантажувати в конвертер без припинення продувки, вони поліпшують шлакоутворення, усувають різке охолодження ванни на початку плавки. Забезпечують збільшення виходу придатного металу в результаті відновлення заліза з його оксидів.

У той же час сипкі охолоджувачі створюють не досить постійний охолоджувальний ефект, що знижує точність регулювання температури металу; сприяють бурхливому розвитку процесу розчинення, збільшуючи викиди і знижуючи вихід рідкої сталі; підвищують частку чавуну в шихті, вміст SiO<sub>2</sub> та P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> у шлаку, витрати вапна та інших флюсів, кількість шлаку, втрати заліза зі шлаком і знос футерівки.

Вміст оксидів заліза в сипких матеріалах повинен бути високим, а кремнезему(менше 8%), вологи, сірки і дрібних фракцій – низьким. Порошкоподібну руду необхідно вдувати в метал, оскільки при звичайному методі введення вона виноситься газами із порожнини конвертера. Окалина, а також виготовлені з високоякісних рудних концентратів агломерат, окотиші і брикети містять менше 2,5% SiO<sub>2</sub>, тому їх застосовують частіше, ніж непідготовлену руду. Крім перерахованих вище охолоджувачів, іноді використовують вапняк і

водяну пару. Однак вони знижують вихід рідкої сталі, підсилюючи викиди, і приводять до деякого збільшення водню при введенні пари.

У якості шлакоутворюючих матеріалів у киснево-конвертерному процесі застосовують вапно, вапняк, боксит, плавиковий шпат.

Доведено, що присутність вапна має значний вплив на різні стадії конвертерного процесу, включаючи шлакоутворення, дефосфорацію, десульфуррацію і, в кінцевому підсумку, на якість виробленого металу. Вкрай важливо, щоб вапно було свіжообпаленим, містило мінімальну кількість сірки і мало високу флюсуючу здатність. Оптимальний розмір шматків – 10-40 мм. Швидкість розчинення великих шматків у шлаку значно нижча, ніж швидкість розчинення дрібних частинок, які видаляються під час продувки ванни. Найвища реакційна здатність вапна досягається при м'якому випалюванні вапняку, що призводить до утворення дрібних кристалів розміром менше 2 мкм з дефектами кристалічної решітки, що забезпечує значну пористість грудок. І навпаки, при відносно високотемпературному жорсткому («мертвому») випалюванні впродовж значного часу пористість вапна незначна, оскільки зрощені кристали великі. Втрати при прокалюванні мають бути мінімальними, оскільки вони свідчать про кількість недисоційованого вапняку в вапні і про вологу, поглинуту з атмосфери, що призводить до додаткових втрат тепла у ванні. Вигідно, щоб втрати при прокалюванні були в межах 3-5%. У цьому випадку барботаж шлаку бульбашками CO посилюється, що сприяє посиленому розтріскуванню шматків вапна і прискорює його розчинення в шлаку.

На технологічні показники багатьох металургійних процесів значною мірою впливає якість використовуваного вапна. Якість вапна визначається низкою показників, особливості яких залежать від конкретного процесу, в якому воно використовується.

Показники якості вапна тісно пов'язані з його фізико-хімічними властивостями: хімічним складом, величиною зерна, пористістю,

внутрішньою питомою поверхнею, твердістю тощо. Кожний з показників відбиває певну споживчу властивість вапна. Для конвертерного вапна обов'язковими є практично всі показники, у цьому зв'язку можна розглядати як еталон металургійного вапна з найбільш високими показниками якості.

Якість конвертерного вапна визначає низка технологічних і техніко-економічних показників конвертерного процесу: ступінь десульфурзації й дефосфорації, стійкість футеровки, питома витрата чавуну, плавикового шпату, вапна, вогнетривів.

Реакційна здатність вапна характеризує її властивість швидко розчинятися в шлаку. У зв'язку з невеликим часом шлакоутворення в конвертері (5-8 хв.) цей показник має важливе значення. На практиці реакційну здатність вапна характеризує якість випалу, під яким розуміють ступінь розвитку після випалювальних високотемпературних процесів спікання й рекристалізації зерен оксидів кальцію й магнію, що призводять до зменшення пористості й збільшенню густини вапна. При цьому відбувається зменшення питомої поверхні пор й їхнього питомого обсягу, а також збільшення крупності зерен вапна й підвищення його твердості. Вапно, яке одержано в процесі високотемпературних випалювальних процесів, умовно названо твердо обпаленим на відміну від м'яко обпаленого, котре обпалено при помірних температурах (без процесів спікання й рекристалізації).

Твердо обпалене вапно в порівнянні з м'яко обпаленим є більш стійким в атмосфері, і його взаємодія з водою протікає повільніше. У цьому зв'язку час взаємодії вапна з водою прийнятий як показник реакційної здатності.

Використання плавикового шпату має на меті прискорення процесів шлакоутворення. Він повинен мати розміри не більше 100 мм та повинен бути сухим. Плавиковий концентрат повинен відповідати ДСТУ 29220-91.

Боксит і плавиковий шпат застосовують для прискорення розчинення оксиду кальцію у шлаку і зменшенню його в'язкості. Головна складова бокситу – глинозем. Недоліком бокситу є наявність у ньому вологи і кремнезему. Останній знижує основність шлаку і стійкість футеровки. Витрати бокситу складають 0,5-1% від маси металеві шихти [15].

В даний час у киснево-конвертерних цехах країни замість бокситу застосовують плавиковий шпат, що містить не більше 5%  $\text{SiO}_2$ . При порівняно малих витратах цього розріджувача шлаку вапно швидко розчиняється і формується рідко рухомий високо основний шлак.

## 1.2 Аналіз сучасних варіацій киснево-конвертерного процесу

На світовому та національному рівнях у конвертерному виробництві застосовують різноманітні технології, що зумовлено насамперед різноманітністю перероблюваних чавунів, їхнім складом і часткою металобрухту в шихті. Крім того, важливими факторами є численні режими конвертерної плавки і широкий асортимент вироблених сталей, включаючи високоякісні сталі для критично важливих застосувань. В останнє десятиліття як на міжнародному рівні, так і в Україні з метою розвитку конвертерних процесів розглядалися наступні напрямки: вдосконалення конструкції агрегатів і технологічних варіантів дуття; розробка технологій виробництва сталей з мінімальним вмістом шкідливих і баластних домішок, «чистих» і «особливо чистих» сталей; підвищення продуктивності конвертерів з одночасним вирішенням екологічних питань; підвищення довговічності вогнетривкої футеровки [16].

Необхідність вистояти в умовах жорсткої конкуренції, що характеризує світовий ринок сталі, змусила власників та керівників підприємств звернути увагу на технічну та технологічну прогалину, що

утворилася протягом попереднього десятиліття внаслідок повільних темпів переоснащення. Наразі підприємства здатні виділяти половину з необхідних 1 млрд. грн. на рік на відновлення галузі. Урядові організації знаходяться в процесі визначення того, як організувати державну підтримку для зміни ситуації в цій сфері. Загальнодержавна програма розвитку ГМК України (2023-2027 рр.) окреслює стратегію модернізації сталеплавильних потужностей, в якій основна увага приділяється встановленню агрегатів позапічної обробки сталі, переважно піч-ківш, та машин безперервного лиття заготовок. Очікується, що реалізація цієї програми призведе до покращення структури виробництва сталі: частка конвертерної сталі зросте до 72%, електросталі - до 16%, тоді як мартенівської сталі зменшиться до 12%, а обсяг металу, що розливається на МБЛЗ, збільшиться до 80% [17].

У контексті комплексної програми модернізації сталеплавильного виробництва необхідно визнати, що рішення, які приймаються, можуть бути зумовлені переважно викликами сьогодення, без достатнього врахування довгострокових наслідків. Важливо визнати, що за останнє десятиліття світова металургійна промисловість зазнала значного прогресу в технологіях і дизайні основного обладнання. Одночасно зростали вимоги споживачів до хімічного складу, неметалевих включень і властивостей сталевих продукції. Цей процес триває. Отже, визначення технологічних і конструктивних параметрів для діючих і перспективних агрегатів має відбуватися з урахуванням сучасних металургійних тенденцій. Особливу увагу слід приділити переліченим нижче тенденціям сучасної металургії [18].

Модернізація конвертерного виробництва забезпечує досягнення традиційних цілей, серед яких підвищення якості продукції, зниження виробничих витрат, збільшення продуктивності та покращення захисту навколишнього середовища [19, 20]. Невід'ємними елементами сучасної технології є поєднання верхньої продувки киснем з нижньою

продувкою інертним газом (~80% з 660 конвертерів у світі) для поліпшення процесу і результатів продувки, а також обробка розплаву перед розливанням; шлакоудалення, найчастіше газодинамічне, для зменшення потрапляння шлаку з конвертера в ківш під час розливання; автоматизація процесу з використанням допоміжної фурми-зонд і аналізу газів, що відходять, для точного визначення моменту відведення конвертера і випуску розплаву без підживлення, а в деяких випадках і без очікування аналізу («прямий випуск»); система запобігання викидам для збільшення виходу придатного матеріалу, поліпшення управління процесом і забезпечення безпеки персоналу.

За останнє десятиліття світ і Україна стали свідками значного прогресу в підвищенні довговічності футерівки конвертерів, головним чином завдяки використанню периклазовуглецевих вогнетривів, нанесенню на футерівку кінцевого шлаку і різних видів торкретування, що дозволило досягти безпрецедентних результатів - 17 000 плавок (США), 12 000 (Китай), 5 000 (Росія) і 3 500 (Україна). Серед останніх інновацій - встановлення алюмінієвих прокладок товщиною 1,5 мм між рядами цегли в конічній і цапфовій зонах конвертера, а також охолодження корпусу конвертера за допомогою форсунок повітряно-водяного туману для автоматичного регулювання температури в будь-якій зоні в межах 250-3500°C [1].

Для вимірювання профілю і стінок локального зносу вогнетривів застосовані лазерні системи, які відіграють важливу роль у підвищенні стійкості футеровки. Ці системи забезпечують автоматичне сканування та отримання даних про їх стан для оперативного втручання шляхом розпилення шлаку або торкретування [21].

Висока стійкість вогнетривкої футерівки припускає, для виключення зупинок, виведення на відповідний рівень усіх допоміжних систем і устаткування конвертера: механічного приводу, системи фурм, уловлювання й очищення конвертерного газу, устаткування для

транспортування сталі і шлаку. Зокрема, у США виявлений інтерес до впровадження систем з відведенням конвертерного газу без допалювання і водяним охолодженням каміна під підвищеним тиском, уже багато років застосовуваним у Японії і Європі; додано лише захисне покриття робочої поверхні труб каміна і модернізовано конструкцію останнього.

Системи автоматичного керування конвертерним процесом на різних заводах помітно відрізняються: від цілком автоматизованих до керування окремими операціями (шихтуванням, витратами кисню, введенням флюсів і т.д.). Найбільш прогресивні реалізують “прямий випуск” сталі в момент одержання заданого хімічного складу і температури. Система з зануренням сенсорного датчика в конвертерну ванну включає статичну модель розрахунку шихти, динамічну модель контролю хімічного складу і температури металеві ванни в процесі продувки по аналізу газів, що відходять, і прямими вимірами за допомогою сенсорних датчиків, а також модель “прямого випуску” з визначенням моменту закінчення продувки. Модель розраховує вміст вуглецю, марганцю і фосфору, порівнює з результатами прямого виміру датчиками і виконує коригування. Спеціальна модель визначає вміст азоту, сірки і кольорових металів (Cr, Ni, Mo, Cu). За результатами визначень виконується “прямий випуск” [15, 17-19].

На багатьох заводах світу до загальної системи автоматизації процесу включена автономна система регулювання шлакоутворення і запобігання викидів. Система включає: віброметр на кисневій фурмі, який реєструє вібрацію фурми, що відображає зміну рівня кінетичної енергії газу в процесі спінювання шлаку; модель металургійних реакцій, що служить для визначення фізичних властивостей шлаку й оцінки його схильності до спінювання на основі інформації про процес продувки. На основі обробки інформації по цих трьох компонентах комплексно оцінюють імовірність викидів. Якщо вона перевищує деяке граничне

значення, система автоматично вибирає параметр керування і реалізує його (висота підйому фурми, витрати кисню на верхню продувку, витрати газу на донну продувку, маса матеріалів, що завантажуються) [18].

Використовуючи рентгенівський флуоресцентний аналізатор, розділяють пил і шлак з різними вмістами цинку. Вміст цинку в пилу різко знижується після закінчення 40% тривалості продувки. 30-40% маси всього пилу, тобто пил першої половини, рециркулюють для добування цинку. Решту 60-70% пилу обробляють для одержання брикетів, які завантажують назад у конвертер чи використовують при агломерації залізної руди.

За останні 15 років створено значну кількість пристроїв для безшлакового випуску сталі у ківш із застосуванням механічного закриття льотки, у тому числі з електромагнітним виявленням моменту появи в ній шлаку, після чого льотка відразу закривається шлаковим стопором. Але найбільш ефективним виявилось застосування в Японії, Китаї і Європі газодинамічного відсічення шлаку (досягають попадання його в кількості менше 1 кг/т сталі) [23].

Переробка шлаку в конвертерних цехах до цього часу залишається технологічно примітивною й екологічно недосконалою. Деяку його кількість використовують як добавку до добрив. Модифікування шлаку (при прискореному охолодженні) дозволяє використовувати його в якості замітника портландцементу. Вивчається можливість застосування сухої грануляції шлаку для одержання продукту з підвищеною споживчою вартістю, при цьому гранично зменшуються забруднюючі викиди. В стадії опрацювання знаходиться варіант прийому шлаку для грануляції не зі шлакової чаші чи шлаковоза, а безпосередньо з конвертера, що має ряд переваг.

Продовжуються дослідження варіантів по переробці підвищених витрат металобрухту в конвертерах. Їх принцип мало відрізняється від

розроблених свого часу вітчизняних технологій, сама ж заміна чавуну бруктом, як відзначалося, різко знижує енергоємність сталі [11].

Підвищення останнім часом вимог до якості продукції на ринку металу привело до розробки способів і технологічних варіантів одержання сталей з ультра низьким вмістом домішок елементів (наприклад, IF-сталей), що забезпечують унікальні властивості металовиробів.

Високої чистоти сталі по домішках можна досягти лише при використанні високоякісної шихти. Незважаючи на появу нових альтернативних матеріалів, найважливішим залишається чавун. В даний час конвертерний процес розглядається як комплексний, що включає підготовку чавуну, власне процес плавки і позапічне рафінування сталі, включаючи обробку її у проміжному ковші [11].

Найбільший розвиток одержала позадоменна десульфуратія чавуну. Незважаючи на різноманітність рішень, основними ознаками технологій є: процес, оснований на вдуванні за допомогою фурми, в якості газу-носія в більшості випадків використовують азот, десульфуратора – суміші на основі карбїду кальцію та вапна (вапняку) або суміші на основі магнію та вапна чи карбїду кальцію. Передбачається вдування у ковші торпедного типу (нині використовуються мало через проблеми скупчення в них шлаку) або в заливні ковші. Для підвищення ефективності застосовують спільну інжекцію (ко-інжекцію) – подачу двох (чи навіть трьох) компонентів до фурми, що занурюється за допомогою роздільних вузлів вдування [1-3].

Усе ширше використовують позадоменну десиліконізацію і дефосфорацію чавуну, вони стають основою комплексної його обробки. При цьому на першому етапі десиліконізують чавун під час випуску на жолобі доменної печі, потім дефосфорують і десульфурують на установках, розташованих по маршруту передачі чавуну із доменного цеху в конвертерний, і зневуглицьовують у конвертері. Для

десиліконізації використовують або окалину з вапном, або суміш шлаків агломераційного виробництва з вапном, що знижує вміст кремнію до 0,15-0,20%. Дефосфорують чавун звичайно у торпеді окремо, або разом з десульфурою. У першому випадку чавун обробляють вапно залізистими шлаковими сумішами (наприклад, 40% CaO; 40%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 12% MgO; 8%MnO) з витратами ~ 20 кг/т, у другому – вдуванням рафінуючи суміш (матеріалів, що містять вапно) через похилу фурму. Вміст фосфору знижують до 0,010% [1, 24-26].

Зниження вмісту кремнію в чавуні забезпечує не тільки можливість наступної дефосфорації й ефективною малошлаковою технологією в конвертері, але й дозволяє одержати суттєву економію і при виплавці чавуну. У цілому воно стає одним з головних напрямків удосконалення технологій у комплексах доменна піч – кисневий конвертер. Поряд із позадоменною десиліконізацією, на багатьох заводах Європи і Японії за рахунок удосконалення безпосередньо доменної плавки також забезпечують низький вміст кремнію в чавуні, що додається в конвертерний цех – до 0,30-0,35%. Впровадження малошлакової технології (2-4% шлаку в конвертері від маси сталі замість звичайних 12-15%) підвищує вихід придатного на 1-2%, стійкість футерівки і припускає можливість прямого легування металу в конвертері добавками марганцевої руди [24].

Проблема виробництва сталі з низьким вмістом азоту зводиться до запобігання його попадання в метал на кінцевій стадії продувки в конвертері (шляхом спінювання шлаку, наприклад, добавками сирого доломіту) і на наступних етапах. Комбінована продувка в конвертері наближає реакцію окислення вуглецю до рівноваги і знімає переокислення металу і шлаку. Подальше зниження вмісту кисню і видалення зі сталі водню забезпечують обробкою її після випуску в різного типу вакууматорах. У світі в середньому вакуумують 8%

виробленої сталі, в Японії – 40%. Передбачається, що до 2010 р. у світі будуть вакуумувати 27% сталі, що виплавляється.

Агрегати типу ківш-піч з вакуумуванням найбільш багатoproфільні. В них можна проводити практично всю обробку сталі, особливо коли передбачена можливість скачування шлаку з ковша. Вони придатні для виробництва усіх сталей, що на сьогодні випускаються, і легко розміщуються в діючих конвертерних цехах. Удосконалення агрегатів спрямоване, головним чином, на створення умов, що сприяють прискоренню і поглибленню перебігу процесів рафінування. Це, в першу чергу, заходи, що сприяють інтенсифікації перемішування металу в ковші. Вони необхідні для всіх видів позапічної обробки. У ковші-печі й агрегатах циркуляційного вакуумування вони здійснюються за рахунок удосконалення устаткування для введення інертного газу, оптимізації розташування продувних пристроїв, періоду й інтенсивності (режиму) введення газу; для агрегатів порційного і циркуляційного вакуумування – удосконаленням конструкції камери і партубків, в агрегатах типу ківш-піч застосовують електромагнітне перемішування, часто у поєднанні з продувкою аргоном.

Слід враховувати, що на багатьох закордонних заводах, враховуючи постійне ускладнення сортаменту сталей і необхідність досягнення надзвичайно високого рівня комплексу вимог до їх якості і властивостей, вважають за необхідне мати в конвертерних цехах набір різних засобів і методів позапічного рафінування для забезпечення рішення практично будь-якої задачі.

Новим є зневуглицьовування сталі ультранизьких концентрацій, видалення водню і, в низці випадків, азоту в циркуляційних вакууматорах з подачею кисню через водоохолоджувану фурму у вакуумну камеру при так званому “КТВ-процесі” (Kawasaki Top Blowing). Якщо брати до уваги вже досліджені можливості подальшого підвищення ефективності позапічної обробки, з використанням способу

“КТВ”, у тому числі вдуванням флюсів через фурму, то можна вважати, що спосіб “КТВ” стане основою для зосередження усіх функцій позапічного рафінування сталей. Останнім часом число таких комплексних агрегатів зростає швидкими темпами. Нам необхідно також враховувати, що в розвинутих країнах, із застосуванням різних методів позапічного рафінування, випускається 80% сталей (для виробів відповідального призначення). Найбільш оптимальною технологією ведення процесу на даний час у світі є наступна: конвертер → піч-ківш → МБЛЗ

### 1.3 Аналіз впливу шихтових матеріалів на показники конвертерної плавки

Технологічні показники конвертерної плавки в значній мірі залежать від хімічного складу і температури чавуну, що визначаються, крім перебігу доменного процесу, умовами транспортування чавуну і його позадоменної обробки. Для киснево-конвертерного процесу застосовують чавун такого складу, %: 3,9-4,5 C; 0,5-1,0 Si; 0-1,5 Mn; 0,03-0,06 S; 0,05-0,15 P;  $(15-140) \cdot 10^{-4} \text{ N}_2$ ;  $(0,5-3) \cdot 10^{-4} \text{ H}_2$ ;  $(4-100) \cdot 10^{-4} \text{ O}_2$ .

Концентрація вуглецю у чавуні в умовах доменної плавки практично не піддається регулюванню. За інших умов концентрація [C] у чавуні, що подається в конвертер, відповідає стану насичення й зростає з підвищенням його температури. Остання збільшує надходження тепла на конвертерну плавку по двох напрямках, за рахунок наступного окислювання вуглецю, зростання його фізичного і хімічного тепла.

### 1.3.1 Вплив вмісту кремнію в чавуні на хід киснево-конвертерної плавки

Вміст кремнію в чавуні впливає на масу шлаку  $M_{\text{ш}}$  і діоксиду кремнію в шлаках  $M_{\text{SiO}_2}$ . Якщо в якості охолоджувача застосовується залізна руда, то з підвищенням  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$  значення  $M_{\text{SiO}_2}$  і  $M_{\text{ш}}$  додатково збільшується за рахунок  $\text{SiO}_2$ , що вводиться з рудою. Це обумовлює зростання витрат вапна підвищення для забезпечення заданої основності шлакам  $B = (\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ , втрат заліза зі шлаком і викидами, зниження стійкості футерівки і виходу рідкої сталі. При незмінних витратах вапна підвищення  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$  приводить до зниження  $B$ , що погіршує дефосфорацію і десульфурацію металу.

Якщо  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$  нижче оптимальної величини, то шлакоутворення на початку продувки сповільнюється, тому що швидкість розчинення вапна при низькій температурі шлакам і незначній  $M_{\text{SiO}_2}$  мала. У випадку тонкого шару шлаку збільшується час продувки оголеного металу, подовжується „безшлаковий період”, що сприяє заметалюванню і прогару фурм, збільшенню пиловидалення і виносу крапель металу. При невеликій  $M_{\text{ш}}$  шкідливі домішки з металу усуваються гірше. За умовами доменного процесу, зниження  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$  посередньо приводить до зростання  $[\text{S}]_{\text{чав}}$ , що обумовлено відносно холодним перебігом доменної плавки. Існує оптимальне  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$ , що складає при охолодженні ванни рудою 0,3-0,5%, а при охолодженні брухтом- 0,5-0,6%. В останньому випадку визначне підвищення  $[\text{Si}]_{\text{чав}}$  корисне, оскільки забезпечує збільшення частки металобрухту в металевій шихті.

### 1.3.2 Вплив вмісту марганцю в чавуні на хід киснево-конвертерної плавки

При високому вмісті марганцю в чавуні істотно поліпшуються шлакоутворення і десульфуратія металу, але посилюється його вигар. Якщо  $[Mn]_{\text{чав}}$  дуже низький, спостерігається заметалювання фурм, оскільки шлак на початку продувки густий. Виплавка маломарганцевистих чавунів досить економічна. Сукупна максимальна ефективність у процесах виплавки чавуну і конвертерної сталі досягається при  $[Mn]_{\text{чав}} = 0,5-0,6\%$ .

Ступінь десульфуратії металу в кисневому конверторі близько 30%. Тому припустимо вміст сірки в чавуні  $[S]_{\text{чав}} = 0,04-0,05\%$ .

У початковому періоді продувки марганець швидко окислюється, що обумовлено низькою температурою, високою константою рівноваги  $K_{Mn}$  реакції  $[Mn] + (FeO) = (MnO) + [FeO]$ , великою активністю оксидів заліза та малою активністю оксидів марганцю. З підйомом температури, підвищенням  $(MnO)$  і зниженням  $(FeO)$  швидкість окислювання марганцю падає через уповільнення масопереносу у граничних шарах металу і шлаку. При цьому система метал-шлак наближається до рівноваги (однак остання цілком не досягається), а вміст марганцю в металі до величини:

$$[Mn]_{\text{рівн.ш}} = \frac{(MnO)\gamma_{MnO}}{(FeO)\gamma_{(FeO)} \cdot K_{Mn}}$$

У середині продувки  $[Mn]$  стабілізується, а потім відновлюється до визначеної величі, що одержала назву „марганцевий горб”. Відновлення марганцю зі шлаку пояснюється розбавленням оксиду марганцю оксидами кальцію і заліза.

Однак зменшення  $K_{Mn}$  у зв'язку з ростом температури і збільшення коефіцієнта активності  $\gamma_{MnO}$  через підвищення основності шлаку превалює над зниження ( $MnO$ ), що приводить до збільшення  $[Mn]$ . Слід також враховувати знижену концентрацію ( $FeO$ ) у шарі шлаку, що прилягає до металу, в період інтенсивного окислювання вуглецю і розкислювальну дію вуглецю.

При низькому  $[C]$  у готовій сталі заключна частина киснево-конвертерного процесу супроводжується окислюванням марганцю, що пояснюється значним збільшенням оксидів заліза в шлаку наприкінці плавки.

### 1.3.3 Вплив вмісту фосфору в чавуні та сірки на хід киснево-конвертерної плавки та методи їх видалення

Доведено, що вміст фосфору в чавуні понад 0,2% має значний вплив на процес виплавки. Для того, щоб виробляти сталь високої якості з вмістом  $[P]$  менше 0,02%, необхідно видаляти шлак в середині процесу продувки і наводити новий шлак. Однак цей процес має недоліки, що полягають у зниженні продуктивності, виходу рідкої сталі і стійкості футеровки конвертера. У деяких випадках виплавка чавуну з вищим вмістом  $[P]$  може бути виправдана необхідністю розширення сировинної бази доменних печей.

У випадках, коли вміст  $[P]$  менше 0,15%, можлива робота без первинного випуску шлаку. Це пов'язано з тим, що навіть при відносно скромному коефіцієнті розподілу  $L_P = \frac{(P_2O_5)}{[P]} = 100$  і вмісті шлаку 10% від маси металу, залишкова концентрація  $[P]$  залишається нижче 0,02%.

Десульфуріацію чавуну раніше застосовували для зниження вмісту сірки в чавуні до необхідного рівня при розладі ходу доменної печі. В останні 10-15 років у зв'язку з підвищенням вимог до якості сталі й поліпшенням технології доменної плавки основною задачею

десульфурзації чавуну стало забезпечення можливості виробництва низькосірчистих сталей. Якщо для вирішення першої задачі доцільно було проводити десульфуррацію в чавуновізних ковшах, то для вирішення другої – раціональніше використовувати заливальні ковші конвертерного чи цеху ковші міксерного типу. У цьому випадку легко забезпечити належне завдання вмісту сірки в чавуні на визначену плавку.

Як реагенти для десульфуррації чавуну використовують магній (гранульований, чушковий і пасивований, змішаний з доломітом чи коксом), карбід кальцію, вапно, соду, їх суміші. Порівняння ефективності різних реагентів показує, що найбільш поширеним є гранульований магній. При його використанні можна досягти концентрацій сірки до 0,002% при мінімальних витратах на десульфуррацію реагенту, без зниження температури чавуну. Крім того, застосовувати магній краще з погляду екології й техніки безпеки, при цьому не відбувається істотного зносу футерівки чавуновозних ковшів, що спостерігається при використанні соди.

За кордоном активно ведуться роботи з комплексної обробки чавуну з одночасним видаленням кремнію, фосфору й сірки.

Дефосфорацію і десульфуррацію чавуну проводять після видалення шлаку (від десиліконізації) у чавуновозних, заливальних чи ковшах міксерного типу або вдуванням флюсів одночасно із вдуванням кисню зверху і (чи) вдуванням азоту знизу та механічним перемішуванням чавуну. Як флюси використовують Ca, Fe, Ca<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Витрати флюсів складають 30-50 кг/т чавуну. Вміст фосфору в процесі обробки зменшується з 0,10-0,15% до 0,01-0,02, сірки – з 0,01-0,06 до 0,002-0,02%, кремнію – до 0,01-0,05%, марганцю – на 0,08-0,1%, вуглецю – на 0,2-0,4%, температура чавуну знижується на 40-120°C.

При обробці такого чавуну в конвертерах істотно поліпшуються показники конвертерної плавки: скорочується витрати вапна, кисню,

металошихти, підвищується продуктивність, поліпшується якість сталі (більш низький вміст фосфору, азоту, водню), однак витрати рідкого чавуну при цьому збільшуються на 100-150 кг/т сталі.

Технологія повинна забезпечувати мінімальне вилучення доменного шлаку з чавуновозного ковша, обов'язкове скачування шлаку після позадоменної обробки чавуну.

Надходження доменного шлаку у конвертер змушує витратити додаткову кількість вапна, приводить до збільшення витрат чавуну і металошихти в цілому, підвищення маси кінцевого конвертерного шлаку і зростання вмісту сірки в сталі, а надходження шлакам після позадоменної обробки чавуну позбавляє її сенсу.

Найбільш раціональний спосіб скачування шлаку – двостадійний: з чавуновозних ковшів відразу ж після позадоменної обробки чавуну й з заливальних ковшів перед зливанням чавуну в конвертер.

У доменних і міксерних шлаках при постачанні чавуну без обробки міститься 44-50%  $\text{SiO}_2$ , 5-7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 19-23%  $\text{CaO}$ , 2-8%  $\text{MgO}$ , 0,03-0,45%  $\text{S}$ .

Конвертерні цехи забезпечується рідким чавуном за двома схемами:

- 1) доменний цех - міксерне відділення - конвертер;
- 2) доменний цех - ділянка переливання чавуну в заливальний ківш - конвертер.

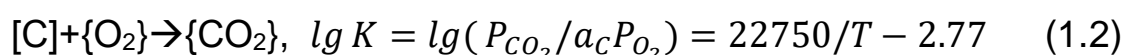
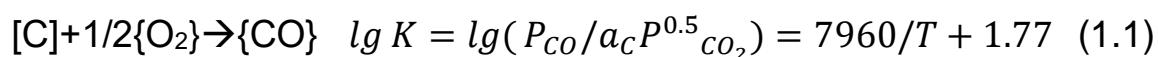
За першою схемою чавун подають у міксерне відділення у відкритих чавуновозних ковшах ємністю, що не перевищує 140 т. З них чавун зливають у міксери 600, 1300 і 2500 т, які служать для усереднення чавуну по домішках і температурі перед зливанням у конвертер. Міксери опалюється, але тільки для компенсації в них теплових втрат. За другою схемою чавун із доменного цеху в конвертерний надходить в закритих ковшах міксерного типу ємністю від 150 до 600 т. Зниження температури чавуну при його транспортуванні в значній мірі визначається ємністю ковшів і ступенем їх заповнення. При

замінні 140-тонних чавуновозних ковшів 400-тонними ковшами міксерного типу температура чавуну в заливальному ковші конвертерного цеху зростає на 70-100°C, тому другий спосіб подачі чавуну кращий. Тім більше, що сучасні міксери часто не виконують основного свого завдання – усереднення складу чавуну, і коливання вмісту кремнію, марганцю й сірки в чавуні після міксера такі ж, як й у чавуні, що заливається в міксер. Слід зазначити, що успішна робота конвертерного цеху вимагає забезпечення рівного ходу доменних печей і мінімальних коливань складу й температури чавуну.

#### 1.3.4 Вплив вмісту вуглецю в чавуні на вихід придатного металу та час продувки

Реакція окислювання вуглецю є провідною в конвертерних процесах, оскільки вуглець [C] є найбільш масовою домішкою в чавуні й узагалі в складі всієї металошихти. На його концентрацію в металі, орієнтуються при зупинці продувки. Продукти окислення газоподібні, займають великий обсяг і тому викликають ряд гідродинамічних ефектів – як позитивних, так і негативних.

Окислювання вуглецю за рахунок кисню газової фази описується реакціями:



де  $P_{CO}$ ,  $P_{CO_2}$  – парціальний тиск;

$a_C$  – активність вуглецю.

Оскільки реакція (1.1) дає газоподібний продукт – монооксид вуглецю, що переноситися від межі розподілу метал-газ, то спостерігається зустрічний масопереніс CO від поверхні металу і O<sub>2</sub> до поверхні металу, які можуть вступати в реакцію



У цьому випадку діоксид вуглецю, що утворюється від фронту реакції горіння, буде переноситись до поверхні, де вступить з вуглецем металу в реакцію:



Константи швидкості відповідних реакцій певним чином співвідносяться з коефіцієнтами масопереносу діоксиду  $\beta_{O_2}$ , внаслідок чого окислення вуглецю здійснюється за одне- чи двостадійною схемою.

Відповідно до критерію Померанцева:

$$(P_O) = \frac{\beta_{CO_2}}{(k_1 D_{CO_2})^{0.5}} + \frac{\beta_{O_2}}{2k_2} \quad (1.5)$$

де  $D_{CO_2}$  – коефіцієнт молекулярної дифузії O<sub>2</sub>, збільшує швидкості хімічних реакцій і робить більш імовірною двостадійну схему, якій відповідає  $P_O \geq 0,5$ . Експериментальні дані дозволяють припустити, що критичне значення критерію Померанцева складає  $(P_O) = 0,5 - 1$ .

При одностадійній схемі швидкість окислення вуглецю визначається парціальним тиском кисню в окислювальному дутті, має високу швидкість, а процес лімітується переносом кисню до поверхні.

При двостадійній схемі процес окислення вуглецю лімітується реакцією (1.4), а його питома інтенсивність, моль/см<sup>2</sup>·с

$$i_c = 6.94 \cdot 10^6 \bar{p}_{CO_2} x_c^S \exp(-22236/T)/RT \quad (1.6)$$

У шкірному конкретному випадку необхідно, з використанням зведень про гідродинамічну обстановку на межі розподілу «окислювальний газовий потік – поверхня металу» розрахувати коефіцієнти масопереносу  $\beta_{O_2}$  і  $\beta_{CO_2}$ , а знаючи температуру на межі розподілу фаз і фронті горіння, - константи швидкостей реакцій 1.3 та 1.4. Якщо розрахована з їх використанням величин критерію Померанцева буде нижча, ніж критична, окислення вуглецю відбуватиметься у дві стадії, а якщо більше – в одну.

Аналіз процесу окислення вуглецю в конвертерах показує, що з ростом масштабу процесу окислення вуглецю за одностадійною схемою стає більш імовірним.

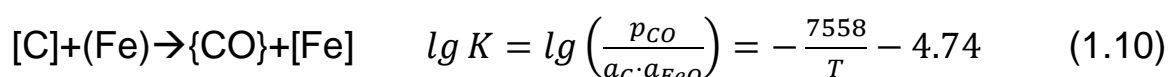
Аналогічно можна розглядати й окислення вуглецю парами оксидів заліза. При одностадійній схемі відбувається реакція:



а при двостадійній:



Окислення вуглецю оксидами заліза відбувається у вторинній зоні взаємодії та в шлако-металевій емульсії по реакції:



Реакція (1.7) є формальною, тому що фактично при утворенні газової фази між металом і шлаками виникає газовий прошарок 2 й їх безпосередній контакт припиняється.

До початку активного окислення вуглець може видалятися із ванни в результаті згоряння крапель металу в первинній зоні взаємодії, згоряючи разом з іншими елементами. Оскільки при цьому головні витрати кисню пов'язані з горінням заліза, то на 1 кг металу витрачається приблизно 5 м<sup>3</sup> кисню і при цьому згоряє 0,01 кг вуглецю. Коли ж у середині продувки буде окислюватись переважливо вуглець, а швидкість його окислення складі  $V_{C_{max}}$ , то на 1 кг вуглецю витратиметься (11,2/12 м<sup>3</sup>) кисню. Тому відношення швидкості окислення вуглецю в результаті згоряння металу на початку продувки  $V_{C_{поч}}$  буде відноситись до максимального, як:

$$\frac{V_{C_{поч}}}{V_{C_{max}}} = 0.047[C] \quad (1.11)$$

Чим вище температура ванни і вміст кремнію в чавуні, тим швидше закінчиться перший період і почнеться період другий. При температурі чавуну 1350-1400°C період другий настає з самого початку продувки, а швидкість окислення вуглецю відразу стає вище розрахованої за (1.11).

Період третій настає, як правило після практично повного окислення кремнію і стабілізації концентрації марганцю в металі. При холодному процесі 3-ій період збільшується, разом с першими двома.

Коли вміст вуглецю в конвертерній ванні зменшується, настає момент, коли перемішування в ванні доставляє в зону взаємодії масу вуглецю за одиницю часу, яка є меншою за масу вуглецю, яка може бути

окислена масою кисню, що вдувається, протягом тієї ж одиниці часу. Отже, починається четвертий період, який характеризується зниженням швидкості згоряння вуглецю. Примітно, що інтенсивність змішування має пряму кореляцію з точкою, в якій відбувається цей перехід, причому більша інтенсивність перемішування призводить до нижчої концентрації вуглецю на цьому етапі. У цей період у шлак надходить надлишок кисню у вигляді оксидів заліза. Це призводить до втрати придатного для використання рідкого металу та збільшення швидкості зносу футерівки конвертера.

#### Висновки по розділу

Огляд літературних джерел свідчить про значний вплив параметрів продувки на режим ведення плавки, динаміку окислення домішок та кінцеві результати плавки. Ці свідчать про актуальність подальшого впливу режиму продувки на матеріальний баланс конвертерної плавки.

## 3 ОХОРОНА ПРАЦІ

В Законі України «Про охорону праці» визначено, що умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, роботи машин, механізмів, обладнання та устаткування, наявність та стан засобів колективного та індивідуального захисту, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних актів з охорони праці.

Темпи росту виробництва сталі та її якість в конверторах швидко зростають, а умови праці робітників конверторних цехів важкі та шкідливі. Тому в даному розділі розглянуто основні шкідливі фактори і небезпечності при виконанні робіт, заходи техніки безпеки, пожежної профілактики, екологічної безпеки для конверторного цеху.

### 3.1 Загальна характеристика умов праці

Основними напрямками, що визначають і характеризують санітарно-гігієнічне та естетичне середовище конверторних цехів є: температурно-вологісний режим, запиленість та загазованість робочої зони, освітлення робочих місць, рівні шуму та вібрації, санітарно-побутового, культурного обслуговування, ергономічної та наукової організації робочого місця, розміри площі та об'єму виробничих приміщень на одного працюючого, режими праці та відпочинку, естетичне оформлення цеху та прилеглої території.

Усереднені показники результатів дослідження умов праці на дільницях конверторних цехів наведені в таблиці 3.1.

Як видно з таблиці, фактичні показники різноманітних шкідливих факторів перевищують нормативні, тому умови праці у конвертерних цехах є важкими та шкідливими.

Таблиця 3.1 – Карта умов праці робітників конверторного цеху на різних дільницях

Дільниці (служби)	Запиленість, мг/м <sup>3</sup>		Загазованість, (СО), мг/м <sup>3</sup>		Шум, дБА		Теплові випромінювання, $\cdot 10^2$ , Вт/м <sup>2</sup>		Температура повітря, К	
	факт.	ГДК	факт.	ГДК	факт.	ГДР	факт.	ГДР	факт.	норм.
Міксерне відділення	20	4	3,1	20	84	70	27	1,4	309	301
Шихтовий двір	32	4	9,7	20	77	70	1,6	1,4	311	301
Конверторне відділення	24	4	28	20	79	70	12,1	1,4	336	301
Газоочистка	4,2	4	2,9	20	81	70	1,45	1,4	307	301
Дільниця прийомки продукції	2,8	4	2,4	20	72	70	1,38	1,4	302	301
Дільниця ремонту ковшів	2,9	4	1,4	20	71	70	1,24	1,4	305	301
Підготовче відділення	11,2	4	2,6	20	73	70	0,84	1,4	301	301

Шкідливим фактором у цеху є виділення теплоти, джерелом якої є рідка сталь та устаткування. Відповідно до нормативу ГОСТ 12.1.005-88 [Error! Reference source not found.] теплове опромінення робітників не повинне перевищувати 140 Вт/м<sup>2</sup>. Інтенсивність теплоопромінення на ділянках конверторного цеху може знаходитись в значних межах – від 300 до 9000 Вт/м<sup>2</sup>. Фактичне тепловиділення досягає інколи 800 і більш кДж/годину на 1 м<sup>3</sup> приміщення, що створює важкі умови для теплообміну людини з довкіллям. Віддача тепла, що безперервно здійснюється організмом, відбувається за нормальних метеорологічних умов в основному через шкіру трьома шляхами: конвекцією (близько 30%), випромінюванням (близько 45%) і випаровуванням (близько 25%). В результаті перевищення теплоприходу над тепловіддачею у робітників може статися порушення теплового балансу. При цьому підвищується температура тіла до 40°C; при сильному перегріванні може статися

тепловий удар. Внаслідок великих втрат води організмом порушується водно-сольовий обмін. Надлишок тепла викликає у працівники підвищене потовиділення, що призводить до збіднення тканин і крові рідиною і солями, а також до порушень серцево-судинної та нервової діяльності.

Продуктивність праці робітників знаходиться у прямій залежності від оточуючих умов і може знижуватися через погану освітленість (на 20%), перевищення допустимого рівня шуму (на 15-20%) та інше.

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Робота в цеху відноситься до IV-б категорії зорового навантаження згідно з ДБН В.2.5-28-2018 [34]. Нормативна освітленість становить 200 лк, фактична часто не відповідає нормативній.

При виконанні технологічних операцій виникає шум механічного, аеродинамічного і термічного походження, що вимагає забезпечення захисту персоналу. Згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [35] гранично допустимий рівень шуму у виробничих приміщеннях на постійних робочих місцях повинен не перевищувати 80 дБ, для операторів постів управління 65 дБ. При чому на робочому місці розливальника рівень шуму досягає 90-92 дБ, що не відповідає нормативним вимогам. Для захисту органів слуху працівники повинні використовувати ЗІЗ, наприклад, навушники типу «біруші».

У цеху існує небезпека ураження електричним струмом. Ділянка за ПУЕ [36] відноситься до особливо небезпечних, так як присутні струмопровідні підлоги, пил оксидів заліза, висока температура. Причинами поразок електричним струмом можуть бути дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена, зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і проводами, торкання струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції та інше.

Також на ділянці присутня небезпека травмування робітників при експлуатації рухомих механізмів.

Таким чином, джерелами небезпеки у конвертерному цеху є розплавлені метали і шлак; високотемпературні і горючі гази, що викликають опіки; значні вантажопотоки, які призводять до травм і ударів; наявність вибухонебезпечних засобів; перевищення ГДК на робочих місцях шкідливих для здоров'я викидів, що викликають як гострі, так і хронічні захворювання; інше.

Внаслідок невідповідних нормам умов праці у робітників конверторного цеху спостерігаються випадки виробничого травматизму, професійні захворювання, порушення стану здоров'я, трапляються випадки часткової або повної втрати працездатності. Невросклероз, кардіосклероз, ішемічна хвороба серця фіксуються у робітників цеху. Аналіз умов праці і захворюваності робітників конверторних цехів показав наступне:

- 45-48% робітників систематично страждають від перегрівів, хворіють гострими респіраторними та іншими застудними захворюваннями, бронхітами, кишково-шлунковими захворюваннями та іншими, що є наслідком впливу високих температур та інфрачервоного випромінювання;

- 12,3% робітників постійно хворіють захворюваннями крові, які викликані шкідливим впливом пилу;

- 9% робітників знаходяться на лікарняних через захворювання бронхітами, трахеїтами, різними хворобами очей, що є наслідком низької відносної вологості і підвищеної запиленості повітря робочої зони.

### 3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

У кожному конвертерному цеху існують правила техніки безпеки, які обов'язкові для всіх працюючих. Щойно прийняті на роботу проходять інструктаж з безпечного виконання роботи, контролюються по їх дотриманню безпосередньо начальником. Знання правил техніки

безпеки регулярно перевіряються, про це робиться відповідний запис. Порушення правил техніки безпеки фіксується, а порушник проходить повторний інструктаж, може понести адміністративне стягнення, пониження у посаді, звільнення з роботи [37].

Щодо виробничого травматизму, то перше місце серед постраждалих працівників займають конверторники. Окрім того, вони більше хворіють неврозами і кількість захворювань органів дихання зазвичай вища, ніж середня по підприємству. Це є наслідком порушення водно-солевого балансу в організмі працівників, незадовільної промислової санітарії та гігієни праці, низької якості питної води, відсутності збалансованого та раціонального харчування і питного режиму. Всі ці перераховані виробничі чинники призводять до зменшення працездатності, викликають втому, знижують увагу працівників. Тому кількість нещасних випадків та аварій постійно зростає. А наслідком є травмування робітників, руйнування обладнання.

Проведені дослідження показали, що при розробці захисних та профілактичних заходів і засобів у конверторних цехах цю проблему необхідно вирішувати в комплексі, тобто захищати працівників від впливу всіх виявлених шкідливих та небезпечних виробничих чинників.

Наведемо деякі заходи з техніки безпеки у конвертерному цеху.

Згідно правил техніки безпеки робітникам забороняється знаходитися біля конвертера під час його продувки. Також забороняється проводити продувку, якщо з фурми чи газоходу протікає вода і під конвертером є волога. При обриві охолоджувача з горловини конвертера слід бути від нього на відстані не менше 10 метрів. Прибирати під конвертером можна лише після його зупинки. Шлакова чаша може наповнюватись до рівня, на 150 – 200 мм нижче верхнього її краю. Осаджувати шлак у шлаковій чаші чи в ковші можна тільки сухими матеріалами. При протіканні рідкого металу і шлаку через футеровку конвертор зупиняється, а течія усувається. При ремонті

конвертера не можна заливати залишки футеровки водою. Під час видалення залишків футеровки не можна знаходитись біля машини та під конвертером. Повертати конвертер можна тільки за командою керуючого ремонтом. Під час розігріву футеровка повинна бути ретельно просушена.

Для запобігання електротравматизму необхідно застосовувати такі заходи і засоби захисту:

1. Внутрішньоцехові електричні ланцюги виконують з ізольованих проводів і кабелів.

2. Струмоведачі частини агрегатів закривають кожухами, використовують захисні огороження.

3. Використовують блокування, що вимикають напругу при відкритих дверях трансформаторного приміщення.

4. Захисні заземлення встановлюються в пультах управління агрегатами.

5. Захисні занулення встановлюються в стінових прорізах, недоступних для персоналу.

Технологічному персоналу забороняється перебувати в електроприміщеннях, відкривати електрошкафи і торкатися оголених проводів. Працівник, який експлуатує побутові прилади, повинен мати 1 групу з електробезпеки. Не слід застосовувати побутові прилади в особливо небезпечних приміщеннях.

Згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [38] по вибуховій, вибухопожежній і пожежній небезпеці до категорії А відноситься конвертер, а також розливний проліт. До категорії Б відноситься система газоочищення конвертерного газу, міксерне відділення і завантажувальний проліт. До категорії Г відноситься відділення підготовки шихти.

Виробничі приміщення конвертерних цехів побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій і залізобетон) і згідно ДБН В.1.1-7:2016 [39] мають 2 ступінь вогнестійкості.

Пожежі в приміщенні можуть виникнути в результаті:

- загоряння електроустаткування при перевантаженнях, перегрівих і коротких замиканнях (клас пожежі - Е);
- тверді речовини які плавляться та горять як рідини (клас пожежі - В).

Класи можливих пожеж:

- пожежі першого класу - пожежі звичайних горючих матеріалів при горінні яких утворюється тліюча зола;
- пожежі третього класу - пожежі горючих газів;
- пожежі четвертого класу - пожежі електричного обладнання;
- пожежі п'ятого класу - пожежі металів.

Джерелом спалаху може бути тепло хімічних реакцій, полум'я печей, відкритий вогонь при проведенні ремонтних робіт, тепло нагрітих мас металу і шлаку, електричні іскри, зіткнення металу з водою, несправність або перегрів електромереж та електрообладнання, прогар футерування сталерозливочного ковшу, протікання металу між плитами шибєрного затвору. Особливо небезпечною зоною є зона транспортування рідкого металу, так як можливі сплески металу, і як наслідок, виникнення пожежі.

Усі виробничі та допоміжні будівлі, споруди і склади сталеплавильних цехів повинні відповідати вимогам НАПБ А.01.001-2014 [40] і бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння. Кількість останніх повинна відповідати нормам первинних засобів пожежогасіння для підприємств і організацій чорної металургії.

### 3.3 Захист навколишнього середовища

У конверторному и завантажувальному прольотах, основне джерело шкідливостей, що викидаються у повітря, є неорганізовані викиди (пил, тепло і гази, що містять окис вуглецю та сірчастий газ). Вони виділяються з горловини конвертора при заливці чавуну,

завантаженні лому і в окремі моменти продування через зазор між горловиною і вхідною частиною тракту, що відводить газ. Пил, тепло, окисли вуглецю і азоту, шкідливі пари - при випуску сталі в ківш. Пил - при ремонтах конвертора. Тепло, окисли вуглецю і азоту - при розігріванні конвертора після ремонту і від печей для прожарювання феросплавів.

У конверторному і завантажувальному прольотах передбачається природна аерація за допомогою аераційних ліхтарів і припливна вентиляція окремих ділянок. При відборі проб і вимірах температури через горловину конвертера застосовують спеціальні візки з теплозахисними екранами і обдув, спеціально встановленими вентиляторами.

Систему подачі і завантаження сипких матеріалів в конвертор зазвичай виконують з герметизацією місць, що піддаються пилу, відсмоктуванням і очищенням газів від пилу. У ковшовому прольоті виділяється пил (при ломці футерування), тепло і оксиди азоту при розігріванні ковшів. У прольоті передбачають природну аерацію і установку витяжних зонтів над стендами для розігрівання ковшів і ломки футерування.

У міксерному і переливному відділеннях при зливі чавуну виділяються тепло і графітовий пил. Над місцями зливу встановлюють зонти систем вловлювання газів і їх очищення від пилу. Гази, що виділяються з міксера, також містять багато графіту, для його вловлювання встановлюють відсмоктувач у щілинні горловини міксера (графіт, що вловлюється, є цінною сировиною).

Проблема вловлювання неорганізованих викидів у конвертерних цехах доки не вирішена; розробляються проекти спеціального кожуха довкола конвертера, який дозволив би вловлювати неорганізовані викиди як при завантаженні конвертера, так і при випуску продуктів плавки [41].

## ВИСНОВКИ

Виконано огляд літературних джерел, який свідчить про значний вплив параметрів продувки на режим ведення плавки, динаміку окислення домішок та кінцеві результати плавки. Це свідчить про актуальність подальшого впливу режиму продувки на матеріальний баланс конвертерної плавки.

Виходячи з отриманих статистичних залежностей, запропоновані наступні рекомендації:

- здійснювати шихтовку плавки з оглядом на те, що витрата кисню на плавку не має перевищувати ..... м<sup>3</sup>, а тривалість продувки має становити ... -... хв.;
- уникати надто високої інтенсивності продувки;
- уникати передування плавки.

Це дозволять скоротити витрату наступних матеріалів:

- металошихта – з ..... до ..... кг/т сталі (на .... кг/т);
- чавун – з ..... до ..... кг/т сталі (на .. кг/т);
- вапно – з .... до .... кг/т сталі (на .. кг/т);
- кисень – з ..... до .....м<sup>3</sup> (на .....м<sup>3</sup>).

Запропоновані в роботі заходи не становлять небезпеки життю та здоров'ю персоналу, а також не несуть шкоди довкіллю.

Запропонована технологія оптимізації параметрів киснево-конвертерного процесу дозволяє досягти суттєвого економічного ефекту за рахунок зниження витрат основних матеріалів, зокрема: чавуну, вапна та кисню, а також досягти покращення матеріального балансу плавки. Зменшення питомих витрат цих ресурсів забезпечує пряме скорочення собівартості виплавки сталі на .... грн/т, що підтверджено статистичним аналізом і розрахунками.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойченко Б. М., Охотский В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія : Підручник. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
2. Чорнега, Д.Ф. Основи металургійного виробництва металів та сплавів: підручник / Д.Ф. Чорнега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я.Готвянського. - К.: Вища школа, 2006. - 503 с.
3. Козаков А.А. Про вплив вмісту вуглецю у чавуні на тепловий баланс конвертерної плавки / О.О. Козаков, І.П. Гриневич, В.І. Веремейчиков та ін. // Металургійна та гірничорудна промисловість. - 1984. - № 2. - С. 14 - 15.
4. Дніпровський металургійний інститут Українського державного університету науки і технологій. Режим доступу: (<https://nmetau.edu.ua/file/lektcii.pdf>) (дата звернення: 13.12.2024)
5. Сігарьов, Є.М. Моделювання плавлення металобрухту різної щільності у киснево-конвертерній плавці. / Є.М. Сігарьов, Ю.С. Лобанов, С.В. Семірягін, А.А. Похвалітий // *Дніпровський державний технічний університет. Металургія. 2020.* С. 3–8. DOI 10.31319/2519-2884.37.2020.1
6. Сігарьов, Є.М. Енергоефективність конвертерного процесу із заміниками сталевих брухту у шихті. / Є.М. Сігарьов, Ю.С. Лобанов // *Monografia rok konferencyjna «SCIENCE, RE-SEARCH, DEVELOPMENT. №32»*, Berlin, 30-31 серпня 2020 р. Warszawa: Sp.z.o. «Diamond trading tour», 2020. С. 48-61.
7. Сігарьов, Є.М. Удосконалення методики визначення металургійної цінності окискованих відходів. / Є.М. Сігарьов, В.П. Полетаєв, О.А. Вовк // *Зб. наукових праць Дніпровського державного*

технічного університету (технічні науки). Кам'янське, 2019. Вип. 1 (34). С. 15-23.

8. Чернятевич І.В., Сігарєв О.М., Чернятевич А.Г. Сучасний стан та напрямки вдосконалення конструкцій кисневих фурм для продування конвертерної ванни. *Металургійна на гірничо-рудна промисловість*. – 2008. – № 12. – С. 23-27.

9. Чернятевич, О.Г. Розробка конструкції двоярусної фурми та режиму продування ванни 160-т конвертерів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з її використанням / О.Г. Чернятевич, Є.М. Сігарєв, І.В. Чернятевич та ін. / *Теорія та практика металургії*. 2012. №5-6. С. 76-85.

10. Чернятевич А.Г., Сігарєв Є.М., Чернятевич І.В. Нові розробки конструкцій кисневих фурм та способів продування ванни 160 конвертерів ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». *Теорія та практика металургії*. 2009. № 2. С. 31-38.

11. Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С., Полетаєв В.П. Вплив якості металобрухту при його попередньому підігріві на енергоефективність конвертерної плавки. *Зб. наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2020. Вип. 1 (36). С. 21-27.

12. Сігарєв Є.М., Недбайло Н.М., Гуржій Д.О. Енергозберігаючий технологічний маршрут виплавки сталі для ПАТ «ДМКД». *Зб. наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. Кам'янське, 2015. Вип. 1 (26). С. 3-10.

13. Баптизманський В.І., Бойченко Б.М., Третьяков Є.В. *Металобрухт у шихті кисневих конвертерів*. Металургія, 1982. 136 с.

14. Богушевский, В. С. Удосконалення електричних та технологічних режимів доведення металу на установці ківш-піч / В. С. Богушевский, А. Э. Скачок // *Метал та лиття України*. – 2015. – №2. – С. 12–15.

15. Богушевський В. С. АСУТП виробництва сталі у конвертерах / В.С. Богушевський, Н. А. Рюмшин, Н. А. Сорокін. - К.: "Техніка", 1991. - 180 с.
16. Бойченко Б. М. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів та екологія) / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. Підручник. – Дніпропетровськ: РВА «ДніпроВАЛ», 2004. – 454 с.
17. Богушевський В. С. Контроль динаміки ванни в процесі продування як складова системи управління конвертерною плавкою / В. С. Богушевський, К. В. Єгоров // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2013. - № 1. - С. 51-56.
18. Богушевський В. С. Обезуглерожування сталі, як основний параметр оптимального управління ККП / В. С. Богушевський, С. Г. Мельник, С. В. Жук // Метал та лиття України. - 2014. - № 2. - С. 14-16.
19. Богушевський В. С. Математическая модель АСУ конвертерной плавкой / В. С. Богушевский, Ю. В. Оробцев, Н. А. Рюмшин, Н. А. Сорокин. – К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1996. – 212 с.
20. Охотський, В.Б. Продувні процеси в сталеплавильних технологіях. Плавка / В.Б. Охотський, О.Г. Величко, Лю Тянь І., Л.С. Молчанів. // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2016 – №5. с. 12-17.
21. Харлашин П.С., Ковура А.Б., Куземко Р.Д. Вплив нагрівання азоту перед фурмою на ежектування газів у порожнині конвертера. – 2011 – №9. с. 19–22.
22. Чернятевич, О.Г. Розробка дуттьового та шлакового режимів конвертерної плавки при верхньому кисневому продуванні. // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2015 – №4. с. 24-31.
23. Чернятевич О.Г., Учитель Л.М., Пантейков С.П., Івко В.В. Підвищення стійкості зварних конструкцій наконечників верхніх

кисневих фурм у конвертерному цеху Дніпровського металургійного комбінату. – 1999, с. 137–139.

24. Molchanov L.S., Chernyatevich A.G., Vakulchuk V.V., Yushkevich P.O., Chubin M.K. Evaluation of influence of multilevel oxygen lance constructions on blowing efficiency of converter bath with post-combustion of waste gases : Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32. – pp. 208–219.

25. Робота 130 конвертерів, обладнаних двоярусними фурмами / В.І. Баптизманський, В.О. Куликов, А.Т. Китаїв [та ін.] // Експрес-інформація ЦНДІ та ТЕІ ЧС. – 1974. – серія 6. – вип. 3. – С. 1–14.

26. Рижавський О.З., Пирогов А.Ю., Зімогляд А.В. Реконструкція газовідвідних трактів великовантажних конвертерів // Екологія та промисловість.-2017. – № 3–4. С. 4–10.

27. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ». – 2004. – 454с

28. В.Б. Охотський. Енергія активації процесу окислення вуглецю під час продування // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2006. – №7. с. 59–61.

29. Богушевський В.С. Вплив неконтрольованих параметрів чавуну та брухту на хід конвертерної плавки / В.С. Богушевський, А.Е. Скачок, В.Ю. Сухенко // Розвиток інформаційно-ресурсного забезпечення освіти та науки в гірничо-металургійній галузі та на транспорті 2014 року: збірник наукових праць міжнародної конференції, 27–28 вересня 2014р. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 247–254.

30. Стоянов О.М. Аналіз впливу неконтрольованих параметрів на матеріало- та енергоємність конвертерної плавки / О.М. Стоянов, К.Г. Нізяєв, Л.С. Молчанов, А.В. Рижкін // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2017. – №1. С.18-24.

31. Выплавка конвертерной стали. Технологическая инструкция: ТИ-230-С320-21 / замість ТИ-230-С320-12; Затв. Тех. директор 29.11.2021; ПрАТ «Дніпровський коксохімічний завод. Металургійне виробництво». – Кам'янське, 2021.– 59 с.
32. Баптизманский В.И. Организация эксперимента / В.И. Баптизманский, Ю.Н. Яковлев, Ю.С. Паниотов. – К.: УМК ВО, 1992. – 244 с.
33. ДСН 3.3.6.042-99. "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень". – К.: Держстандарт, 1999.
34. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn\\_v\\_2\\_5\\_28/1-1-0-1188](https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188)
35. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвук та інфразвук. – К.: Держстандарт, 1999
36. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2009. – Х.: Форт, 2009.
37. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. - Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004
38. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків, установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К.: Мінрегіонбуд України, 2016.
39. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – К.: Мінрегіон, 2017.
40. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. - К.: Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій, 2014
41. Перистый М.М., Кравченко А.В., Раджи О.И. Проблемы повышения экологической безопасности конвертерного производства. [Электронный ресурс] <http://masters.donntu.org/2006/fizmet/klutkina/library/article4.html>