

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
«ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВИХ ТА БІЗНЕС ТЕХНОЛОГІЙ»

Шарандін Кирило Миколайович

УДК 669.184.125.046.58.001

**РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРІВКИ КОНВЕРТЕРА З
ВИКОРИСТАННЯМ МАГНЕЗІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ
ВІТЧИЗНЯНОЇ СИРОВИНИ**

Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів
та спеціальних сплавів»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів
НАН України, м.Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Смірнов Олексій Миколайович,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України (м. Київ),
завідувач відділом магнітної гідродинаміки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент, старший науковий
співробітник **Костецький Юрій Віталійович**
Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України

кандидат технічних наук, завідувач відділом
Молчанов Лавр Сергійович
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
НАН України

Захист відбудеться «47» "2024 р. об 33 годині
на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 08.084.03 Українського державного
університету науки і технологій за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці і на офіційному сайті
Українського державного університету науки і технологій за адресою: 49010, м.
Дніпро, вул. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «3; » березня 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03
доктор технічних наук, професор

Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальність роботи. Одним з найбільш важливих елементів конвертера є футерівка внутрішньої порожнини, стійкість якої може складати від 2-3 тисяч плавок до 7-8 тисяч плавок за кампанію і більше. При цьому ерозія (зношення) футерівки конвертера відбувається нерівномірно. Відповідно в металургійній практиці прагнуть знизити зношення на більш небезпечних ділянках за рахунок використання вогнетривів більш високої стійкості та застосування методів ремонту футерівки в процесі експлуатації конвертера.

Ерозія робочого шару вогнетривкої футерівки конвертера є одним з найбільших джерел матеріальних і енергетичних витрат високотемпературних процесів. В останні 2-3 десятиліття в сталеплавильній практиці спостерігається значний прогрес у виплавці сталі в конвертері з забезпеченням високої стійкості його футерівки. Найбільший розвиток отримали методи підготовки шлаку та його набризкування на робочу футерівку. Тим часом сам процес набризкування вимагає його адаптації до конкретних технологічних умов і матеріалів. Ключовим елементом у такій технології є подача в шлак після випуску сталі певної кількості флюсу на основі магнезиту, що забезпечить отримання шлаку оптимальної з точки зору налипання консистенції.

Однією зі специфічних проблем, з якою стикаються металургійні заводи України, є відсутність родовищ магнезиту. Найбільш перспективним заміником магнезиту можуть бути вторинні відходи магнезитових штучних виробів, які широко використовуються у сталеплавильному виробництві з питомою витратою 3-4 кг на тонну сталі.

Актуальність цієї роботи полягає в тому, що вона спрямована на вивчення і розвиток наукових уявлень про особливості ведення конвертерної плавки за умови періодичного нанесення гарнісажу на робочий шар футерівки, динаміки формування шлаку на основі магнезитових відходів, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними магнезіальними масами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає «Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року» (постанова обласної Ради від 22.03.2002 р, №3 / 25-656) і «Державній програмі енергозбереження».

Матеріали дисертаційної роботи є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт, проведених в Державному вищому навчальному закладі (ДВНЗ) «Донецький національний технічний університет» (до 30.09.2014 рр.):

«Дослідження суміщених технологій виплавки чавуну з витратою коксу на рівні 200 кг/т і процесів рафінування металу при продуванні аргоном через спеціальні пористі блоки» (Державна тема Д-5-12, 2012-2014 рр.), «Дослідження гідродинамічних умов перемішування металу в 6-ти струмковому промковші ПАТ «ЄМЗ» та розробка конструкції внутрішньої порожнини промковша та металоприймача, що враховує умови, які виникають при розливанні довгими

серіями з підвищеною швидкістю вилучення заготовки » (Договір №398/13, 2013 р. ПАТ« ЄМЗ »).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії та технології конвертерної плавки, спрямованої на підвищення ефективності процесу виплавки в частині збільшення стійкості футерівки за рахунок періодичного нанесення гарнісажного шару шляхом додавання спеціального флюсу та роздування шлаку азотом після випуску сталі, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними масами.

Для досягнення наведеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні задачі:

- проаналізувати основні рішення в частині підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера, що використовуються в промисловості;
- вивчити основні методи та прийоми ремонту робочого шару футерівки конвертера;
- розробити фізичну модель для вивчення гідродинаміки рідкої ванни конвертера;
- дослідити особливості перемішування рідкої ванни конвертера під час продування;
- розробити фізичну модель для вивчення ефекту нанесення гарнісажного покриття в конвертері;
- визначити вплив фракційного і хімічного складу флюсу на ефективність нанесення гарнісажного покриття;
- розробити методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку та гарнісажного покриття;
- встановити взаємозв'язок між гранулометричним складом твердих частинок і в'язкістю шлаку, що використовується для набризкування шлаку;
- розробити методику гарячого моделювання процесу підварювання футерівки конвертера саморозтічними масами;
- розробити методику оцінки фізико-хімічних властивостей підварювального конгломерату;
- дослідити можливість використання для виробництва флюсів-модифікаторів і саморозтічної ремонтної маси вторинних матеріалів на основі магнезиту;
- розробити основні технологічні прийоми виробництва магnezіальних флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас для конвертерів;
- дослідити ефективність розроблених флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас у промислових умовах для нанесення гарнісажу та підвищення стійкості футерівки конвертерів.

Об'єкт дослідження. Процеси перемішування рідкої сталі та шлаку, а також налипання гарнісажу на робочу поверхню футерівки конвертера; процеси адгезії, корозійної і ерозійної стійкості підварювальної маси на ділянках футерівки конвертера що ремонтуються .

Предмет дослідження. Гідродинамічні та масообмінні процеси в системі «рідкий метал – шлак – футерівка конвертера» в умовах гарячих ремонтів

робочого шару футерівки конвертера методом розбризкування шлаку і підварювання саморозтічними масами.

Методи дослідження. Робота є комплексним дослідженням, що ґрунтується на використанні сучасних методів фізичного та математичного моделювання, а також на порівняльних кількісних оцінках утворення гарнісажного шлаку і формування підварювального конгломерату в місцях локального зносу футерівки конвертера. Фізичне моделювання процесів переміщення сталі і шлаку в конвертері виконано з урахуванням критеріїв гідродинамічної подібності Фруда і гомохронності. Математична модель базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії, імпульсу, рівняннях математичної фізики, а також відомих і апробованих математичних методах. Адекватність створених моделей підтверджується співвідношенням результатів математичного моделювання та теоретичних досліджень з промисловими експериментами і впровадженням у виробництво розроблених рекомендацій щодо оптимізації параметрів нанесення гарнісажу і підварювання місць локального зносу футерівки конвертера. Обробку експериментальних даних, а також математичне моделювання гідродинамічних процесів здійснювали з використанням пакетів прикладних програм Ansys і Microsoft

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримали подальший розвиток наукові уявлення про характер перемішування рідкої ванни в конвертерах з комбінованим продуванням. Встановлено, що в діапазоні розташування донних фурм $0,4R - 0,66R$ має місце накладення потоків один на другий, що тягне за собою їх взаємне ослаблення. У діапазоні $0,66R - 0,9R$ – взаємний вплив різноспрямованих потоків зменшується та при положеннях $0,7R - 0,74R$ приймає мінімальне значення. Це створює додаткові передумови для ефективного перемішування рідкого обсягу ванни. Подальше переміщення фурм від центру до периферії ($0,74R - 0,8R$) виводить зустрічні потоки верхнього і нижнього продування з зони спільної взаємодії. Наближення донних фурм до конічної частини днища тягне за собою ослаблення циркуляції рідини в «центральному» обсязі ванни.

2. Вперше показано, що наростання гарнісажного шару більшою мірою характерно для зони стику нижнього конуса і циліндричної частини конвертера, а також для зони цапф. Визначено режими роздування, що забезпечують рівномірність нанесення покриття в зонах підвищеного ерозійного зносу. Встановлено, що при постійній витраті вдувного азоту і його тиску в магістралі ($Q_r = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_r = 16 \text{ ат}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми. Максимальній кількості нанесеного гарнісажу відповідає діапазон положення фурми в $1,3-1,7 \text{ м}$ над рівнем шлакової ванни. При цьому об'ємна частка диспергованої твердої фракції в обсязі шлаку, у кількості $6-7\%$, забезпечує максимальну «ефективну витрату» гарнісажу, при інших рівних умовах.

3. Встановлено, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази у шлаку його в'язкість зростає. При досягненні концентрації $7-9\%$ «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для виконання операції

набризкування. А зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

4. Показано, що основними параметрами, що визначають змочування, є вміст (FeO) і (MgO) у шлаку. Так, при вмісті (FeO) більше 25% кут змочування при вмісті MgO 7-8% досягає менше 30 °. При зниженні вмісту FeO кут змочування збільшується і при наближенні до 13-15% становить ~ 75-85°. Подальше зниження концентрації FeO призводить до збільшення кута змочування понад 90°, при цьому змочування різко погіршується. Збільшення в шлаку вмісту MgO, викликає погіршення змочування периклазовуглецевого матеріалу, причому ступінь підвищення кута θ сильно залежить від окислення шлаку.

5. Вперше сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють забезпечити цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку. Наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.), з яких щонайменше 80%, мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкокорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7-8%, вже в перші секунди процесу роздування.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору флюсів для формування гарнісажу для нанесення на робочу поверхню футерівки конвертера і параметрів нанесення гарнісажу, а також вибору компонентів флюсу, в тому числі з відходів магнезійних виробів.

Застосування розроблених флюсів дозволяє підвищити стійкість футерівки конвертера, мінімізувати питомі витрати імпортованих вогнетривів на основі магнезиту, а також підвищити продуктивність конвертера.

Розроблені технологічні рекомендації забезпечують підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера і, відповідно, зменшують питому витрату вогнетривів у середньому на 1,2 - 3,5 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магнезійних флюсів виконані в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «МК «Азовсталь» і ПАТ «Алчевський МК». Економічний ефект від використання магнезійних модифікаторів для гарнісажного покриття становить 0,24-0,95 USD/т сталі.

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору магнезійних, саморозтічних, підварювальних мас для гарячого ремонту зон випереджаючого (локального) зносу футерівки конвертера.

Застосування розроблених вітчизняних саморозтічних мас дозволяє практично повністю мінімізувати залежність підприємств від імпортованих

аналогів, підвищити стійкість футерівки агрегатів і їх продуктивність, а також знизити питомі витрати вогнетривів на 0,003 - 0,01 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магnezіальних саморозтічних підварювальних мас виконано в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «КаметСталь» і ПрАТ «МК «Азовсталь». На даний час підварювальна маса марки «GIR-RB-X-DMK» використовується в промислових умовах конвертерного цеху ПрАТ «КаметСталь» на постійній основі. Загальний економічний ефект від використання ремонтної маси становить 0,01 USD/т за рахунок оптимізації технології, високої стійкості і конкурентної вартості.

Запропоновані автором методики та принципи тестування властивостей флюсів, гарнісажних шлаків, властивостей підварювальних мас і їх експлуатаційних властивостей можуть бути використані на різних металургійних підприємствах, у тому числі і при створенні нових видів вогнетривких матеріалів для високопродуктивних конвертерів у великих сталеплавильних цехах, а також в навчальному процесі на металургійних факультетах технічних університетів.

Особистий внесок здобувача. Здобувач брав участь на всіх етапах досліджень, формулюванні мети і задач досліджень, планування і проведення експериментів, аналізу та узагальнення отриманих результатів.

Здобувачем розширено уявлення про характер переміщення металу та шлаку в конвертері з комбінованим продуванням. На цій основі вдосконалені технологічні аспекти отримання шлаку для нанесення гарнісажу і ремонту місць локального зносу футерівки методом підварювання, що в підсумку забезпечує підвищення стійкості футерівки конвертера та зниження питомих витрат на кампанію.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати дисертації обговорювалися на 5 міжнародних конференціях: 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 1-3 October 2012. Dresden (Dresden, 2012); 5th Baosteel Biennial Academic Conference, 2013 (Shanghai: 2013); International Colloquium on Refractories, September 26-27, 2018 (Aachen, 2018), International Colloquium on Refractories, September 25-26, 2019 (Aachen, 2019), Unified international Technical Conference on Refractories (UNITECR) 18th Biennial Worldwide, September 26-29, 2023 (Frankfurt, 2023).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 16 публікаціях, у тому числі: 1 монографії, 4 статті опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 3 статей в зарубіжних наукових виданнях, 1 статті в збірнику наукових праць, 5 тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, 2 патентах України.

Структура дисертації. Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст дисертації викладено на 183 сторінках. У розділах дисертації 78 рисунків і 48 таблиць. Список використаних джерел на 13 сторінках містить 132 найменування. 2 додатки на 2 сторінках. Повний обсяг дисертації – 215 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання досліджень, представлені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, а також дані про апробацію та публікації основних результатів роботи.

У першому розділі представлено виконаний аналіз літературних даних щодо особливостей виплавки сталі у кисневих конвертерах і роботи футерівки.

Стандартною практикою у світовому виробництві конвертерної сталі на даний час є застосування в якості вогнетривкої футерівки конвертерів периклазовуглецевих штучних виробів (вміст вуглецю 5-25% в залежності від умов експлуатації) на основі суміші високочистого плавленого магнезиту. У першому наближенні заходи щодо догляду за футерівкою можна розбити на три основні групи: торкретування, підварювання і роздування підготовленого кінцевого шлаку азотом.

Для українських конвертерних цехів найбільш перспективною «виглядає» технологія роздування шлаку азотом і ремонт локальних місць зносу підварюванням саморозтічними масами, як ефективні методи догляду за футерівкою протягом кампанії конвертера з мінімальними питомими витратами. Розробка нових видів магнезійних модифікаторів і ремонтних мас для цих цілей, переважно на основі вітчизняної сировинної бази, для конкретних виробничих умов є актуальною дослідницькою задачею. Особливої уваги заслуговує сировина, що відноситься до т. зв. відходів видобутку і виробництва доломіту, магнезиту та вогнетривкої продукції на території України та ближнього зарубіжжя, а також лом периклазовуглецевої цегли (конвертера, ковші і т. д.) наявний у значних кількостях на кожному металургійному підприємстві.

Таким чином, виробництво високомагнезійних флюсуєчих добавок і ремонтних, саморозтічних мас на базі недефіцитних, вторинних і викопних ресурсів України та ближнього зарубіжжя є досить актуальним, рентабельним і ефективним.

У другому розділі розглянуто основні моделі, методики та методи досліджень.

З огляду на той факт, що при вдуванні газу в рідину дуже важливими представляються процеси, що відбуваються під дією сил тяжіння, що обумовлюють спливання бульбашок газу і сил інерції, що визначають розвиток системи циркуляційних потоків у рідкій ванні. В даній роботі в якості базових критеріїв подібності були прийняті критерій Фруда і критерій гомохронності (Струхаля).

Фізична модель виготовлена в масштабі 1:6 по відношенню до конвертера місткістю 160 т. Модель виконана з органічного скла (плексиглас), що має високою прозорістю і легко піддається різним способам обробки (згинанню, різанню і т. ін.), що дозволило точно скопіювати обрану конфігурацію контурів натурального зразка агрегату. Схема установки наведена на рисунку 1.

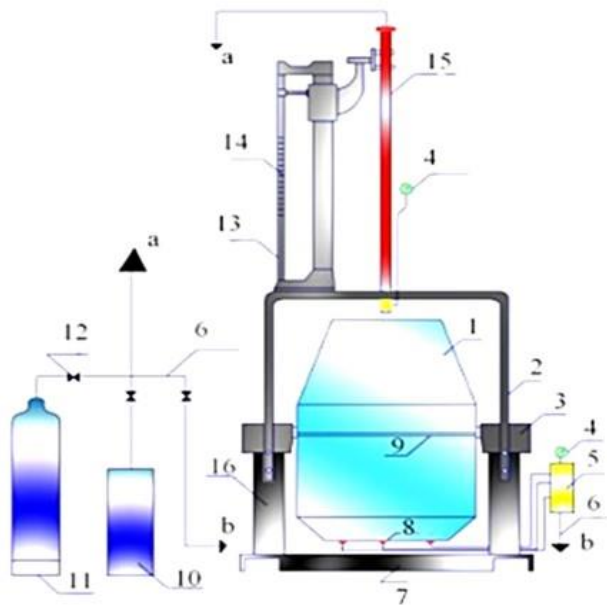


Рис. 1. Схема лабораторної установки: 1 – посудина (органічне скло), 2 – опора фурми, 3 – цапфи, 4 – манометр, 5 – колектор, 6 – магістраль, 7 – опора установки, 8 – донні продувальні елементи, 9 – опорне кільце, 10 – компресор, 11 – балон, 12 – кран, 13 – напрямна фурми, 14 – лінійка, 15 – фурма, 16 – стійка, 17 – програмне забезпечення, 18 – АЦП.

Установка оснащена фурмами для верхнього і нижнього продування. Тиск на зрізі сопла реєструється манометром. У конструкції верхньої фурми передбачена зміна різних типів її наконечників. Донні фурми розташовані по колу і мають універсальну конструкцію, що дозволяє змінювати їх розташування без порушення герметичності посудини. Основні параметри моделі по відношенню до промислового зразка наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри	Реальний агрегат	Модель
Геометричний масштаб	1	1:6
Тип наконечника верхньої фурми	П'ятисопловий	П'ятисопловий
Критичний діаметр сопла ($d_{кр}$), мм	32	5,3
Тиск перед соплами (P), МПа	1,5 – 1,6	0,17
Витрата газу на верхню фурму (Q), м ³ /хв	430 – 450	1,8
Кількість донних фурм	-	8
Положення донних фурм (1/R)	-	0,4R – 0,9R
Витрата газу на донне продування ($Q_{д.п.}$), м ³ /хв	-	0,01 – 0,05
Рівень рідкої ванни, м	1,5	0,27

Розроблена фізична модель у поєднанні з методикою оцінки гідрогазодинамічної поведінки конвертерної ванни дала можливість визначити характер циркуляційного руху потоків сталі та шлаку, і відповідно, виявлення зон підвищеного ерозійного зносу вогнетривкої футерівки. Оптимізація режимів продування і взаємного розташування продувних пристроїв дозволила не тільки інтенсифікувати плавку, а й мінімізувати нерівномірний випереджаючий знос вогнетривів по зонам кладки футерівки конвертера.

Математична модель гідродинамічної поведінки рідкої ванни конвертера виконана на підставі отриманих даних під час фізичного моделювання. Метою математичного моделювання була якісна і кількісна оцінка гідродинаміки рідкого розплаву при продуванні в конвертері та визначення зон підвищеного ерозійного зносу футерівки.

Розробка математичної моделі перемішування рідкої сталі в конвертері виконана з використанням прикладного пакету Ansys Int., що реалізує метод скінченних елементів (МСЕ), у рамках модуля Flotran, який відображає CFD (Computerized Fluid Dynamics) технологію моделювання. Модель розглядалась як нестационарна, турбулентна, з однофазним поданням розплаву – сталі. Дослідження виконувались у постановці нестационарної задачі для нестисливої рідини з турбулентним плином. Кількість ітерацій, які використовуються при рішенні системи рівнянь, приймалося рівним 52. Інтервал часу, для якого здійснювався пошук рішення (тривалість продування), становив 600-1200 с.

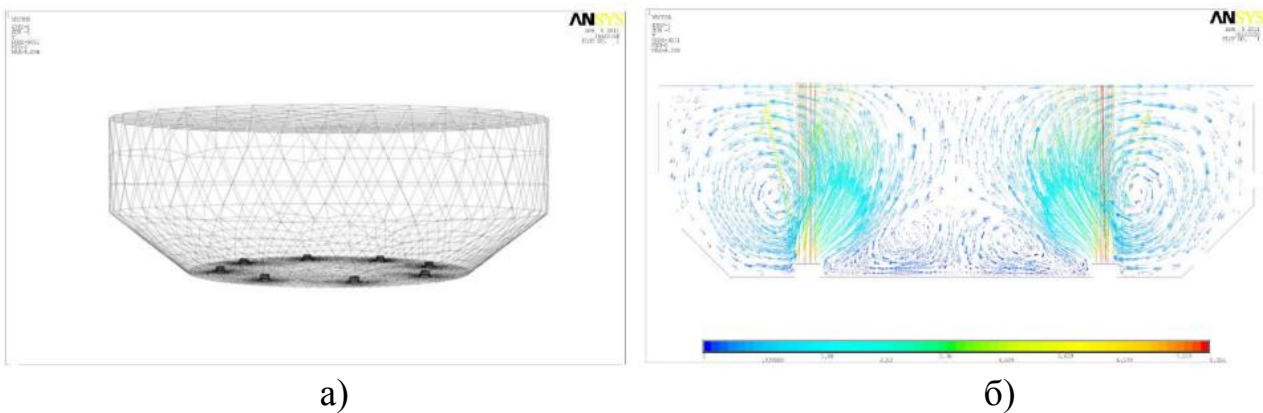


Рис. 2. Загальний вигляд математичної моделі рідкої ванни конвертера: а) вид кінцево-елементної моделі розрахункової області конвертерної ванни (тривимірна задача, довільна сітка), б) Векторна картина розподілу швидкостей потоку (розріз), положення донних фурм – $0,72R$, $Q_{\text{Ar}} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$; симетричний тороїд.

Математична модель перемішування розплаву в конвертері у достатній мірі дозволяє оцінити гідродинамічний стан ванни в процесі продування і виконати дослідження з оцінки оптимальних режимів вдування газу, включаючи його витрату, положення продувних вузлів і ймовірний ерозійний знос футерівки.

Розроблено фізичну модель 160 т конвертера в масштабі 1:20 і методика для якісної оцінки механізму нанесення гарнісажного покриття на футерівку агрегату. Зовнішній вигляд і схема установки наведені на рисунку 3.

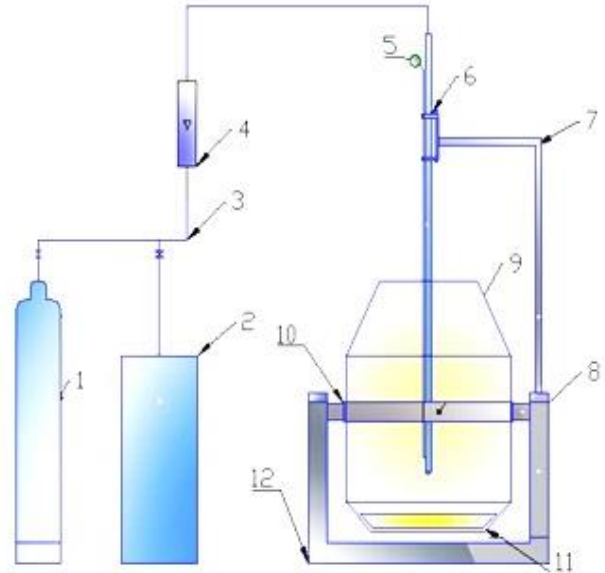


Рис. 3. Загальний і схематичний вигляд лабораторної установки, де: 1 – балон, 2 – компресор, 3 – трубопровід, 4 – ротаметр, 5 – манометр, 6 – фурма, 7 – опора фурми, 8 – цапфа, 9 – ємність, 10 – опорне кільце, 11 – моделююча рідина.

В якості продувального газу використовувалось повітря високого тиску. Основною особливістю рідини моделюючої покриття, що наноситься, була в'язкість, характерна для підготовленого шлаку насиченого оксидом MgO і фізична природа, що забезпечує швидке твердіння шару, що наноситься і адекватна адгезія до поверхні ємності. Необхідні властивості були досягнуті сумішшю синтетичного клейстера зі спеціальними «в'язучими» добавками, а також сплаву Вуда з дрібнодисперсним наповнювачем. В якості в'язкої добавки диспергованої в синтетичному клейстері використовувався тіосульфат натрію ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$). Сплав Вуда «насичували» молібденовою крихтою. Модифікуючі добавки в обох випадках мали фракцію 0,5-2 мм.

Дисперсні наповнювачі вибирались відповідно до щільність моделюючих середовищ, що забезпечують їх співвідношення на рівні $\approx 1/1,3$. Таке співвідношення щільності визначається подібністю диспергування важкорозчинної фракції периклазового зерна (щільність – $3,7 - 4,0 \text{ г/см}^3$) у конвертерному шлаку (щільність – $3,0 - 3,5 \text{ г/см}^3$). Так, розчин синтетичного клейстеру має щільність $1,2 \text{ г/см}^3$, а тіосульфат натрію – $1,67 \text{ г/см}^3$ (1/1,38). Щільність сплаву Вуда – $9,72 \text{ г/см}^3$, а молібдену – $10,22 \text{ г/см}^3$ (1/1,10).

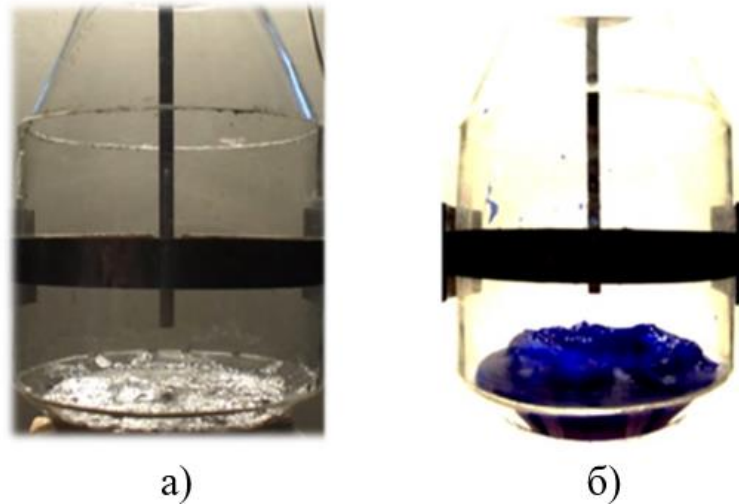


Рис. 4. Моделювання процесу роздування шлаку, початкова стадія (1 с) і «розкриття» каверн; а) – модифікований сплав Вуда, б) – підфарбований синтетичний клейстер.

Фізична модель та методика набризкування гарнісажного шару дозволяє оптимізувати технологічні параметри роздування, такі як витрата дуття, положення верхньої фурми і т. ін.

Розроблено модель і методику оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку та вмісту в ньому MgO після модифікування на ефективність адгезії до робочої поверхні периклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочуваності) і температурного інтервалу плавлення (тугоплавкості) гарнісажу.

Розроблена модель дозволяє провести безпосереднє модифікування конвертерного шлаку поруч зі спеціально підготовленими магnezіальними матеріалами, що мають різний хіміко-мінералогічний склад.

Методика реалізовувалась у 3 етапи.

На 1-му етапі здійснювали підготовку зразків вогнетривких «підкладок», що імітують двостадійний знос футерівки агрегату (розігрів зразка та «просочування» поверхні рідким шлаком).



Рис. 5. Підготовлена вогнетривка підкладка, що імітує футерівку агрегату (30×30×30 мм); А – глибина інфільтрації шлаку у вогнетрив.

На 2-му етапі здійснювали безпосереднє модифікування конвертерного шлаку за допомогою спеціально підготовлених магnezіальних матеріалів, що мають різний хіміко-мінералогічний склад. Зовнішній вигляд і схема установки наведено на рисунку 6.

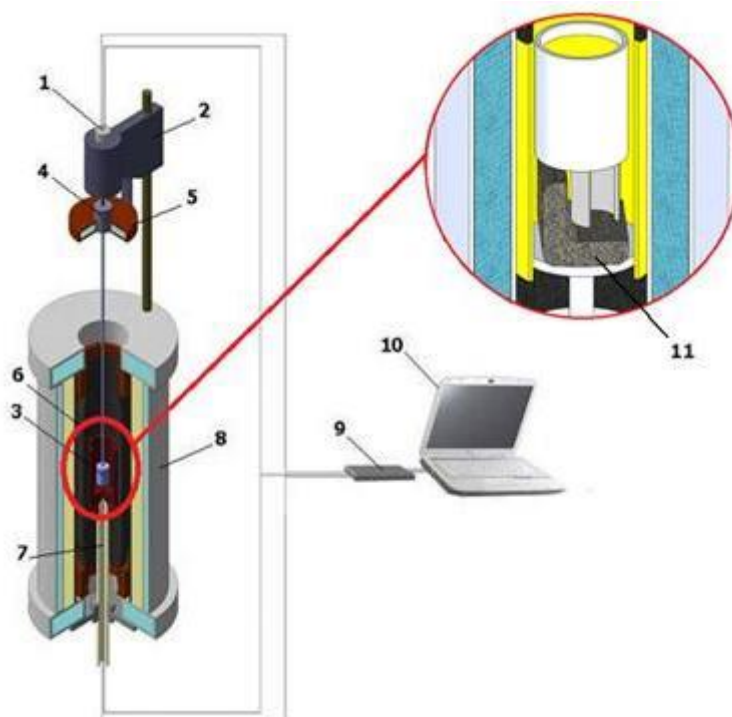


Рис. 6. Схематичний вигляд лабораторного обладнання для проведення другого методичного етапу, де: 1 – електродвигун; 2 – штатив; 3 – молібденовий вал зі шпинделем; 4 – блок підшипників; 5 – мідний водоохолоджуваний холодильник; 6 – молібденовий тигель з розплавом шлаку; 7 – термопара; 8 – піч Таммана; 9 – реєстраційний блок з аналогово-цифровим перетворювачем; 10 – комп'ютер, 11 – вогнетривкий «зразок» - підкладка.

На підставі результатів моделювання сформульовано концептуальний підхід до фізико-хімічних властивостей флюсів-модифікаторів призначених безпосередньо для наведення шлаку «під гарнісаж». Зокрема, концепція передбачає підвищення в'язкості кінцевого шлаку шляхом його модифікування до дисперсної системи з чітко регламентованою гранулометричною складовою. Така концепція передбачає утворення значної кількості тугоплавких феритних фаз в підготовленому шлаку та формування міцного «скелета» в охолодженому гарнісажному покритті за рахунок нерозчинених фракцій – «зерен».

На 3-му етапі оцінювали адгезію підготовленого гарнісажу до периклазовуглецевого вогнетриву і термостійкість (тугоплавкість) остиглого покриття.

Суть модельного етапу полягала в наступному: на підготовлений, вогнетривкий куточок, нагрітий до температури футерівки конвертера перед роздуванням (1500 °С) містилася крапля модифікованого шлаку масою 4-5 г. За допомогою масштабування фото і відео зйомки даного процесу визначались

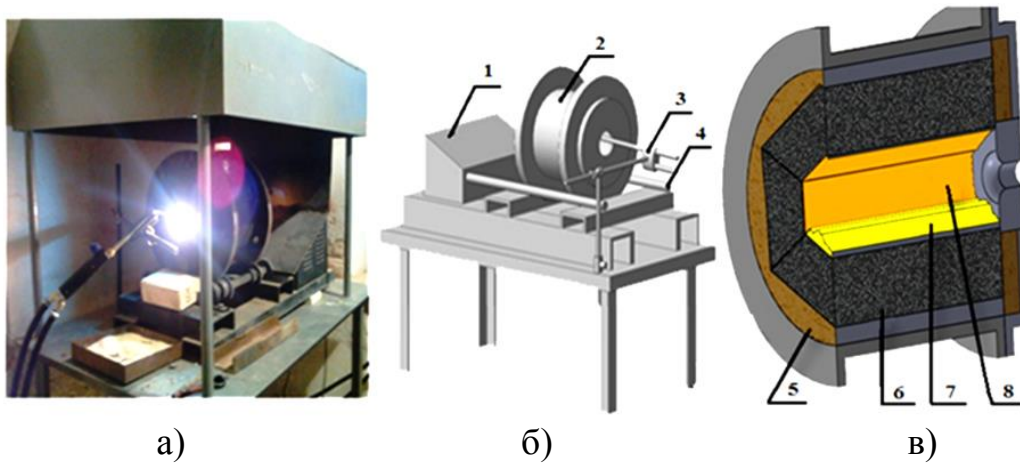


Рис. 8. Загальний вигляд (а) і схема установки (б, в) експериментального стенду печі роторного типу, де: 1 – двигун; 2 – корпус печі; 3 – газокисневий пальник, 4 – приводний вал; 5 – теплоізоляція; 6 – периклазовуглецева футерівка (конвертерні вогнетриви); 7 – підварювальна маса (експериментальні склади); 8 – робоча поверхня вогнетрива (пропитка продуктами плавлення).

Методика експериментальних досліджень була розділена на три етапи.

На 1-му етапі здійснювали підготовку зразків цегли до операції підварювання. Проводився примусовий знос вогнетриву і просочення його поверхні продуктами плавки.

На 2-му етапі здійснювали безпосередньо операцію підварювання локального місця зносу «еталонними» і розробленими складами. Оцінювалася «рідкоплинність» маси, її адгезія до вогнетривів (місцем зносу), швидкість спікання.

На 3-му етапі оцінювалася експлуатаційна стійкість підварювальної маси. Піч безперервно оберталася з рідкометалевою емульсією протягом 1 години, для імітації ерозійного і корозійного зносу конгломерату підварювання.

Після якісної оцінки поведінки підварювальної маси, ступеня її адгезії до периклазовуглецевої цегли, часу спікання і корозійно-ерозійної стійкості піч охолоджували до кімнатної температури. Здійснювали демонтаж внутрішньої футерівки і відділення наважки спеченої маси від поверхні вогнетриву, її зважували на лабораторних вагах. Після цього відбирались і готувались зразки спеченої маси для механічних випробувань межі міцності на стиск (Б, МПа).

У третьому розділі розглянуто особливості розвитку процесів, що супроводжують формування гарнісажного шару та можливості рівномірного відновлення випереджаючого «грибовидного зносу» футерівки конвертера, за допомогою оптимізації дуттєвих параметрів і фізичних властивостей шлаку що роздувається.

Встановлено, що в діапазоні розташування донних фурм 0,4R-0,66R має місце накладення циркуляційних потоків один на другий, що тягне за собою їх взаємне ослаблення. У діапазоні 0,66R-0,90R взаємний вплив різноспрямованих потоків зменшується і при положеннях фурми 0,70R-0,74R приймає мінімальне значення. Це створює додаткові передумови для ефективного перемішування

рідкого обсягу ванни. Подальше переміщення фурм від центру до периферії ($0,74R-0,8R$) виводить зустрічні потоки верхнього і нижнього продування з зони спільної взаємодії. Наближення донних фурм до конічної частини днища тягне за собою ослаблення циркуляції рідини в «центральному» обсязі ванни. Такий ефект, у свою чергу, інтенсифікує ерозійний вплив потоків на футерівку нижнього конуса і зони сталі. В результаті формується «грибовидний» знос кладки.

В ході математичного моделювання встановлено оптимальні положення донної продувної системи – $0,72R$ і витрата інертного газу – $8 \text{ м}^3/\text{хв}$, що забезпечують симетричність організації потоків у обсязі рідкої ванни конвертера і мінімізацію їх ерозійного впливу на футерівку. Слід особливо відзначити високий рівень збіжності отриманих результатів у ході фізичного і математичного моделювання гідродинамічних процесів. Так, різниця між отриманими даними щодо раціонального положення донних фурм у ході фізичного ($0,74R$) і математичного ($0,74R$) моделювання не перевищує 3% абс.

Результати досліджень показали, що загальна картина результуючого потоку не залежить від організації дуття (комбіноване і/або верхнє продування) і спрямована від центру ванни до її периферії. Тому, повністю виключити ерозійний вплив останнього на вогнетриву нижнього конуса шляхом оптимізації гідродинаміки не представляється можливим.

Шляхом фізичного моделювання процесів роздування шлаку азотом встановлено, що до «наростання» гарнісажного шару більшою мірою схильні зони «кишень» (стик нижнього конуса і циліндра) та зони цапф. Ці ділянки футерівки і є найбільш «проблемними» з точки зору випереджаючого зносу і труднощів у виконанні гарячих ремонтів. Спеціально підібрана за своїми фізичними властивостями моделююча речовина (сплав Вуда + молібденова крихта) забезпечила можливість отримання кількісних оцінок (рівномірність, «ефективна» кількість, у т. ч. на одиницю часу, товщина гарнісажного шару) механізму і якості гарнісажу, що наноситься, в залежності від зміни параметрів продування (висота фурми, витрата і т. ін.), а також властивостей шлаку. Набризування здійснювали як безперервно, так і дискретно для визначення маси гарнісажу, що наноситься. На рисунку 9 представлена кінограма динаміки утворення гарнісажного покриття з використанням сплаву Вуда.

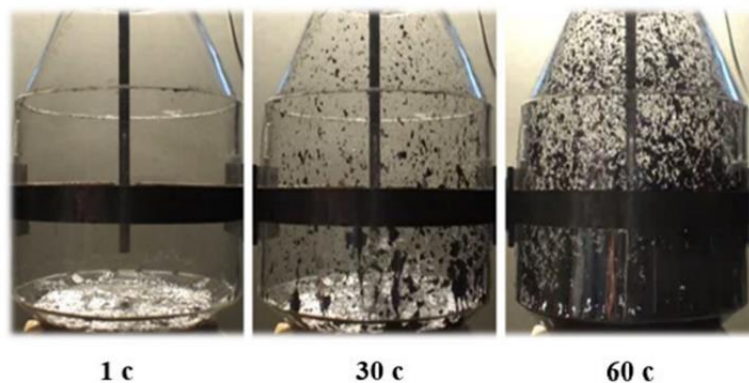


Рис. 9. Кінограма набризкування шлакового гарнісажу на поверхню футерівки конвертера (фізична модель: сплав Вуда + диспергована фаза (Mo)).

На рисунку 10 (а) представлена залежність маси гарнісажного покриття, що наноситься від висоти положення продувної фурми при постійній витраті газу. Слід зазначити, що витрату газу обрано в максимальному обсязі відповідному виробничим реаліям цеху з конвертерами місткістю 160 т. У перерахунку на промисловий зразок $Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16$. Такі показники взяті у зв'язку з забезпеченням «ефективної» роботи 6-соплового наконечника (сопла Лавалля) і максимального динамічного напору струменя азоту в процесі роздування. На рисунку 10 (б) показана залежність динаміки утворення гарнісажного шару (в одиниці часу, г/с) Від об'ємної частки диспергованої твердої фази у рідині при «оптимальній» витраті дуття $Q = 60 \text{ л/хв}$ і «оптимальному» положенні фурми $H = 80 \text{ мм}$.

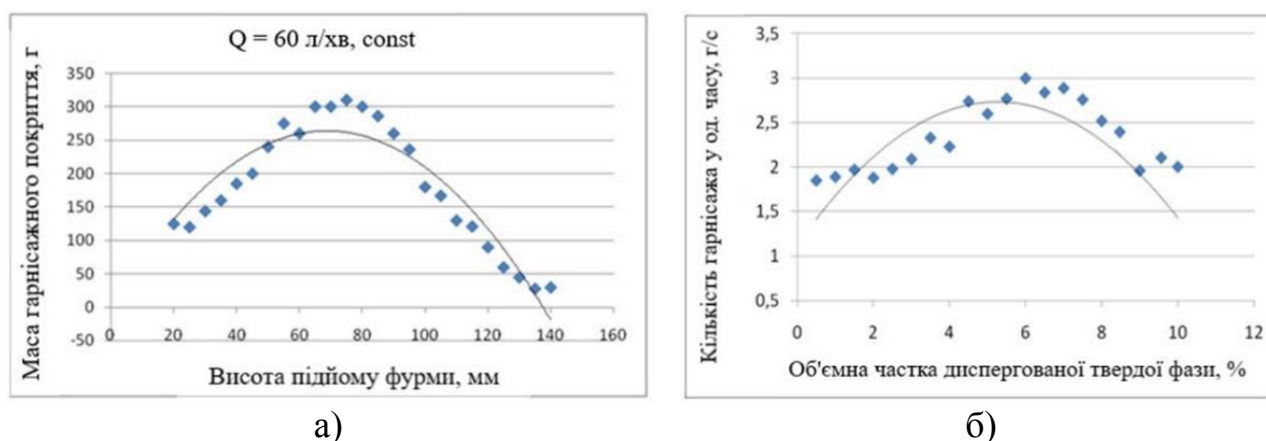


Рис. 10. Кількісні гідро-газодинамічні показники роздування шлаку азотом. а) – залежність маси гарнісажного покриття, що наноситься від висоти положення продувної фурми при постійній витраті газу; б) – залежність динаміки нанесення гарнісажу від об'ємної частки диспергованої твердої фази.

Встановлено, що при постійній витраті азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ аті}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми. Максимальній кількості нанесеного гарнісажу відповідає діапазон положення фурми у 1,3-1,7 м над рівнем шлакової ванни. При цьому об'ємна частка диспергованої твердої фракції в обсязі шлаку, у кількості 6-7%, забезпечує максимальну «ефективну витрату» гарнісажу, при інших рівних умовах.

Для реалізації розробленої методики визначення фізико-хімічних властивостей шлаків, модифікованих магnezіальними матеріалами був здійснений відбір зразків кінцевого («повалочного») шлаку з 10 промислових плавок 350-тонних конвертерів ПАТ «МК «Азовсталь». Відібрані 10 зразків кінцевого шлаку усереднили в одну наважку такого хімічного складу, %: $\text{CaO}=44,05$; $\text{MgO}=8,97$; $\text{FeO}=14,83$; $\text{SiO}_2=15,64$; $\text{P}_2\text{O}_5=0,75$; $\text{Al}_2\text{O}_3=1,58$; основність – 2,99 ($\text{CaO} + \text{MgO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)$).

Одним з основних завдань при розробці лабораторних складів була мінімізація часу асиміляції наважки модифікатора шлаком. Показано, що за рахунок оптимально підбраного шихтового (у т. ч. зв'язуючого) і

гранулометричного складу матеріалу, наважка за 30-31 с повністю асимілювалась шлаком. При цьому мілкодисперсна магnezіальна складова розчиняється у розплаві, а велика фракція (2-6 мм), що представляє собою «зерна» периклаза, рівномірно розосереджується в обсязі модифікованого шлаку. В результаті, шлак набуває гетерогенного стану, з підвищенням позірної в'язкості.

З метою визначення ступеня впливу «зернової» важкорозчинної фракції (2-6 мм) в обсязі підготовленого шлакового розплаву, на його позірну в'язкість усереднену наважку шлаку спочатку модифікували легкокорозчинним магnezіальним компонентом до концентрації $\text{MgO} \approx 8\%$. Встановлено, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази у шлаку, його в'язкість зростає. При досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для здійснення операції набризкування. Тоді, як зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше, спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

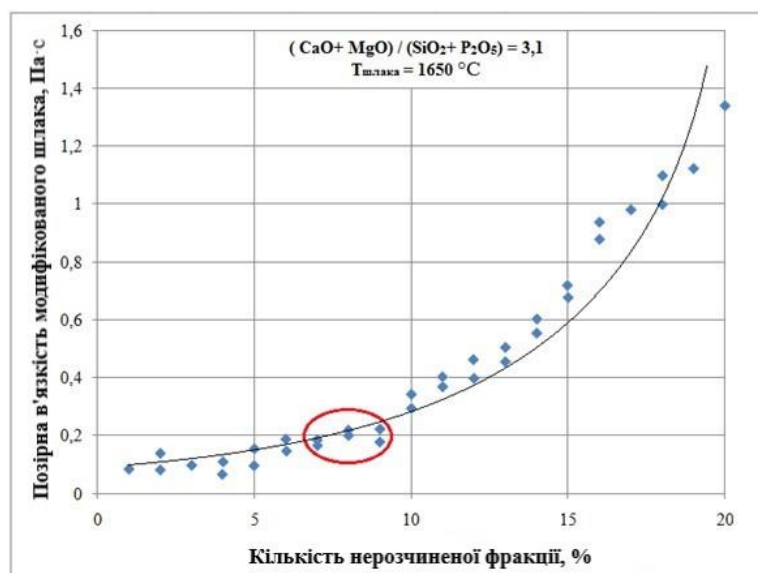


Рис. 11. Залежність позірної в'язкості підготовленого шлаку від кількості нерозчинених «зерен» (мас.%).

Такі дані добре корелюються з результатами фізичного (холодного) моделювання процесу роздування (8% зернової фракції).

Позитивний ефект від розроблених модифікуючих добавок досягається в результаті присадки наважки у кількості 11-12% від маси кінцевого шлаку, що лишився. Вимірювання в'язкості усередненої наважки шлаку після модифікування експериментальними складами зі строго регламентованими хіміко-гранулометричними складами, здійснювали при температурі 1630 - 1650 °C.

Встановлено, що у всіх зразках гарнісажного шлаку, модифікованого експериментальними складами присутні тверді частинки, представлені в процесі плавки залишками вапна і доломіту що не прореагували, від мікро- до макровключень. Тверді частинки периклазу, присутні у складі модифікатора, що

вносяться у шлак, розташовуються досить рівномірно у його обсязі і мають сталу суму від 0,5 до 4 мм. Такі «зерна» носять яскраво виражений характер центрів кристалізації і сприяють новоутворенню на цих центрах кристалів тугоплавких мінералів.

На рисунку 12 у якості прикладу, представлено зразки гарнісажного шлаку, модифіковані лабораторними складами БДМ, ДМ№2 і Х65 відповідно.

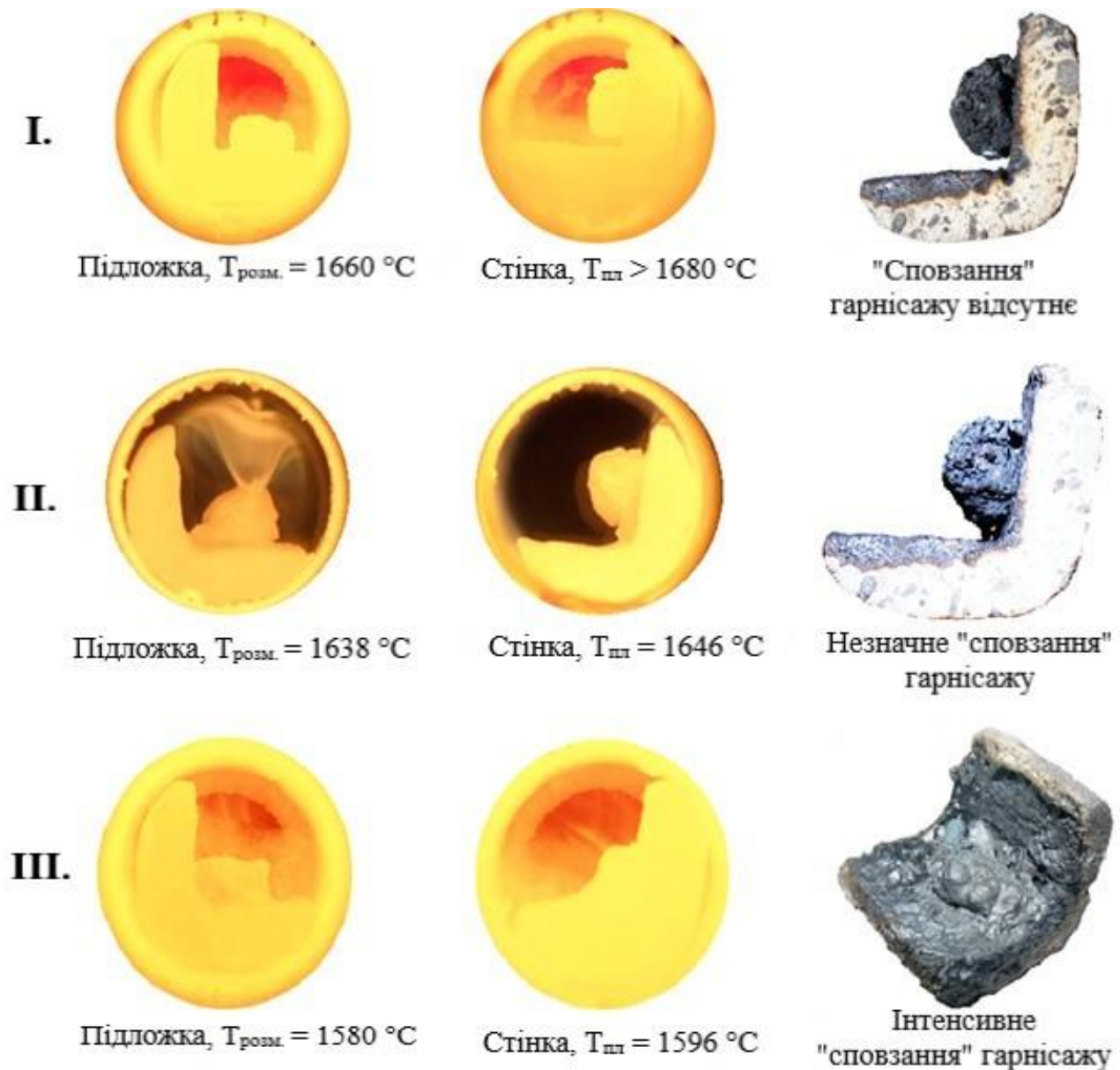


Рис. 12. Поведінка краплі гарнісажу в температурному інтервалі плавлення: а – висока адгезія і тугоплавкість ($> 1680 \text{ } ^\circ\text{C}$); б – висока адгезія, низька тугоплавкість ($1646 \text{ } ^\circ\text{C}$), незначне «сповзання» гарнісажу; в – низька адгезія, незадовільна тугоплавкість ($1596 \text{ } ^\circ\text{C}$), повне «сповзання» гарнісажу

У першому випадку (рис.12 (I)) при досягненні температур кінцевого періоду конвертерної плавки (1680 °С і більше) зразок шлаку, модифікований складом флюсу БДМ не досяг точки плавлення і не втратив адгезію до «куточка», тобто «сповзання» захисного шару не спостерігалось. У другому випадку (рис.12 (II)) вже по досягненню температури у 1638 °С, спостерігалось незначне поверхнєве оплавлення зразка шлаку з 11% присадкою модифікатора ДМ№2. Зокрема, підвищення температури конвертерної плавки до 1646 °С зумовило незначне «сповзання» краплі по вертикальній стінці. Незадовільну якість гарнісажу представлено на рисунку 12 (III). Так в інтервалі 1580- 596 °С, зразок модифікованого шлаку повністю перейшов у рідку фазу та стік.

За результатами досліджень встановлено, що 4 марки розроблених модифікаторів – БК-4, БДМ, Р70 і Ф70/30 забезпечують ефективне наведення, роздування і необхідну тугоплавкість гарнісажного шлаку. При цьому склади «БК-4» і «БДМ» виготовлені на основі бою периклазовуглецевої цегли і в якості «зернової» складової мають високочистий периклаз, а «Р70» і «Ф70/30» на основі спеченого магнезиту фракцією 2-6 мм. Розроблені склади на основі недефіцитних вітчизняних матеріалів у кінцевому рахунку мають високу швидкість розчинення в шлакових розплавах і забезпечують високу вогнетривкість, механічну міцність, а отже, і стійкість гарнісажного покриття.

Для реалізації розробленої методики визначення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей саморозтічних магнезіальних ремонтних мас були введені основні визначальні параметри: (Q), як відношення мас підварки, що лишилась до сирої наважки, яка подається в піч, з поправкою на в. п. п. (втрати маси при прожарюванні) випробуваного складу; (Б) механічна міцність на стиск спеченого конгломерату зразка. «Аргументами» даного дослідження виступали: вміст основного оксиду MgO (%), вміст вільного С (%), вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%). Основними сировинними компонентами було взято брукт периклазовий (0-8 мм), периклазовуглецевий(0-8 мм), периклазо-хромітовий (0-8 мм) і графітовий.

У результаті досліджень і аналізу даних найбільш високий показник відношення (Q) що відповідає наступному складу мас:

- вміст основного оксиду MgO (%) – 76-80%;
- вміст вільного С (%) – 10-12%;
- вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 10-11%.

При цьому (Б) механічна міцність на стиск спеченого конгломерату зразків коливається в межах 34-37 МПа, що відповідає найкращим імпортним аналогам.

На підставі отриманих експериментальних даних розроблена оригінальна саморозтічна, магнезіальна, підварювальна маса марки «GIR-RB-X», яка не поступається за експлуатаційними властивостями кращим зарубіжним аналогам. Основні фізико-хімічні показники розробленої маси представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Найменування показника	Норма для марки
	GIR-RB-X
1. Масова частка загальної вологи W, % не більше	5
2. Гранулометричний склад, мм у межах	0-8
3. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	75
4. Масова частка вуглецю C, % не менше	10-12
5. Межа міцності при стисненні (після спікання 1600 ° C), МПа не менше	35

Розроблена саморозтічна, магнезіальна, підварювальна маса марки «GIR-RB-X» пройшла позитивні випробування дослідних партій в умовах конвертерних цехів підприємств України і була взята в промислове виробництво на активах компанії «GIR» з використанням недефіцитних вітчизняних вторинних матеріалів.

Четвертий розділ присвячено розробці виробництва вітчизняних магнезіальних модифікаторів і ремонтних мас, відпрацюванню технологій їх виробництва і промислового використання в умовах конвертерних цехів.

На першому етапі досліджень виробництво промислової партії обсягом 1500 т розроблених у роботі магнезіальних модифікаторів здійснювалось в КНР і Словаччині на підприємствах китайської компанії «Puyang Refractories Group Co., Ltd» за розробленою в роботі рецептурою та технологією. Випробування дослідно-промислової партії магнезіальних модифікаторів марок «PN-FL-60» і «PN-FL-65» і вдосконалення технології роздування шлаку азотом проведено в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь».

У всій серії промислових випробувань число сопел у наконечнику фурми, використовуваної для роздування кінцевого шлаку, визначало висоту мінімального розташування фурми над рівнем ванни, витрату і тиск азоту в магістралі. При цьому висота положення фурми коливалась у межах 1100 - 1200 мм над рівнем шлакової ванни, а тиск азоту становив 13-14 кгс/см² з витратою 1100-1200 м³/хв.

З використанням магнезіального модифікатора марки «PN-FL-65» відстежено 80 плавок із середньою витратою 1,2 т/плавка. При цьому середня стійкість гарнісажного покриття за відстежений період склала близько 1 плавки. У ряді випадків гарнісаж частково «змивався» до кінця плавки, а іноді вже в першій її половині. Така стійкість гарнісажного шару, мабуть, пояснюється високою міцністю брикетів (до 28 МПа), обумовленою тривалістю транспортування брикетів. У свою чергу висока міцність матеріалу збільшує час асиміляції, а відповідно неповне розчинення порції флюсу за відведений на роздування час (середнє $\tau_{розд.} = 3,15$ хв). Це підтверджено хімічним і мінералогічним аналізом відібраних у ході випробувань проб гарнісажного шару.

У результаті промислових випробувань розроблених модифікаторів і оптимізації витрат їх присадок під час реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь», загальна, сумарна витрата магнієвмістних матеріалів на плавку (до кінця кампанії футерівки 2936 плавок) була знижена на 20% у порівнянні з її початком, що відповідає зниженню питомих витрат на виробництво сталі на 0,87 USD/т (у цінах 2012р.). Найбільша ефективність процесу роздування шлаку, при інших рівних умовах була досягнута з використання флюсу марки «PN-FL-65» на основі словацьких магнезитів.

На базі української вторинної сировини і виробничих потужностей компанії «GIR» були відібрані три марки флюсів «БК-4», «БДМ» і «P70».

Спільно компанією «GIR», ПрАТ «Брикет» і ДВНЗ «ДонНТУ» розроблені і затверджені зміни №10 в ТУ У 37.1-001 76526-001: 2006, що уніфікують маркування і основні фізико-хімічні параметри флюсів марок БК-4, БДМ і P70, під альтернативним маркуванням: «БК-4», «БК-8» і «БК-9», що представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Найменування показника	Норма для марки		
	БК-4	БК-8	БК-9
1. Масова частка загальної вологи W, % не менше	5	5	5
2. Механічна міцність на скидання, % не менше	90	90	90
3. Масова частка шматків розміром менше 10 мм на партію, % не більше	10	10	10
4. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	60	-	65
5. Масова частка суми оксидів (MgO + CaO), % не менше	-	72	-
6. Масова частка вуглецю C, % не менше	-	8	-

В якості основних джерел сировини для виробництва магнезіальних брикетів були обрані: лом вогнетривкий магнезійний, периклазовий, периклазовуглецевий кусковий, що утворюється при демонтажі футерівки плавильних і розливних агрегатів сталеплавильних цехів; магнезит сирий, кусковий 2-3 сорт турецького або словацького родовищ; а також порошки магнезитові спечені словацьких родовищ; відходи виробництва доломіту колишнього «Микитівського вогнетривкового комбінату» (смт. Гольмівський); відходи виробництва доломіту ПАТ «ДФКД» докучаєвського родовища, мелені марки «ПМ-1» підприємства ТОВ "М-ЦЕМ" (м. Макіївка); вугілля мелене шламове зі збагачувальних фабрик (вводиться в шихтування брикету).

За розробленою схемою проведена дослідна партія магнезіального модифікатора марки БК-4 в обсязі 60 т. Випробування дослідної партії проводились на ПАТ «Алчевський металургійний комбінат».

Присадка БК-4 в якості модифікатора на шлак який лишився забезпечувала підвищення вмісту MgO у середньому на 2,4% і зниження вмісту Fe_{заг.} на 2,5% за рахунок вуглецевої складової флюсу. Докладний мінералогічний аналіз

гарнісажу показав наявність нерозчинених тугоплавких «зерен» фракцією 1-4 мм у кількості 3-5%. Максимальна стійкість гарнісажного покриття на даному етапі досліджень склала 3 плавки.

Впровадження у виробничий процес ПАТ «АМК» розроблених міні-регламентів по присадці магnezіального модифікатора марки БК-4 з витратою до 700 кг/операція дозволило знизити питомі витрати додаткових матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (у цінах 2013). При цьому стійкість гарнісажного покриття становила – не менше 3 пл.

На підставі експериментальних результатів і підібраного промислового шихтування в період з 01.05 по 10.05.2018 р на виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» вироблена дослідна партія магnezіальної підварювальної маси марки «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 т. Основними компонентами при виробництві маси була вторинна сировина, тобто відходи металургійного (бій периклазової, периклазовуглецевої і периклазохромітової цегли) і вогнетривкого виробництва.

Проведено промислові випробування маси в умовах двох металургійних комбінатів у кількості 3 т кожної.

Так, протягом червня 2018 року в умовах ПАТ «ДМК» проведені випробування підварювальної маси марки «GIR-RB-X-DMK» у кількості 3 т на конвертері №1 і №2 місткістю 250 т.

На підставі випробувань отримані наступні результати:

– підварювальна маса марки «GIR-RB-X-DMK» при попаданні на футерівку конвертера займається, а після витримки спікається;

– стійкість підварювальної маси «GIR-RB-X-DMK» склала до 20 плавок, що відповідає стійкості базових постачальників;

– питома витрата підварювальної маси складає 0,089 кг/т, при нормативному – 0,092 кг/т, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,01 USD/т;

– маса марки «GIR-RB-X-DMK» рекомендована до використання в умовах ПАТ «ДМК».

Протягом грудня 2018 року в умовах конвертерного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь»» проведено випробування підварювальної маси марки «GIR-RB-X» у кількості 3 т на конвертері №1 і №2 місткістю 350 т.

На підставі випробувань отримані наступні результати:

– задовільна адгезія матеріалу до робочої футерівки, відзначена рівномірність утворення підварювального конгломерату;

– стійкість підварювального шару, виконаного з використанням маси марки «GIR-RB-X» склала до 30 плавок, що відповідає стійкості базових постачальників.

Станом на 2-ий квартал 2019 р розроблена магnezіальна підварювальна маса марок «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» пройшла всі необхідні апробації в умовах двох металургійних комбінатів, а компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» є базовим постачальником даного виду продукції на ПАТ «ДМК» (стійкість до 20 пл., поставлено 100 т) і ПрАТ «МК «Азовсталь»» (стійкість до 30 пл., поставлено 25 тн). Такі показники стійкості відповідають найкращим закордонним аналогам.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що найбільш ефективними і відносно маловитратними способами обслуговування футерівки конвертера є роздування кінцевого шлаку азотом модифікованого спеціальними флюсами та підварювання саморозтічними, магнезіальними ремонтними масами.

2. Для отримання додаткових відомостей щодо гідродинаміки рідкої ванни конвертера і характерних зон випереджаючого ерозійного зносу футерівки протягом кампанії розроблена фізична модель кисневого конвертера в масштабі 1:6. Відпрацьована в ході фізичного моделювання методика дозволила уточнити режими продування конвертерної ванни з метою визначення зон нерівномірного зносу робочого шару футерівки конвертера.

3. Розроблено математичну модель перемішування рідкої ванни конвертера з використанням прикладного пакету Ansys Int., що дозволяє оцінювати гідродинамічний стан розплаву в процесі продування і визначити зони футерівки, схильні до підвищеного ерозійному зносу.

4. Співвідносячи отримані дані в ході моделювання з виробничою практикою зношення вогнетривкої футерівки більшості конвертерів, як з верхнім, так і з комбінованим продуванням, визначено теоретичні передумови випереджуючого зношування футерівки нижнього конуса конвертера, т. зв. «грибоподібний знос». Такий знос, в першу чергу, пояснюється тороїдоподібним напрямком руху потоків у рідкій ванні, і тим сильніше, чим менше «організований», з точки зору симетрії, такий рух.

5. Розроблено фізичну модель 160 т конвертера в масштабі 1:20 і методика для якісної оцінки механізму нанесення гарнісажного покриття на футерівку агрегату. Розроблена фізична модель та методика набризкування гарнісажного шару дозволяє оптимізувати технологічні параметри роздування, такі як витрата дуття, положення верхньої фурми і т. ін.

6. Показана можливість рівномірного відновлення випереджаючого «грибовидного зносу» футерівки, викликаного особливостями гідродинаміки рідкої ванни, за допомогою оптимізації дуттєвих параметрів і фізичних властивостей шлаку, що роздувається. Встановлено, що при постійній витраті азоту і його тиску в магістралі ($Q_{\Gamma} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{\Gamma} = 16 \text{ аті}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми.

7. Розроблена комплексна методика оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку після його модифікації на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочування) і температурний інтервал плавлення (тугоплавкість) гарнісажу.

8. Встановлено, що наявність у магнезіальному брикеті важкорозчинних компонентів, в кількості щонайменше 0,60-0,65% (мас.), 80% яких мають фракцію 2-6 мм, забезпечує необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, узятий в кількості 0,4- 0,45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7- 8%, вже в перші секунди роздування.

9. Показано, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази в шлаку, його в'язкість зростає, а при досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» для виконання операції набризкування в'язкість. Тоді як, зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

10. Розроблена комплексна методика оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей магнезійної, саморозтічної, підварювальної маси для гарячого ремонту футерівки конвертера. Методика дозволяє розробляти й оцінювати якість ремонтного матеріалу для будь-яких конвертерних агрегатів і умов експлуатації. Це досягається за рахунок її універсальності:

- футерівка печі виконується з конвертерної цегли;
- шлакометалева емульсія відбирається у цеху в необхідній кількості.

11. Для визначення експлуатаційних властивостей підварювальної маси введено параметр (Q), як відношення мас «відпрацьованої» підварки до сирової наважки, що подається в піч, з поправкою на в. п. п. (втрати маси при прожарюванні) досліджуваного складу.

12. В результаті досліджень залежності співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%), вміст вільного C (%) і вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) встановлено, що залежності мають екстремальний характер, тобто на графіках присутні області «перегинів» характерні для максимальних значень параметра (Q).

13. Встановлено, що найбільш високий показник співвідношення (Q), а відповідно найбільша стійкість підварювальної маси відповідає наступному складу:

- вміст основного оксиду MgO (%) – 76-80%;
- вміст вільного C (%) – 10-12%;
- вміст комплексної добавки - зв'язуючого S (%) – 10-11%.

14. В умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» відпрацьована технологія роздування шлаку азотом з використанням спеціальних модифікаторів кінцевого конвертерного шлаку розроблених авторами, виготовлених у КНР і Словаччині на активах компанії «Puyang Refractories Group Co., Ltd» у кількості 1500 т.

15. Показана можливість чіткого регламентування обсягу та режиму присадок модифікатора під час продування і на кінцевий шлак з метою стабілізації процесу формування гарнісажу і зниження питомої витрати матеріалів.

16. В результаті промислових випробувань модифікаторів, оптимізації витрат їх присадок у ході реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь», загальна, сумарна витрата магнезійних матеріалів на плавку була зменшена на 20% за кампанію, що відповідає зниженню питомих витрат на виробництво сталі на 0,87 USD/т (у цінах 2012 року).

17. Вироблено дослідно-промислово партію магнезійного модифікатора БК-4 на базі вітчизняної сировини (в т.ч. вторинних матеріалів). Виробництво здійснено на потужностях компаній «GIR» (ПрАТ «КрОЗ») і ПрАТ

«Брикет». Випробування дослідно-промислової партії в обсязі 60 т проводилися в умовах ПАТ «Алчевський металургійний комбінат». Максимальна стійкість гарнісажного покриття склала 3 плавки.

18. В результаті аналізу сканограмм залишкових товщин при використанні дослідної партії модифікатора марки БК-4, зафіксовано збільшення шару гарнісажного покриття по всій внутрішній поверхні футерівки конвертера в середньому на 10 мм. Збільшення товщини гарнісажу в найбільш проблемних зонах «цапфових кишень» склало в середньому 27 мм. При цьому в гарнісажному покритті зафіксовано наявність нерозчинених тугоплавких зерен фракцією 1-3 мм у кількості 3-5%.

19. Впровадження у виробничий процес ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» розроблених міні-регламентів по присадці магnezіального модифікатора марки БК-4 з витратою до 700 кг/операція дозволило знизити питомі витрати додаткових матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (в цінах 2013).

20. На виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» виготовлені дослідні партії магnezіальної підварювальної маси марки «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 тн. Основними компонентами при виробництві маси була вторинна сировина, тобто відходи металургійного (бій периклазової, периклазовуглецевої і периклазохромітової цегли) і вогнетривкого виробництва.

21. Станом на 2-ий квартал 2019 р. розроблена магnezіальна підварювальна маса марок «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» пройшла всі необхідні апробації в умовах двох металургійних комбінатів, а компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» є базовим постачальником даного виду продукції на ПАТ «ДМК» (стійкість до 20 пл.) і ПрАТ «МК «Азовсталь» (стійкість до 30 пл.). Такі показники стійкості відповідають найкращим закордонним аналогам.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНО В НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ

Статті, включені у міжнародні наукометричні бази:

1. Smirnov A. N. Physical simulation of metal mixing in a converter with hybrid injection / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, E. N. Lebedev // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40 (9). – P.796-799. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091210090032>
2. Smirnov A. N. Coating application on the working layer of the converter lining / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, A. Yu. Lizun // Steel in Translation. – 2012. – Vol.42 (11). – P.771-775. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091212110113>
3. Smirnov A. N. Formation of a slag coating on the converter lining / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, A. A. Serdyukov, A. F. Tonkushin // Steel in Translation. 2014. – Vol. 44 (8). – 602-606. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091214080117>

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Смирнов А. Н. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в конвертере с комбинированной продувкой / Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., **Шарандин К.Н.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010.– №7. - С. 44-46. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000358135>

5. Лебедев Е.Н. Физическое моделирование струй газа кислородной фурмы / Лебедев Е.Н., **Шарандин К.Н.**, Лизун А.Ю., Ухин В.Е. // *Сб. научных трудов Донецкого Национального Технического Университета, Серия металлургия.* – 2011 – Выпуск 13 (194). – С.61-65. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000368669>

6. **Шарандин К.Н.** Исследование влияния конечного конвертерного шлака на эффективность технологии нанесения гарнисажа // Шарандин К.Н., Тонкушин А.Ф., Сердюков А.А. // *Металл и литье Украины.* - 2012. - №10. – С.15-18. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000377246>

7. **Шарандин К.Н.** Технология раздувки конечного шлака азотом в большегрузных конвертерах с использованием магнезиального модификатора // *Металл и литье Украины.* - 2018. - № 5-6. – С.19-26. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2018_5-6_5

8. Немсадзе Г.Г. Совершенствование технологии горячего ремонта футеровки конвертера с использованием разработанной магнезиальной массы марки «GIR-RB-X» / Немсадзе Г.Г., Смирнов А.Н., Джоджуа Р.А., **Шарандин К.Н.**, Рябый Д.В. // *Металл и литье Украины.* 2019. - № 5-6 - С.56-63 <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/166691>

Монографія:

9. Немсадзе Г.Г. Повышение стойкости футеровки кислородных конвертеров / Немсадзе Г. Г., **Шарандин К.Н.** // *Донецк: GIR-INTERNATIONAL – Норд Пресс.* - 2014. – 135 с. ISBN 978-617-579-926-0

Патенти на винахід:

10. Патент на винахід №99248. Спосіб підготовки шлаку для нанесення гарнісажного покриття на футерівку / Смирнов А.Н., Тонкушин А.Ф., Сердюков А.А., **Шарандин К.Н.** – МПК. Опубл. 25.07.2012. - Бюл. №14. <https://uapatents.com/5-99248-sposib-pidgotovki-shlaku-dlya-nanesennya-garnisazhnogo-pokrittya-na-futerivku-konvertera.html>

11. Патент на винахід №99698. Шлакоутворюючий брикет для металургійного виробництва / Смирнов А.Н., Тонкушин А.Ф., Сердюков А.А., **Шарандин К.Н.** – МПК. Опубл. 10.09.2012. - Бюл. №17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1277984/>

Матеріали міжнародних наукових конференцій:

12. Smirnov O. Evolution conditions of final BOF slag on the efficiency of slag splashing technology / Smirnov O., Tonkushin A., **Sharandin K.** // *Proceedings of 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012.* 1-3 October 2012. Dresden. – Magdeburg: 2012. – CD-print. <http://www.ics2012.de/>

13. Serdyukov A. Modification of final BOF slag for the effective slag splashing technology / Serdyukov A., Tonkushin A., Smirnov A., **Sharandin K.** // *Proceedings of the Fifth Baosteel Biennial Academic Conference (Baosteel BAC 2013).* June 4-6, 2013,

Shanghai, China. – Shanghai:2013. - CD-print (B12).
https://www.baosteel.com/group_en/contents/2863/42144.html

14. Nemsadze G. Evolution conditions of end BOF slag on the effectively slag splashing technology / Nemsadze G., Smirnov O., **Sharandin K.** // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 26-27, 2018. – CD-print. <https://oscar-consulting.com/2018/07/31/61st-international-colloquium-on-refractories-2018-on-september-26th-and-27th/>

15. Nemsadze G. Converter layer hot repair process using the «GIR-RB-X» magnesium mass developed by the «GIR-ENGINEERING» LLC/ Nemsadze G., Smirnov O., Dzhodzhua R., **Sharandin K.** // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 25-26, 2019. – CD-print. <https://www.etn-athor.eu/2019/11/08/international-colloquium-on-refractories/>

16. Nemsadze G. Development of integrated methods for hot repair of converter lining based on Magnesian materials of “GIR-Refractories” / Nemsadze G., **Sharandin K.**, Smirnov O., Dzhodzhua R., Ryaby D., Goryuk M. // UNITECR 2023, Frankfurt, Germany, September 26-29, 2023. – CD-print. <https://unitecr2023.org/>

АНОТАЦІЯ

Шарандін К.М. Розробка і впровадження ресурсозберігаючої технології підвищення стійкості футерівки конвертера з використанням магнезійних матеріалів на основі вітчизняної сировини

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». Інститут промислових та бізнес технологій українського державного університету науки і технологій, Дніпро, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вивченню і розвитку наукових уявлень про особливості ведення конвертерної плавки за умови періодичного нанесення гарнісажу на робочий шар футерівки, динаміки формування робочого шлаку на основі магнезитових відходів, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними магнезійними масами.

Робота є комплексним дослідженням, що ґрунтується на використанні розроблених унікальних методів фізичного моделювання та сучасних методик математичного моделювання. Адекватність створених моделей підтверджується співвідношенням результатів математичного, фізичного моделювання та теоретичних досліджень з промисловими експериментами нанесення гарнісажу і підварювання місць локального зносу футерівки конвертера.

Встановлено, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази у шлаку його в'язкість зростає. При досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для виконання операції набризкування. А зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

Вперше сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють забезпечити цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку. Наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.), з яких щонайменше 80%, мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкокорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7-8%, вже в перші секунди процесу роздування.

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору флюсів для формування гарнісажу для нанесення на робочу поверхню футерівки конвертера і параметрів нанесення гарнісажу, а також вибору компонентів флюсу, в тому числі з відходів магнезійних виробів.

Застосування розроблених флюсів дозволяє підвищити стійкість футерівки конвертера, мінімізувати питомі витрати імпортованих вогнетривів на основі магнезиту, а також підвищити продуктивність конвертера.

Розроблені технологічні рекомендації забезпечують підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера і, відповідно, зменшують питому витрату вогнетривів у середньому на 1,2 - 3,5 кг/т сталі.

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору магнезійних, саморозтічних, підварювальних мас для гарячого ремонту зон випереджаючого (локального) зносу футерівки конвертера.

Застосування розроблених вітчизняних саморозтічних мас дозволяє практично повністю мінімізувати залежність підприємств від імпортованих аналогів, підвищити стійкість футерівки агрегатів і їх продуктивність, а також знизити питомі витрати вогнетривів на 0,003 - 0,01 кг/т сталі.

Ключові слова: конвертер, футерівка, випереджаючий знос, гарячий ремонт, набризкування шлаку, магнезійні флюси модифікатори, підварювання, саморозтічна маса, питомі витрати.

ANNOTATION

Sharandin K.M. Development and implementation of a resource-saving technology for increasing the stability of the converter lining using magnesium materials based on domestic raw materials

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D) by specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". Institute of industrial and business technologies Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, 2024.

The dissertation work is devoted to the study and development of scientific ideas about the features of BOF process under the condition of periodic application of slag splashing on the working layer of the lining, the dynamics of the formation of working

skull based on magnesite waste, as well as periodic hot repair with self-flowing magnesium masses.

The work is a complex study based on the use of developed unique methods of physical modeling and modern methods of mathematical modeling. The adequacy of the created models is confirmed by the correlation of the results of mathematical, physical modeling and theoretical studies with industrial experiments of applying slag splashing technology and hot repair the places of local wear of the converter lining.

It was established that with an increase in the amount of dispersed solid (insoluble) phase in the slag, its viscosity increases. When a concentration of 7-9% of the "grain" phase is reached, the slag has a "satisfactory" viscosity for the splashing operation. And with an increase in the number of "grains" up to 10% or more, a sharp increase in viscosity is observed due to intense heterogenization of the melt.

For the first time, a conceptual approach to the chemical and granulometric parameters of the modifiers was formulated, allowing to provide purposeful management of the physical and chemical properties of the final converter slag. The presence of poorly soluble components in the magnesium briquette in the amount of 60 - 65% (by weight), of which at least 80% have a fraction of 2-6 mm, provide the necessary volume of "grain" filler and the formation of the reinforcing "skeleton" in the cooled skull. At the same time, the easily soluble, finely dispersed, magnesium component, taken in the amount of 40-45% (by mass), saturates the slag with magnesium oxide to the level of 7-8%, already in the first seconds of the splashing process.

The recommendations proposed and implemented in the technological process regarding the selection of fluxes for the formation of skull for applying to the working surface of the converter lining and the parameters of applying the skull, as well as the selection of flux components, including from waste magnesium products, are of practical importance.

The use of the developed fluxes makes it possible to increase the stability of the converter lining, minimize the specific costs of imported refractories based on magnesite, and also increase the performance of the converter.

The developed technological recommendations provide an increase in the stability of the working layer of the converter lining and, accordingly, reduce the specific consumption of refractories by an average of 1.2 - 3.5 kg/t of steel.

The recommendations proposed and implemented in the technological process regarding the selection of magnesium, self-flowing hot repair masses for local wear of the converter lining are of practical importance.

The use of developed domestic self-spreading compounds allows almost completely minimizing the dependence of enterprises on imported analogues, increasing the stability of the lining of units and their productivity, as well as reducing the specific consumption of refractories by 0.003 - 0.01 kg/ton of steel.

Key words: BOF, refractory lining, local wear, hot repair, slag splashing, magnesium flux modifiers, self-flowing hot repair mass, specific costs.