

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

НЕДБАЙЛО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 669.184.125.046

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА РОЗРОБКА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ШЛАКОВОГО ГАРНІСАЖУ
НА ФУТЕРІВКУ КОНВЕРТЕРА**

Спеціальність 05.16.02 – Металургія чорних
і кольорових металів та спеціальних сплавів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро, 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпровському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Кам'янське

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сігарьов Євген Миколайович,
Дніпровський державний технічний університет,
завідувач кафедри металургії чорних металів
ім. професора В.І. Логінова, м. Кам'янське

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стовченко Ганна Петрівна,
провідний науковий співробітник
відділу фізико-металургійних проблем
електрошлакових технологій Інституту
електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, м. Київ

кандидат технічних наук
Молчанов Лавр Сергійович,
завідувач відділу фізико-технічних проблем
металургії сталі ІЧМ ім. З.І. Некрасова
України, м. Дніпро

Захист відбудеться « 02 » березня 2021 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4
e-mail: lydmila_kamkina@ukr.net

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2021 р.

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

Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зниження ресурсо- та енерговитрат при виплавці сталі в кисневих конвертерах залишається актуальним завданням металургійної галузі. Стійкість футерівки кисневих конвертерів є одним з факторів, що визначають продуктивність конвертерного цеху та собівартість металопродукції. Найбільш ресурсоефективною для подовження терміну служби футерівки на сьогодні визнано технологію формування шару захисного шлакового гарнісажу на поверхні вогнетривів конвертера шляхом роздування модифікованого кінцевого конвертерного шлаку газовими струменями. Теоретичне обґрунтування, результати промислового освоєння, напрямки удосконалення технології нанесення шлакового гарнісажу та конструкцій дуттьових пристроїв для роздування шлакової ванни розглядались в ряді досліджень проф. Смірнова О.М., Чернятевича А.Г., Величко О.Г., Бойченка Б.М., Стовпченко Г.П., Нізяєва К.Г.

Для стабілізації динаміки фаз та дуттьового режиму продувки ванни, підвищення стійкості футерівки по ходу кампанії необхідною умовою залишається забезпечення відносної симетричності профілю робочого простору конвертера. Подальший розвиток технології нанесення захисного шлакового гарнісажу на футерівку конвертера роздувкою азотом шлакової ванни може бути пов'язаний з організацією керованого нанесення потоку крапель шлаку на визначені зони вогнетривів з формуванням раціонального профілю робочого простору агрегату. Досягнутий на сьогодні рівень знань щодо перебігу процесів та особливостей впливу на відхідний газошлаковий потік, що формується при роздуванні шлаку, умови адгезії та формування гарнісажного шару на футерівці конвертера недостатній для подальшого удосконалення способів модифікування та роздування шлакової ванни. У представленій роботі основну увагу приділено дослідженню та визначенню режимів взаємодії над- та дозвукових газових струменів зі шлакової ванною та газошлаковим потоком, ступеню впливу складу шлаку на адгезію до вогнетриву, розробкам моделей, що враховують комплексний вплив теплофізичних параметрів футерівки конвертера й фізико-хімічного стану шлаку, газогідродинаміки роздування ванни, удосконаленню способів модифікування шлаку та конструкцій гарнісажних фурм.

Тема дисертаційної роботи, спрямованої на подальший розвиток наукових уявлень щодо закономірностей роздування шлакової ванни та формування гарнісажного шару, розробку ресурсозберігаючої технології та удосконалення конструкцій дуттьових пристроїв для нанесення захисного гарнісажного покриття на футерівку конвертера, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розглянуті в дисертаційній роботі питання і задачі складають результати досліджень, що виконані при безпосередній участі автора в ході науково-дослідних робіт «Розробка нової ресурсо- та енергоефективної технології продувки конвертерної ванни і ошлакування футерівки агрегату в сировинних умовах України» (№ ДР 0112U000342), «Дослідження та вдосконалення процесів конвертерного виробництва сталі в умовах дефіциту металобрухту і підвищених вимог до якості металопродукції» (№ держ. реєстрації 0116U005922), «Удосконалення технології

продувки ванни 250-т конвертерів ПАТ «Дніпровський меткомбінат» з використанням модернізованих наконечників кисневих фурм» (дог. №19-0282-02). Дисертаційна робота виконана у відповідності до напрямків наукових досліджень кафедри металургії чорних металів ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теоретичних основ та розробка ресурсозберігаючого способу нанесення шлакового гарнісажу на футерівку кисневого конвертера на основі досліджень гідрогазодинаміки роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням, особливостей та умов адгезії модифікованого добавками шлаку до вогнетриву, умов забезпечення відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачалося вирішення наступних задач:

- виконати критичний аналіз сучасних методів модифікування кінцевого конвертерного шлаку та конструкцій дуттьових пристроїв для його роздування на футерівку, визначити напрямки їх удосконалення;
- визначити особливості гідродинаміки рідкої ванни при її роздуванні газовими струменями у конвертері з комбінованим продуванням;
- обґрунтувати і експериментально підтвердити можливість перенаправлення частини відхідного газошлакового потоку на визначені зони на стінах конвертера з формуванням шару гарнісажу заданої товщини;
- теоретично обґрунтувати та дослідити вплив модифікаторів та фізико-хімічного стану конвертерного шлаку на його адгезійну здатність до периклазовуглецевого вогнетриву у нестационарних теплових умовах;
- розробити методики розрахунку параметрів роздування шлакової ванни та конструкції багатоярусної фурми, пристосованої для коригування робочого профілю конвертера шляхом нанесення на футерівку гарнісажу заданої товщини;
- виконати дослідно-промислове випробування конструкції багатоярусної гарнісажної фурми та розробити технологію нанесення шару шлакового гарнісажу підвищеної стійкості на футерівку конвертера з її використанням.

Об'єкт дослідження. Процеси формування відхідного газошлакового потоку та утворення шару гарнісажного покриття на футерівці кисневого конвертера при роздуванні шлакової ванни газовими струменями.

Предмет дослідження. Гідрогазодинамічні та тепломасообмінні закономірності процесів роздування шлакової ванни із формуванням шару шлакового гарнісажу на футерівці, способи коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни та напрямку руху відхідних газошлакових потоків, умови адгезії та формування гарнісажного покриття заданої товщини у визначених зонах на робочій поверхні вогнетривів конвертера.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувалися теоретичні та експериментальні методи дослідження, які базуються на фундаментальних положеннях фізичної хімії, теорії металургійних процесів й тепло- та масообміну. Використовувалися сучасні розрахункові методи, методики та установки «холодного» і високотемпературного моделювання процесів роздування рідкої

ванни та взаємодії шлакових розплавів з вогнетривами. Для оцінки результатів експериментів застосовували методики рентгеноспектрального та кількісного хімічного аналізу, фото- та відеофіксацію перебігу процесів. Усі експериментальні дослідження виконані з використанням повірених та сертифікованих, відповідно до діючої нормативно-правової бази, обладнання та устаткування.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень отримано нові відомості про закономірності взаємодій при роздуванні шлакової ванни газовими струменями у конвертері із комбінованим продуванням. Згідно з запропонованою класифікацією режимів роздування ванни із нанесенням шлаку на футерівку, можна виділити режими: «намивання» шлаку при утворенні неглибоких кратерів й відношенні висоти наконечника фурми до діаметра кола розміщення донних вставок менш ніж 0,28, «розведення» реакційних зон при відношенні від 0,28 до 0,44 та «пробою» ванни при відношенні більш ніж 0,44 відповідно. Вперше встановлений ступінь впливу донних струменів на обсяг й напрямки винесення шлакових крапель та умови попередження «запечаткування» донних вставок.

2. Уперше встановлений прямими вимірюваннями та підтверджений розрахунками фактичний розподіл гарнісажного шару на футерівці конвертера. Це дозволило обґрунтувати спосіб коригування профілю робочого простору агрегату з використанням двоярусної фурми. Визначений ступінь впливу бокових газових струменів верхнього ярусу на потік шлакових крапель та умови перенаправлення останніх у визначені зони на стінах конвертера. Раціональне співвідношення між кутом нахилу сопел верхнього ярусу та сопел Лавалля фурми для забезпечення максимальної густини шару гарнісажу на футерівці знаходиться у діапазоні 3,8-4,1.

3. Отримали подальший розвиток наукові уявлення щодо фізико-хімічної схеми утворення гарнісажного шару на поверхні вогнетриву при роздуванні модифікованого конвертерного шлаку. На основі термодинамічного аналізу реакцій між оксидами заліза шлаку та вуглецю вогнетриву підтверджено блокуючу дію монооксиду вуглецю для фільтрації модифікованого шлаку у пори вогнетривів. Вперше визначений комплексний вплив газогідродинаміки роздування шлакової ванни, товщини й температури футерівки на умови утримання гарнісажного шару.

4. Науково обґрунтований спосіб управління внутрішнім тертям у нанесеному на футерівку шлаковому шарі за рахунок внесення у об'єм роздуваної шлакової ванни тугоплавких часток. Вперше на основі експериментальних досліджень та чисельних розрахунків встановлені залежності між хімічним складом шлаку, кількістю й діаметром тугоплавких часток, крайовим кутом змочування шлаком вогнетриву та роботою адгезії. Внесення тугоплавких часток у кількості 6-8 % від маси шлаку змінює роботу адгезії до вогнетриву на 0,2...0,8 Н/м², у залежності від співвідношення вмісту (CaO) та (MgO). Раціональним визнано розосереджене у часі внесення до шлаку тугоплавких часток діаметром 1-3 мм.

5. Розроблено методику визначення необхідної тривалості роздування шлакової ванни та висоти розташування двоярусної фурми по ходу операції. Вперше встановлено, що при роздуванні шлаку у 250-т конвертері з застосуванням наконечника фурми з соплами Лавалля (з кутом нахилу 17⁰) та розташованими на відстані у 2,5 м соплами верхнього блоку (з кутом нахилу 115⁰), висота нанесеної

шлакової «плями» не залежить від розташування фурми, та складає 3,27 м. Це визначає умови коригування профілю робочого простору конвертера шляхом зміни напрямку витоку бокових струменів та переміщенням фурми по висоті (H_{Φ}) за заданим алгоритмом. За результатами чисельного моделювання визначено, що площа перекриття боковими струменями робочої поверхні конвертера складає від 29,5 до 46,9 % і для умов 250-т конвертера значення H_{Φ} повинні бути у діапазоні 1,50-1,65 м у перший та 0,40-0,55 м у основний період роздування шлакової ванни.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені експериментальні установки й авторські методики моделювання процесів роздування шлаку на стіни конвертера з комбінованим продуванням ванни та для дослідження умов ошлакування гетерогенним модифікованим конвертерним шлаком поверхні периклазовуглецевих вогнетривів.

2. Запропоновані математичні моделі та методики розрахунку, придатні для моделювання газогідродинаміки роздування шлакової ванни, визначення товщини нанесеного гарнісажного шару при перемінному по ходу операції положенні фурми, визначення раціонального складу конвертерного шлаку з тугоплавкими частками, умов його розтікання по футерівці та утворення гарнісажного шару.

3. Розроблено методику проектування багатоярусної гарнісажної фурми. Впроваджена у промислову експлуатацію на 250-т конвертерах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» конструкція двоярусної гарнісажної фурми та технологія роздування шлаку з її використанням. Фурма містить 6-ти сопловий наконечник зі згрупованими по три у напрямках цапфених зон соплами Лавалє двох різних діаметрів та розміщений на відстані 2,5 м від торця наконечника верхній ярус з 4-х циліндричних сопел, призначених для перенаправлення частини відхідного газошлакового потоку й коригування профілю робочого простору конвертера шляхом утворення гарнісажного шару заданої товщини на визначених секторах стін агрегату.

4. Запропонована конструкція багатоярусної фурми із можливістю зміни відстані між ярусами по ходу кампанії конвертера по футерівці. Розроблений спосіб коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни по ходу її роздування на футерівку конвертера шляхом подачі у потоках донного дуття порошкоподібних магнезіальних матеріалів. Новизна і промислова корисність технічних рішень підтверджуються отриманими патентами України «Гарнісажна фурма із змінним розташуванням ярусів» № 130174 (опубл. 26.11.2018, бюл. №22), «Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття» №129813 (опубл. 12.11.2018, бюл. №21).

5. При впровадженні розробок в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» досягнуто ефекту з підвищенням продуктивності 250-т конвертерів внаслідок зменшення простоїв на гарячий ремонт футерівки на 1,35%; підвищення стійкості на 9,5%; зменшення витрат вогнетривких матеріалів на ремонт футерівки на 6,01%. Отриманий економічний ефект склав 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі за 2016 рік).

6. Розроблені у дисертаційній роботі методики використовуються на кафедрі металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету в навчальному процесі при читанні дисциплін «Технології ресурсозбереження в

металургії», «Техніка високотемпературного експерименту», а також при виконанні здобувачами вищої освіти випускних кваліфікаційних робіт.

Особистий внесок здобувача. Наведені в дисертації теоретичне обґрунтування, обробка, узагальнення та аналіз отриманих експериментальних даних виконані автором самостійно. Результати досліджень опубліковано у співавторстві зі співробітниками кафедри металургії чорних металів ДДТУ та технічними спеціалістами конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат». В опублікованих спільно зі співавторами працях автором особисто виконано: [1, 4, 6, 17, 21] – підготовку планів повних факторних експериментів, аналіз і обробку отриманих результатів; [3, 7, 9, 16, 18, 19, 22] – термодинамічне та чисельне моделювання процесів роздування шлакової ванни та взаємодії шлаку з вогнетривом; [9, 11-13] – аналіз і обробка результатів високотемпературних експериментів, розробку моделей; [2, 5, 8, 10, 12, 20] – проведення промислових випробувань на базі ПАТ «Дніпровський меткомбінат», аналіз та обробку результатів, розробку технологічних рекомендацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації докладались та обговорені на наукових семінарах кафедри металургії чорних металів ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету; міжнародних науково-технічних конференціях, у тому числі: *проведених в Україні* - Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2014 р., 2015 р., 2017 р.); "Университетская наука" (м. Мариуполь, 2014 р., 2015 р., 2017 р., 2018 р.); «Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво». (м. Дніпропетровськ, 2015 р.); «Литво. Металургія.» (м. Запоріжжя, 2017 р., 2018 р., 2019 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях студентів і молодих учених «Молода академія» (м. Дніпропетровськ, 2015 р., 2016 р.), «Наука і металургія» (м. Дніпро, 2017 р., 2018 р.); *проведених у країнах Європейського союзу* - «International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», (Varna, Bulgaria, 2015 р., 2017 р.); «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід», (Дніпро-Відень, 2017 р.); «Science, Research, Development» №34, (Париж, 2020 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 22 роботи, з них 10 - статей у фахових наукових виданнях, що входять до переліку затверджених ДАК України, у тому числі 3 – у виданнях, що включені до науково-метричних баз, 3 – у спеціалізованих періодичних виданнях, 2 – патенти України, 7 – матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, основної частини з п'яти розділів та висновків, списку використаних джерел і додатків. Текст дисертації викладено на 172 сторінках основного тексту, зокрема 16 таблиць і 65 рисунків та 4 додатки на 9 сторінках. Перелік посилань на 11 сторінках містить 121 літературне джерело. Загальний обсяг складає 192 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, вказані мета і завдання дослідження, сформульована наукова новизна отриманих результатів та їх

практичне значення, відзначено особистий внесок автора, викладені результати апробації розробок, наведена структура і обсяг роботи.

У першому розділі «*Преваги та недоліки сучасних технологій відновлення профілю робочого простору кисневого конвертера по ходу кампанії*» наведені дані щодо сучасного стану технологій гарячого ремонту периклазовуглецевої футерівки конвертера. Проведений критичний аналіз переваг та недоліків сучасних способів торкретування, підварювання та роздування підготовленого кінцевого конвертерного шлаку на футерівку з метою формування захисного шлакового гарнісажу. Теоретично обґрунтовано, що техніко-економічні та енергетичні переваги має роздування азотними струменями з використанням спеціалізованих гарнісажних фурм.

Значний внесок у розвиток теорії та наукових уявлень щодо термодинамічних, кінетичних закономірностей та механізму взаємодії конвертерного шлаку різних періодів плавки з периклазовуглецевими вогнетривами, механізму формування шлакового гарнісажного покриття на футерівці конвертера зробили вітчизняні та закордонні вчені проф. Чернятевич А.Г., Бойченко Б.М., Смірнов О.М., Охотський В.Б., Стопченко Г.П., Суворов С.А., Mills K., Messina C.J. та ін.

В той же час, дані щодо закономірностей формування кінцевого конвертерного шлаку з підвищеною адгезійною здатністю та міцністю, взаємодії шлаку з периклазовуглецевим вогнетривом у нестационарних теплових умовах, формування гарнісажного шару з гетерогенного шлаку, нанесеного на футерівку верхнім або комбінованим роздуванням шлакової ванни, механізму та особливостей перенаправлення крапель шлаку у визначені зони відсутні.

До основних завдань дослідження віднесені: розробка установок та методик проведення експериментів для вивчення газогідродинамічних особливостей комбінованого роздування шлакової ванни; обґрунтування нових способів коригування поточного фізико-хімічного стану шлаку для підвищення його адгезійної здатності до вогнетривів; розробка методики розрахунку параметрів роздування шлаку із застосуванням багатоярусної фурми для формування гарнісажного шару заданої товщини у визначених зонах на футерівці.

У другому розділі «*Установки та методики досліджень*» представлені методики та устаткування для низькотемпературного моделювання гідрогазодинаміки роздування рідкої ванни у конвертері із комбінованим продуванням та високотемпературного моделювання взаємодії шлаку з вогнетривом.

Для дослідження гідрогазодинаміки роздування шлаку використана модель 250-т промислового конвертера ПАТ «ДМК» у масштабі 1:18 (рис. 1, а) з дотриманням критеріїв подібності $Fr=idem$, $Re=idem$, $Eu=idem$ та $Ho=idem$. У якості середовищ, що моделюють шлакову ванну та газоподібний азот, використовували відповідно розчин клейстера з перемінною в'язкістю та компресорне повітря. Для визначення закономірностей роздування рідкої ванни, з застосуванням багатоярусної фурми, використані модельні наконечники з 4...6 соплами Лавалю та верхній сопловий блок з 4-ма циліндричними соплами (рис. 1, б-г).

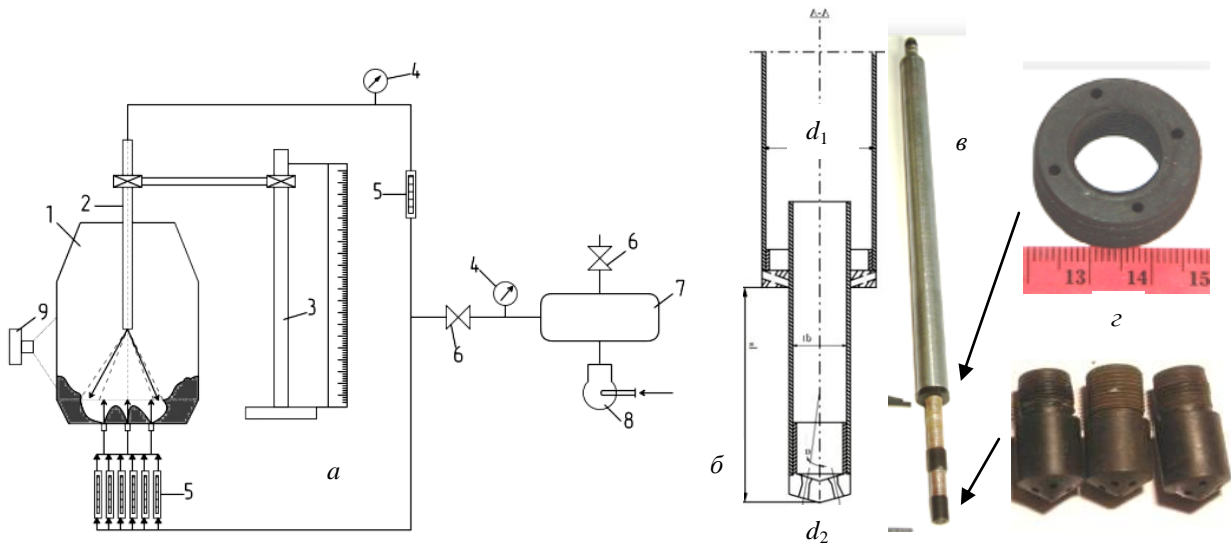


Рис. 1. Схеми моделі конвертера (а), конструкції (б) та вигляд (в) фурми, наконечників та верхнього соплового блоку (г) двоярусної лабораторної фурми, мм: $d_1=16,0$; $d_2=31,0$; $l_{\text{я}}=40-110$; 1 - конвертер; 2 - фурма; 3 - пристрій для переміщення фурми за висотою; 4 - манометр; 5 - ротаметр; 6 - регулюючі вентиля; 7 - ресивер; 8 - компресор; 9 - відеокамера

Для умов використання двоярусної фурми додатково введений критерій відносного імпульсу потоків дуття $I_{\text{д}}$ та симплекси, що враховують сумарний імпульс струменів другого ярусу $\sum i_{\text{д}}^{\text{г}}$ і геометричні параметри фурми – відстань між ярусам сопел ($l_{\text{я}}$, м) та діаметр вихідного перетину сопел верхнього соплового блоку ($d_{\text{д}}^{\text{в}}$, м):

$$I_{\text{д}} = \frac{\sum i_{\text{д}}^{\text{г}}}{\sum i_{\text{д}}^{\text{б}}}; \quad \frac{H_{\text{я}}}{d_{\text{д}}^{\text{б}}}; \quad \frac{d_{\text{д}}^{\text{г}}}{d_{\text{д}}^{\text{в}}} \quad (1)$$

Тут $\sum i_{\text{д}}^{\text{г}} = i_{\text{д}}^{\text{г}} \cdot \cos \beta \cdot n_{\text{д}}$, де $i_{\text{д}}^{\text{г}}$ – імпульс газового струменя з сопла другого ярусу, Н; $n_{\text{д}}$ і β – відповідно кількість сопел другого ярусу і кут їх нахилу до вертикалі, град.

Для діапазону витрат азоту на роздувку шлаку крізь сопла Лаваля 6-ти соплового наконечника промислової фурми (600...700 м³/хв.) модельні значення склали: $0,63 \cdot 10^{-3} \dots 0,81 \cdot 10^{-3}$ м³/с та $0,12 \cdot 10^{-3} \dots 0,16 \cdot 10^{-3}$ м³/с крізь сопла верхнього блоку відповідно. Витрата газу крізь 6-ть донних вставок, розташованих у моделі за колом діаметром $d_{\text{ф}}$ складала $0,067 \cdot 10^{-3} \dots 0,10 \cdot 10^{-3}$ м³/с на одну вставку (сопло).

На другому етапі експериментів, з метою визначення впливу глибини шлакової ванни (X_1), висоти розташування наконечника фурми над ванною (X_2) та відстані між наконечником та верхнім блоком сопел (X_3) на «зашлакованість» стовбура фурми ($A_{\text{Г}}$), товщину шару ($B_{\text{Г}}$) та ширину зони шлакового гарнісажу на стінах конвертера ($C_{\text{Г}}$) застосовано методику планування експерименту.

Високотемпературні дослідження закономірностей розтікання шлаку та характеру поверхневих явищ у системі «шлаковий розплав - вогнетрив» проводили з використанням комплексу на основі печі Таммана, оптичного пірметра ЕОП-66 та контрольно-вимірювальних приладів. Використані основні положення методики визначення поверхневого натягу методом «лежачої краплі». У якості параметру оптимізації прийняли величину крайового кута змочування θ , у якості факторів

впливу: X_1 – добавка CaO, % (від маси шлаку); X_2 – добавка MgO, %; X_3 – розмір внесених до складу шлаку тугоплавких часток, мм. Піч закривали з однієї сторони прозорим кварцовим склом та створювали нейтральну (азотну) атмосферу. Процес розтікання краплі шлаку по поверхні підложки фіксували цифровою камерою CASIO FX-25. Крайовий кут змочування визначали із точністю до $0,5^\circ$, а лінійні розміри краплі шлаку – до 0,1 мм з використанням диспетчера рисунків «Microsoft Office». Дослідження мікроструктури зон контакту шлакової краплі та вогнетриву проводили з застосуванням мікроскопу МИМ-8М та електронного растрового мікроскопу РЕМ-106И.

Промислові дослідження проведені на 250-т конвертерах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат». При проведенні досліджень проводили відбирання для наступного хімічного та мікроструктурного аналізу проб конвертерного шлаку та зразків вогнетриву з нанесеним гарнісажем. Для контролю зміни профілю робочого простору конвертера використовували інтерферометр LaCam M007 (фірми *Ferrotech Technologies GmbH*, Німеччина).

У третьому розділі «Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей нанесення гарнісажного покриття шляхом роздування рідкої ванни на робочу поверхню футерівки конвертера» наведені результати досліджень гідрогазодинаміки роздування рідкої ванни при її комбінованому продуванні газовими струменями. Встановлено, що у дослідженому діапазоні витрат газу, при висоті наконечника одноярусної фурми (h_ϕ) над ванною (15-45 кал.) і куті нахилу сопел Лаваля (α) до вертикалі (15-25 град), пробивання струменями газу рідкої ванни супроводжується утворенням «кратерів» та зворотніх газорідних потоків. Режими роздування розділили на три групи – «намивання» рідини на стіни, «розведення» реакційних зон («без пробою» ванни) (рис. 2, а) та «з пробоем» (рис. 2, б) ванни як верхніми, так і донними газовими струменями.

Встановлено, що у діапазоні h_ϕ/d_ϕ від 0,28 до 0,44 забезпечується зменшення «зашлаковування» стовбура фурми із одночасним збільшенням обсягу крапель рідини, що спрямовані на стіни конвертера. При $h_\phi=40$ кал. досягнуто пригнічення винесення крапель на стовбур фурми, але відсутнє щільне покриття рідиною конусної частини конвертера.

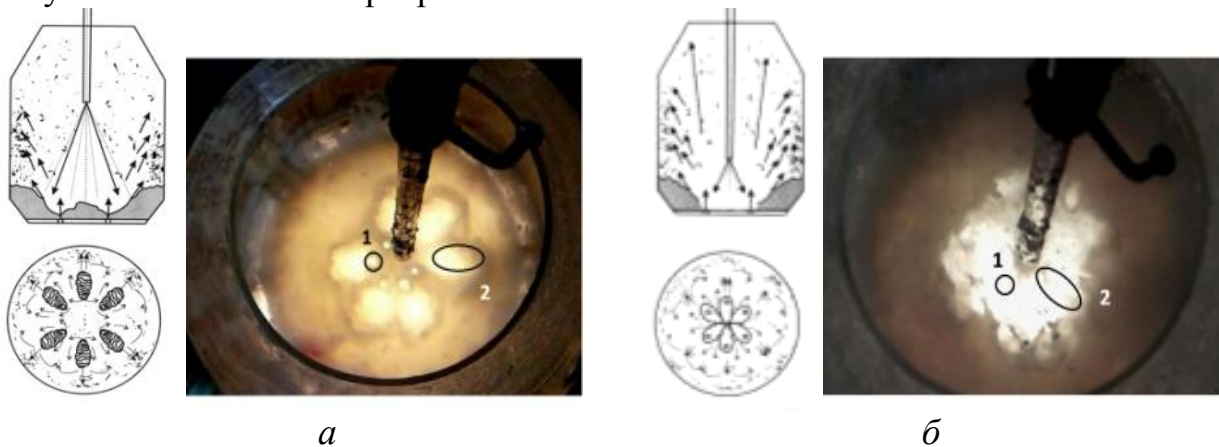


Рис. 2. Схеми винесення газорідних потоків та вигляд режимів роздування ванни «без пробою» (а) та «з пробоем» (б): 1- зона розташування донних сопел; 2 - реакційна зона взаємодії верхніх струменів з ванною; а) $Q_z=0,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=25$ кал; б) $Q_z=0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=15$ кал

При $h_{\phi}=15$ кал. (з утворенням об'єданої реакційної зони (рис. 2, б)), збільшуються обсяги направлено виносу крапель на стовбур фурми та верхні частини конвертера. У режимі «без пробою» (25 кал.) (рис. 2, а) забезпечується пригнічення винесення крапель потоком газу з донних сопел при рівномірному її розподілі по висоті конвертера та попередження запечатування сопел.

Встановлено, що потік газу з донних сопел збільшує розмір кратерів на 10-15% (у порівнянні з тільки верхнім роздуванням), висоту гребеню кратера та обсяги рідини, що викидається на стіни конвертера. Доведено, що раціональним варіантом промислового варіанту комбінованого роздування є режим «з пробоем» ванни. Згідно з розрахунками для умов 250-т конвертера КЦ ПАТ «ДМК» робочі висоти розташування наконечника 6-ти соплової гарнісажної фурми повинні складати 0,30...0,55 м у основний та 1,55...1,65 м у перший період роздувки ванни.

Показано, що при використанні одноярусних фурм нанесення рівномірного за товщиною шару гарнісажного покриття по всій висоті робочого простору не забезпечується. Теоретично обґрунтована необхідність переходу до використання двоярусної фурми, що здатна забезпечити кероване перенаправлення частини газорідного потоку у визначені зони на стінах конвертера за схемою, наведеною на рис. 3, а.

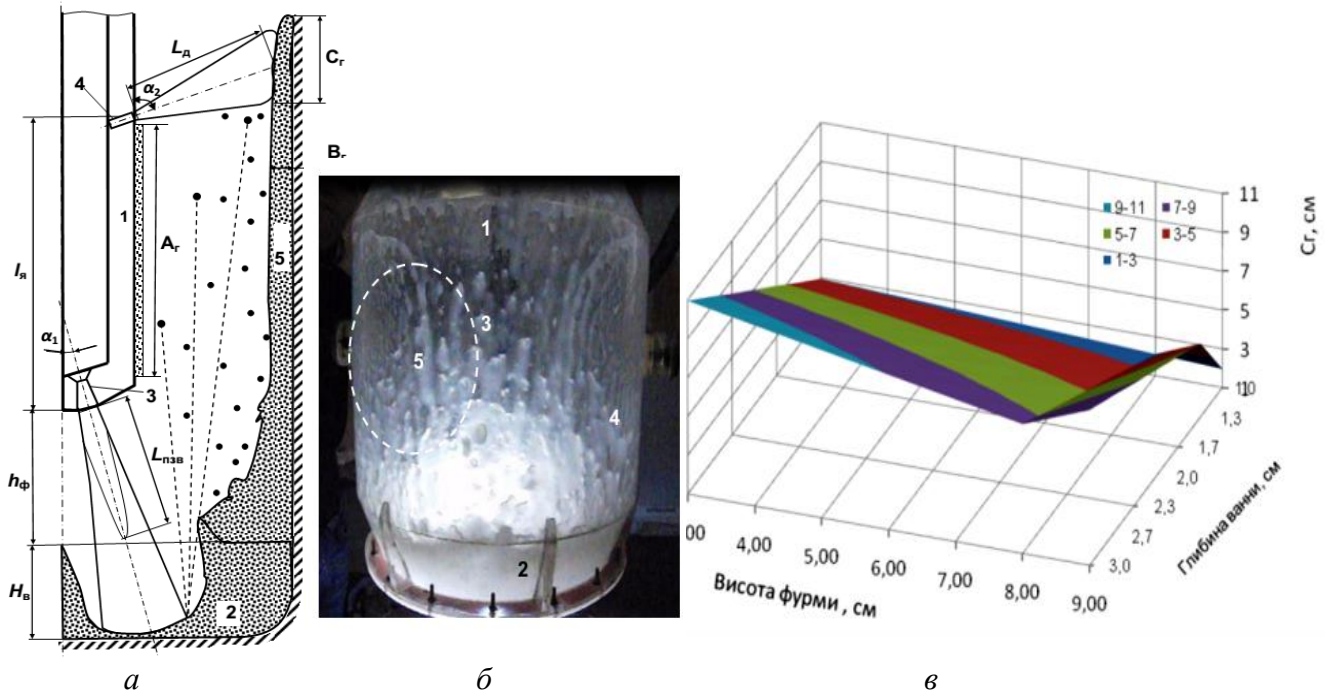


Рис. 3. Схема (а), вигляд (б) роздування ванни з використанням двоярусної фурми з перенаправленням частини газшлакового потоку на визначені сектори стін конвертера (6-ти сопловий наконечник) та поверхня відгуку (в), що відображає ширину зони гарнісажної «плями», сформованої під впливом тиску бокових струменів: 1 - фурма; 2 – рідка ванна; 3 – верхній ярус; 4 – сопла верхнього ярусу; 5 – гарнісажна «пляма»; $h_{\phi}/d_{\phi}=12$ кал., відстань між ярусами - 9,6 кал.

За результатами обробки експериментальних даних отримані відповідні математичні моделі, що придатні для визначення конструктивних параметрів промислової конструкції двоярусної гарнісажної фурми та режимів роздування ванни глибиною H_B , у натуральних значеннях:

$$A_r = 80,895 - 37,835 \cdot H_B - 14,579 \cdot h_{\phi} - 4,355 \cdot l_{я} + 8,622 \cdot H_B \cdot h_{\phi} + 3,015 \cdot H_B \cdot l_{я} + 1,326 \cdot H_B \cdot l_{я} - 0,7739 \cdot H_B \cdot h_{\phi} \cdot l_{я} \quad (2)$$

$$B_T = -0,642 + 0,43 \cdot H_B - 0,1476 \cdot h_{\phi} + 0,1507 \cdot l_{\text{я}} - 0,067 \cdot H_B \cdot l_{\text{я}} + 0,0166 \cdot h_{\phi} \cdot l_{\text{я}} \quad (3)$$

$$C_T = -2,5825 + 6,0825 \cdot H_B + 0,0825 \cdot h_{\phi} + 0,168 \cdot l_{\text{я}} - 0,2475 \cdot H_B \cdot h_{\phi} - 0,1675 \cdot H_B \cdot l_{\text{я}} \quad (4)$$

Встановлено, що мінімізація протяжності зони «зашлакованості» стобура фурми забезпечується при висоті розташування наконечника фурми над ванною у діапазоні 2,5...4,2 кал. та відстані між ярусами сопел ($l_{\text{я}}$) у 9,6 кал. Визначені характерні зони з «піковими» значеннями показників при глибині ванни у 1,33...2,0 см при 5 кал. висоті фурми та 9,6 кал. між ярусами, а також - 2,33...3,0 см при 7 кал. висоті та $l_{\text{я}} = 12$ кал. відповідно. При висоті наконечника у 5,8 кал. та глибині ванни 1,4...2,5 кал. для 9,6 кал. відстані між ярусами спостерігається стале збільшення величини C_T , а при зменшенні глибини шлакової ванни по ходу її роздування на стіни – значення C_T різко зменшується, що відповідає уявленням щодо ступеня впливу газових потоків з бокових сопел на газошлаковий потік.

Розроблено методику розрахунку впливу тиску бокових струменів на газошлаковий потік. Встановлено, що найбільш впливовими параметрами є площа (S_x) та діаметр (D_x) утвореного перетину бокових струменів з потоком. При довжині кола внутрішньої поверхні стін 250-т конвертера (L) площа контакту з боковим струменем $S'_{\text{пов}}$ буде складати: на початку кампанії по футерівці: $S'_{\text{пов}}^{4,0} = 12,563 \text{ м}^2$ при $L = 12,56$ м, а наприкінці кампанії - $S'_{\text{пов}}^{6,0} = 29,36 \text{ м}^2$ при $L = 14,82$ м відповідно. При цьому, покривається струменями $4,372 \text{ м}^2$ або 29,5 % від загальної площі поверхні вогнетривів конвертера, що свідчить про достатню ступінь локалізації у просторі бокових струменів та можливість перенаправлення крапель.

У четвертому розділі «Чисельне та високотемпературне моделювання теплофізичних процесів при формуванні гарнісажного шлакового покриття на поверхні вогнетриву» наведені результати математичного моделювання гідрогазодинаміки роздування ванни з нанесенням на стіни конвертера гарнісажного покриття та фізичного моделювання розтікання модифікованого шлаку по поверхні вогнетриву з утворенням гарнісажного шару.

При чисельному моделюванні задачу прийнято циліндрично симетричною відносно вісі газошлакового потоку та зведено до циліндрично двовимірної. Крім газової фази-носію з об'ємною густиною α , враховується ще дисперсна фаза: краплі шлаку з об'ємною густиною η . Рівняння перенесення шлакової фази у відхідному газошлаковому потоці має вигляд

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\eta \vec{v}_h) = \vec{\nabla} \cdot (D_h \vec{\nabla} \eta) + x \psi \quad (5)$$

де \vec{v}_h - швидкість фази η ; D_h - ефективний коефіцієнт дифузії, що враховує турбулентні складові; $x = \rho_g^o / \rho_t^o$ - малий параметр; ψ - об'ємна густина шлаку. У якості граничних: на стінах конвертера прийняті умови часткового налипання шлакового шару, а на усіх інших границях – вільного ковзання. Рівняння моделі, у циліндричних координатах, апроксимуються кінцевими різницями на шахматній сітці. Подальше вдосконалення моделі полягало в перенесенні її у тривимірний простір, з врахуванням геометрії промислового конвертера, шляхом перенесення

інформації про розподіл дисперсної фази в шлаковій «плямі» на поверхні футерівки. На рис. 4 наведені результати моделювання зміни позиції висоти наконечника фурми (H_{ϕ}) та відносної тривалості роздування шлаку на кожній позиції (τ) для умов використання штатної гарнісажної фурми у конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський МК».

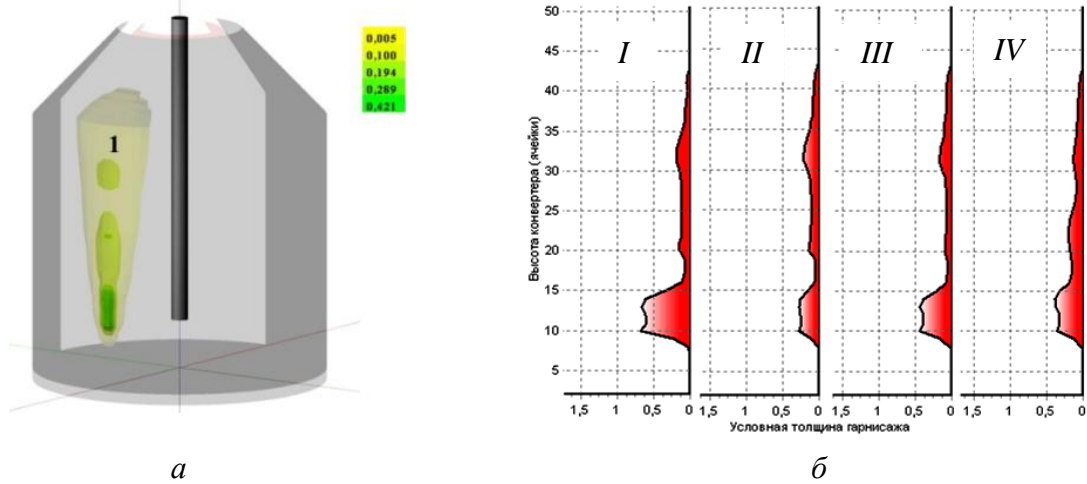


Рис. 4. Розподіл шару гарнісажу за товщиною (для одного сопла) (а), перерізи шару утвореного шлакового гарнісажу на футерівці конвертера для різних режимів роздування шлакової ванни (б): (зліва направо) I - H_{ϕ} : 5; 3; 1 м при $\tau = 1:1:1$; II - H_{ϕ} : 5; 3; 1 м ($\tau = 1:2:3$); III - H_{ϕ} : 5; 3; 1 м ($\tau = 1:1:2$); IV - H_{ϕ} : 5; 4; 3; 1 м ($\tau = 1:1:1:2$) відповідно

Встановлено, що при проведенні роздування шлаку за режимом IV (рис. 4) забезпечується відносно рівномірний за товщиною гарнісажний шар на футерівці.

На наступному етапі досліджень проведено серію високотемпературних експериментів. Для визначення значень крайового кута змочування шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву використано методику повного факторного експерименту. З метою коригування складу шлаку, %: CaO 45,1; MgO 3,9; SiO₂ 16,5; FeO+Fe₂O₃ 26,3, до нього присаджували чисті CaO, MgO (від 5 до 20% від маси шлаку кожного) та тугоплавкі частки (на основі MgO діаметром D від 0,63 до 3,60 мм) у кількості до 8 % від маси шлаку. Картина розтікання для одного зі зразків з добавкою тугоплавких часток та крайові кути змочування модифікованих шлаків, наведені на рис. 5 та у таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення крайового кута змочування для модифікованих конвертерних шлаків



X_3 , мм	θ_i , град.		$\bar{\theta}$, град.
	θ_{min}	θ_{max}	
3,0...3,6	84,0	90,0	87,0
2,0...3,0	11,0	28,9	19,95
1,0...2,0	31,4	41,7	36,55
0,63...1,0	20,9	57,1	39,0

Рис. 5. Картина плавлення (а) та розтікання краплі модифікованого шлаку (б) з утворенням гарнісажного шару на вогнетриві: 1 – вогнетрив; 3 – крапля шлаку; 4 – гарнісажний шар

Встановлено, що найбільш впливовим на зміну крайового кута змочування фактором є вміст CaO ($\alpha_i = 46,125$). Зі збільшенням вмісту CaO та MgO відбувається міграція складу шлаку до області з підвищеною температурою

плавління (рис. 6) та зникнення газового проміжку на границі «гарнісаж-вогнетрив» (в), на відміну від гарнісажу з висхідним складом шлаку (б).

Отримані моделі для опису взаємозв'язку зміни концентрації CaO та MgO у шлаку з крайовим кутом змочування вогнетриву шлаком

$$\theta = 94,008 - 3,69 \cdot \text{CaO} - 2,072 \cdot \text{MgO} + 0,362 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \quad (6)$$

та впливу діаметру внесених у шлак тугоплавких часток MgO на зміну крайового кута змочування модифікованим шлаком вогнетриву:

$$\theta = 101,295 - 2,37 \cdot \text{CaO} - 2,676 \cdot \text{MgO} - 27,68 \cdot D + 0,2686 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} + 1,674 \cdot \text{CaO} \cdot D + 2,985 \cdot \text{MgO} \cdot D - 0,197 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot D \quad (7)$$

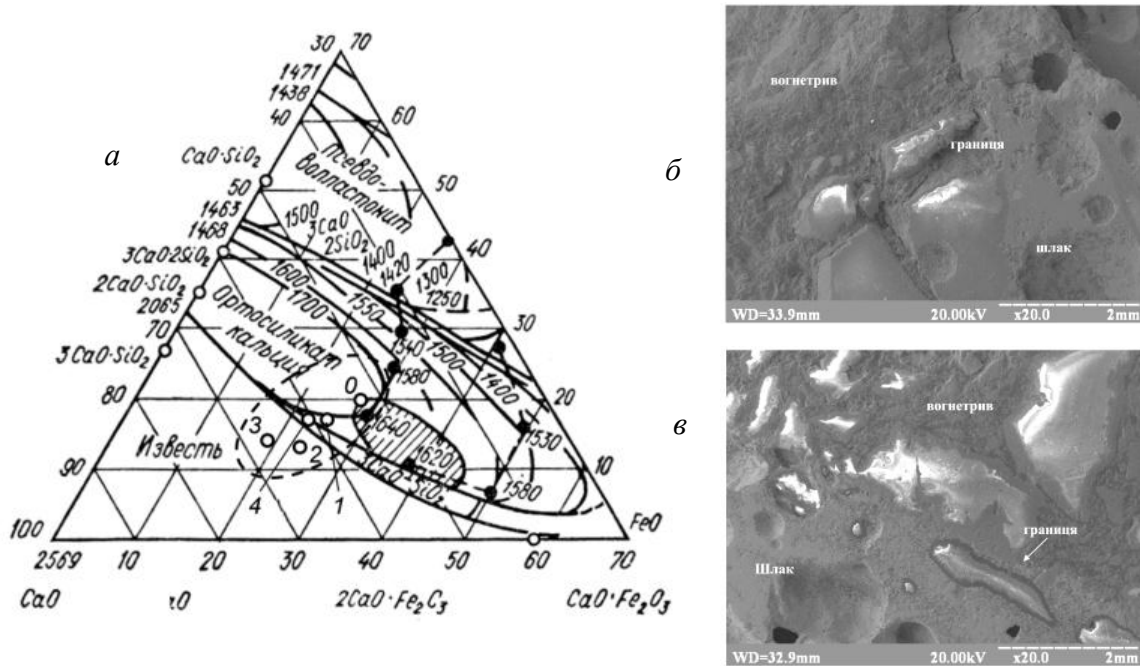


Рис. 6. Зміна хімічного складу конвертерного шлаку при додаванні CaO та MgO у висхідний конвертерний шлак (т. «0» на діаграмі) (а) та мікроструктура зони контакту «шлак -вогнетрив» (б, в). Цифри у виділених на діаграмі точках (а) відповідають номерам експериментального складу модифікованого шлаку

За результатами моделювання підтверджено, що підвищення вмісту MgO у складі шлаку понад 12 % призводить до збільшення θ до 75...80 град., що може перешкоджати утворенню щільного покриття гарнісажем поверхні вогнетриву. Введення до шлаку часток фракції більше 3,0 мм (3,0...3,6 мм) також призводить до збільшення величини крайового кута змочування та негативно впливає на розтікання шлаку по поверхні вогнетриву. Визначено, що введення тугоплавких часток (на основі MgO) до шлаку, призводить до зміни величини роботи адгезії на 0,2...0,8 Н/м² (рис. 7).

У п'ятому розділі «Розробка удосконаленої конструкції гарнісажної фурми та технології відновлення профілю робочого простору конвертера шляхом керованого роздування шлакової ванни на футерівку» наведені результати проектування та впровадження конструкції двоярусної гарнісажної фурми та технології нанесення шлакового гарнісажу з її використанням в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат».

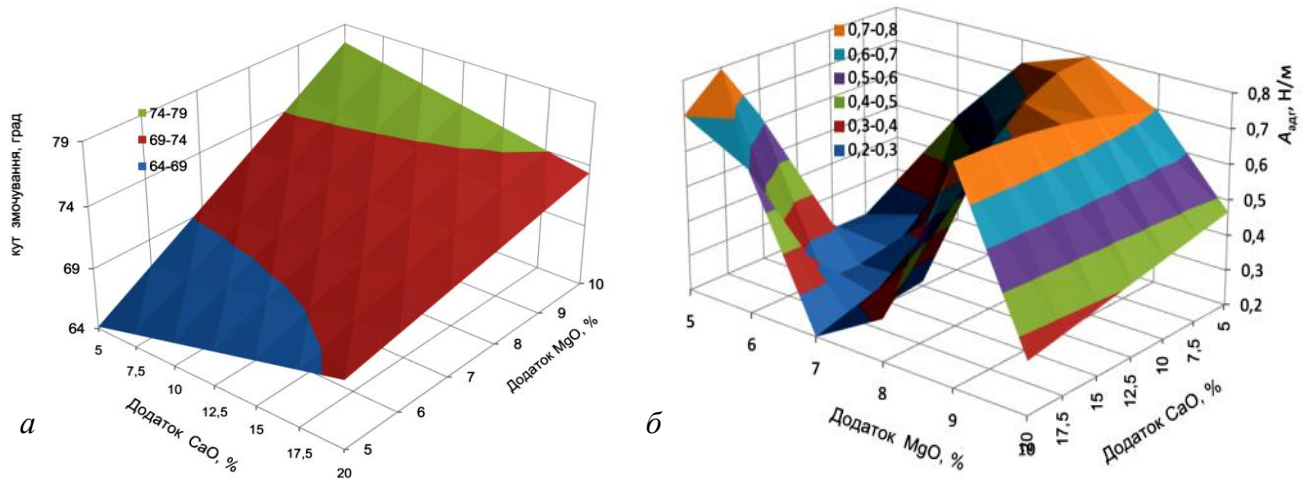


Рис. 7. Поверхні відгуку, що відображають вплив добавки твердих часток MgO фракції 3,0...3,6 мм (а) на зміну крайового кута та фракції 0,63...1,0 мм (б) на роботу адгезії

Скануванням профілю робочого простору конвертера у різні періоди кампанії (500 й 501 та 4130 й 4131 плавки по футерівці) вперше визначені фактичний розподіл та товщина шару нанесеного роздуванням ванни шлакового гарнісажу (від 5...8 мм у районі горловини до 35...200 мм - у нижній частині агрегату). Встановлені «проблемні» (з підвищеною інтенсивністю зносу) зони на футерівці, що розташовані на меридіанах 50, 150, 215, 310 град.

Розроблена методика розрахунку необхідної тривалості роздування ванни та положення наконечника фурми над шлаковою ванною, з врахуванням того, що при кінетичній енергії струменю з сопел Лавалю діаметром $d_{кр}=0,043$ м та $d_{кр}=0,037$ м у 38883,18 Дж та 9915,5 Дж відповідно, витрата енергії на утворення поверхні розподілу «газ-шлак» не перевищує 1,42 Дж, а інша частина енергії витрачається на подрібнення шлаку та винесення крапель. Прийнято, що з поверхні кратера у ванні здувається шар шлаку масою $m_{пл} = \frac{\pi d_{ск}^2}{4} \rho_{шл} \delta_{пл}$ товщиною від 0,4 до 3 мм, який розбивається потоком відхідного газу на краплі та переноситься на обмежену сектором S_C поверхню футерівки конвертера. При визначені кутів відбиття крапель шлаку на периферії потоку (α_2, β_2) та нахилу сопел Лавалю (α_1, β_1), без урахування і з урахуванням кута розширення газового струменя відповідно, S_C визначається кількістю сопел фурми, а ширина сектору нанесення крапель шлаку (ΔH) у відповідному S_C - кутом α_1 :

$$\Delta H = (R_k - h_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \beta_1 - (R_k - h_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2) \cdot \operatorname{tg} \beta_2, \quad (8)$$

$$S_C = \frac{\pi}{2} R_k \cdot A, \text{ де } A = R_k (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2). \quad (9)$$

Товщину гарнісажної плівки з шлакових крапель діаметром $d_{ск}$, нанесеної на S_C за 1 сек, можна визначити за виразом, м:

$$\delta_{шл} = \frac{2r_{кр} \left(\sqrt{h_{кр}^2 + r_{кр}^2} \right)}{R_k^2 (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2) \cdot (R_k - h_{\phi} \operatorname{tg} \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \beta_1} \quad (10)$$

Згідно з розрахунками, при розташуванні 6-ти соплового наконечника фурми на висоті 4 м від днища конвертера, для нанесення на сектор S_C шару гарнісажу

товщиною у 50 мм тривалість роздування повинна складати 3,3 хв, а при $h_{\text{ф}}=0,5$ м - вже 5,9 хв. При цьому, для фурми з соплами Лавалю, що мають кут нахилу 17° до вертикалі, ΔH у відповідному секторі S_C не залежить від розташування наконечника над ванною, та складає 3,27 м. При зміні кута нахилу сопел Лавалю з 10° до 17° , S_C також не залежить від висоти фурми і складає $9,84 \text{ м}^2$ та $4,73 \text{ м}^2$ відповідно, та пропорційно збільшується по мірі зносу футерівки.

При проектуванні двоярусної гарнісажної фурми до основного завдання віднесли необхідність забезпечення відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату шляхом нанесення шару гарнісажу заданої товщини на визначені зони футерівки. На відстані 2,5 м від наконечника фурми з 2-ма направленими на цапфені зони соплами Лавалю ($d_{\text{кр}}=43$ мм) й 4-ма соплами Лавалю ($d_{\text{кр}}=37$ мм), на стовбурі було розміщено другий ярус з 4-х циліндричних сопел ($d=20$ мм), розміщених під кутом 115° до поверхні ванни (рис. 8).

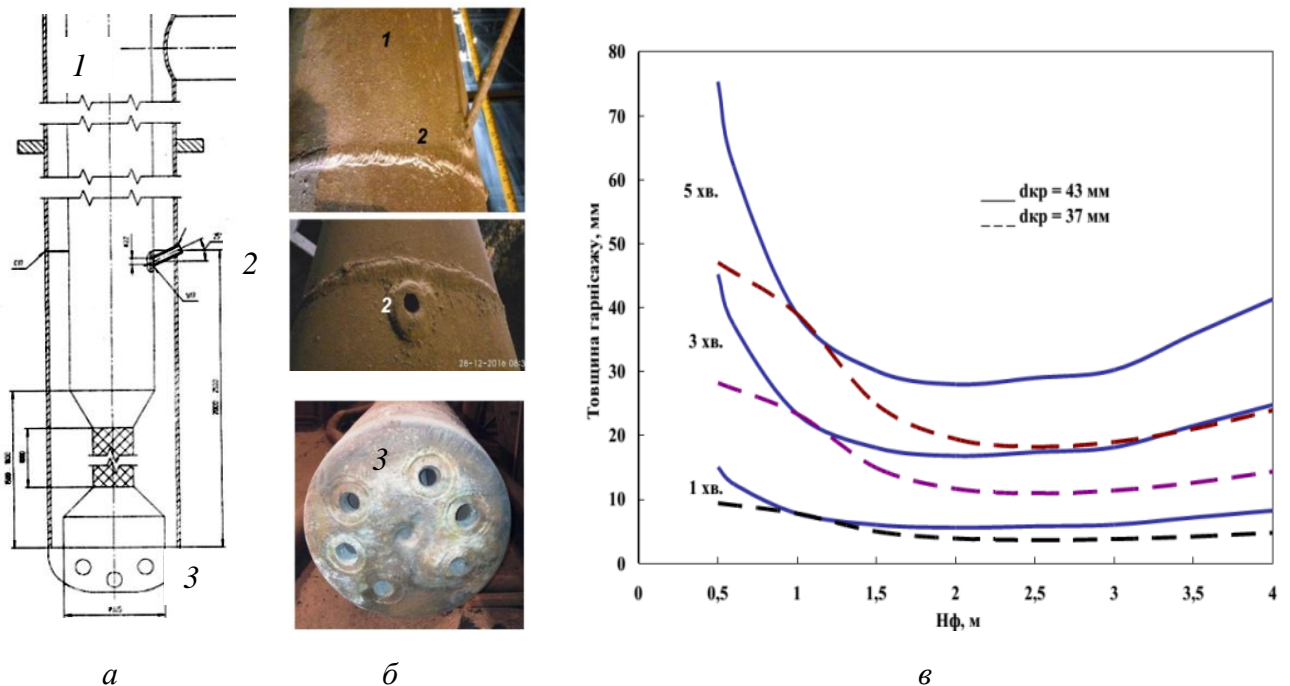


Рис. 8. Схема конструкції (а), вигляд (б) двоярусної гарнісажної фурми та розрахункова товщина шару гарнісажу (в) на відповідному секторі футерівки конвертера у залежності від тривалості роздування шлакової ванни та висоти розташування наконечника фурми над ванною ($H_{\text{ф}}$): 1 – стовбур фурми; 2 – циліндричні сопла верхнього ярусу; 3 – сопла Лавалю наконечника

Співвідношення витрат азоту на бокові та основні сопла Лавалю складає 17% та 83% від загальних ($600 \dots 800 \text{ м}^3/\text{хв.}$) витрат газу на роздування ванни. Розрахунком площі перетину бокових струменів визначено, що краплями шлаку, переміщеного газовими потоками з бокових сопел другого ярусу, можливе перекриття до 46,98 % площі робочої поверхні футерівки агрегату. Використання двоярусної гарнісажної фурми на 250-т конвертерах в умовах ПАТ «ДМК» дозволило оперативно відновлювати раціональний профіль робочого простору конвертера за рахунок утворення гарнісажного шару заданої товщини у визначених «проблемних» зонах та підвищити стійкість футерівки (табл. 2). До напрямків подальшої модернізації двоярусної гарнісажної фурми віднесено перехід до застосування газового охолодження з можливістю зміни відстані між ярусами та

напрямку витікання бокових струменів з сопел верхнього блоку (патент).

Таблиця 2. Результати дослідної (з використанням двоярусної гарнісажної фурми для нанесення шлакового гарнісажу) та порівняльної кампанії 250-т конвертера конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат»

№	Показник	Порівняльна кампанія	Дослідна кампанія	Відхилення
1	Товщина футерівки, мм	1210	1080	- 130
2	Стійкість футерівки, пл., у т.ч.: - робочого шару - арматурного шару	3408 2480 928	3731 2235 1496	+ 323 - 245 + 568
3	% плавок з нанесенням гарнісажу роздуванням шлаку	77,6	80,9	+ 3,3
4	Інтенсивність зносу футерівки, мм/пл., в т.ч.: - у початковий період кампанії - у основний період кампанії - арматурного шару	0,60 0,30 0,24	0,39 0,29 0,16	- 0,21 - 0,01 - 0,08
5	Характеристика кінцевого шлаку перед роздуванням: - середній вміст (FeO),%, у т.ч.: число пл. з (FeO) > 20 число пл. з (FeO) < 8 - середній вміст (MgO),%, у т.ч.: число пл. з (MgO) < 8 Основність, од.	15,9 11,8 0,7 6,5 85,6 2,3	15,2 2,8 0,9 6,8 27,8 2,4	- 0,7 - 9,0 + 0,2 + 0,3 - 57,8 + 0,1
6	Плавок з температурою сталі на випуску > 1700 ⁰ C, % від загального	4,4	6,3	+ 1,9
7	Питомі витрати, кг/т: - доломітизованого вапна - магнезійних гранул - вогнетривів - вогнетривких матеріалів для ремонту футерівки	65,3 0,564 0,829 100	66,8 0 0,705 93,99	+ 1,5 - 0,564 - 0,124 - 6,01

Для комбінованого роздування ванни запропонований спосіб роздування шлакової ванни з розосередженням у часі вводом суміші порошкоподібних тугоплавких часток на основі MgO до гарнісажного шлаку по ходу операції (патент).

При впровадженні розроблених технологічних режимів роздування шлакової ванни з використанням двоярусної гарнісажної фурми досягнуто ресурсо- та енергозберігаючого ефектів за рахунок: підвищення продуктивності конвертерів при зменшенні тривалості поточних простоїв на гарячий ремонт футерівки на 1,35%; підвищення стійкості футерівки конвертерів на 9,5%; зменшення витрат вогнетривких матеріалів для гарячого ремонту футерівки на 6,01%. Впровадження розробок дисертаційної роботи дозволило в умовах роботи конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК» отримати сумарний економічний ефект у розмірі 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі за 2016 рік). Розрахунковий енергетичний ефект від впровадження запропонованого способу роздування шлакової ванни для конвертерного цеху ПАТ «ДМК» складає від 14,4 до 36,46 МДж/т сталі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне завдання щодо розвитку наукових основ й удосконалення технології нанесення захисного шлакового гарнісажу на футерівку конвертера шляхом визначення закономірностей формування заданих фізико-хімічних властивостей шлакової ванни та способів коригування напрямку винесення шлакових крапель з ванни на проблемні зони на футерівці, що забезпечує підвищення стійкості гарнісажу, відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату, зменшення собівартості гарячих ремонтів та підвищення техніко-економічних показників роботи конвертерного цеху.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень були знайдені нові наукові рішення, отримані нові практичні результати і зроблені наступні висновки:

1. Аналіз сучасних технологій гарячого ремонту футерівки кисневих конвертерів шляхом нанесення гарнісажного покриття у конвертерному цеху ПАТ «ДМКД», конструкцій дуттьових фурм для їх реалізації, науково-технічної та патентної літератури свідчить, що робота, яка спрямована на розвиток наукових основ способів коригування фізико-хімічних характеристик кінцевого конвертерного шлаку по ходу операції та нанесення останнього на визначені зони футерівки, підвищення стійкості гарнісажу, розробку конструкції фурми для забезпечення відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату, є актуальною, а розв'язувана в роботі задача має важливе наукове і прикладне значення.

2. Із застосуванням відомих моделей взаємодії надзвукових газових струменів із рідиною та дозвукових струменів з відхідним газорідинним потоком, основних положень теорії подібності виконано інженерне обґрунтування визначальних параметрів дуттьового режиму нанесення гарнісажу на футерівку конвертера з комбінованим роздуванням шлакової ванни. Встановлений характер впливу донних газових струменів на реакційні зони взаємодії верхніх струменів зі шлаком, що призводить до зміни напрямку руху відхідних газошлакових потоків. Показано, що переважний вплив на напрямки руху крапель шлаку має відношення висоти розташування наконечника верхньої фурми $h_{\text{ф}}$ до діаметру кола розміщення $d_{\text{ф}}$ донних дуттьових вставок. При $h_{\text{ф}}/d_{\text{ф}}$ від 0,28 до 0,44 забезпечується зменшення «зашлаковування» стовбура верхньої фурми з одночасним збільшенням об'ємів шлаку, що спрямований на стіни конвертера при комбінованому роздуванні ванни.

3. Теоретично обґрунтований, підтверджений лабораторними й промисловими випробуваннями спосіб перенаправлення шлакових крапель на визначені зони футерівки з використанням двоярусної фурми. Вперше визначені режими взаємодії бокових струменів з відхідним газошлаковим потоком та їх вплив на умови формування гарнісажного покриття. Площа перекриття робочої поверхні конвертера боковими струменями з верхнього ярусу фурми складає 29,5-46,98%, що свідчить про можливість забезпечення коригування напрямку перенесення шлакових крапель з ванни на визначені зони на футерівці.

4. З використанням фізичного моделювання, розроблених математичних моделей для визначення товщини та площі покриття вогнетриву гарнісажем та

моделі гідрогазодинаміки роздування шлакової ванни визначені раціональні параметри її роздування газовими струменями з метою отримання шарів гарнісажу заданої товщини у «проблемних» зонах. Отримані моделі дають можливість моделювати поведінку шлакової ванни, режими роздування та результати операції. Для умов 250-т конвертера КЦ ПАТ «ДМК», висота розміщення наконечника фурми повинна відповідати діапазону 0,30...0,55 м у основний та 1,50...1,65 м - у перший період роздування шлакової ванни відповідно.

5. У роботі вперше теоретично обґрунтований та експериментально підтверджений спосіб коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни по ходу роздувки із використанням тугоплавких часток для запобігання переміщенню шлакового шару по футерівці. Визначені зміни величини роботи адгезії та ступінь впливу хімічного складу шлаку, діаметру та кількості внесених до шлаку тугоплавких часток на зміну крайового кута змочування вогнетриву. Використання тугоплавких часток призводить до коливань величини роботи адгезії шлаку до вогнетриву у діапазоні 0,2...0,8 Н/м² в залежності від співвідношення вмісту СаО та MgO у шлаку. Раціональним визнано розосереджене у часі внесення до шлакової ванни часток фракції 1,0...3,0 мм у кількості від 6 до 8 % від об'єму шлаку.

6. У роботі розроблено методику та алгоритм розрахунку необхідної тривалості роздування ванни та висоти розташування двоярусної фурми для оперативного відновлення раціонального профілю робочого простору конвертера за рахунок формування гарнісажних шарів заданої товщини у визначених зонах. Визначено, що при роздуванні ванни у 250-т конвертері надзвуковими газовими струменями із застосуванням двоярусної фурми з верхнім ярусом дозвукових сопел (з кутом нахилу 115° до ванни), ширина нанесених шлакових «плям» не залежить від розташування наконечника фурми та складає 3,27 м, що визначає умови коригування профілю робочого простору агрегату.

7. Спроектвана, виготовлена та впроваджена у промислову експлуатацію в умовах КЦ ПАТ «ДМК» двоярусна гарнісажна фурма, що містить 6-ти сопловий наконечник зі згрупованими по три у напрямках цапфених зон соплами Лавала двох різних діаметрів та розміщений на відстані 2,5 м від торця наконечника верхній блок з 4-ма циліндричними соплами. Співвідношення витрат азоту на роздування ванни до витрати на бокові сопла верхнього ярусу складає 0,15-0,19.

8. При впровадженні результатів дисертаційної роботи досягнуто підвищення продуктивності 250-т конвертерів за рахунок зменшення простоїв на гарячий ремонт футерівки на 1,35%; підвищення стійкості футерівки на 9,5%; зменшення витрат вогнетривких матеріалів на її ремонт на 6,01%. Отриманий економічний ефект склав 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі у цінах 2016 р.).

9. Новизна і промислова корисність технічних рішень підтверджуються отриманими патентами України «Гарнісажна фурма із змінним розташуванням ярусів» № 130174 (опубл. 26.11.2018, бюл. №22) та «Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття» №129813 (опубл. 12.11.2018, бюл. №21).

10. Результати досліджень, розроблені в дисертаційній роботі установки та методики використовуються на кафедрі металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету в навчальному процесі при викладанні

дисциплін «Техніка високотемпературного експерименту», «Технології ресурсозбереження в металургії», а також при виконанні здобувачами вищої освіти випускних кваліфікаційних робіт.

Основний зміст роботи викладено у публікаціях:

Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. Сигарев Е.Н. Исследование влияния тугоплавких частиц в шлаке на адгезию к огнеупору / Е.Н. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, А.А. Похвалитый, А.В. Довженко // *Металл и литье Украины*. - 2018. - № 11-12 (306-307). – С. 1-8. <https://steelcast.com.ua/metal-ta-lyttya-ukrayiny-no11-12-2018> (eLIBRARY, Google Scholar).

2. Сигарев Е.Н. Совершенствование конструкции гарнисажной фурмы и технологии восстановления профиля рабочего пространства конвертера / Е.Н. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, М.А. Кашцев, Ю.В. Байдуж // *Металл и литье Украины*. - 2018. - № 9-10. - С. 21-28. <https://steelcast.com.ua/metal-ta-lyttya-ukrayiny-no9-10-2018> (eLIBRARY, Google Scholar).

3. Недбайло М.М. Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей роздування шлаку із застосуванням двоярусної фурми / **М.М. Недбайло**, Є.М. Сігарьов, Ю.В. Байдуж // *Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки)*. - 2018. - № 1(32). - С. 15-20. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.32.2018.160>. (Academic Resource Index Research Bib, Google Scholar).

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Сигарев Е.Н. Особенности гидрогазодинамики раздувки шлаковой ванны двухъярусной фурмой / Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, **Н.Н. Недбайло** // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. – 2013. - № 3(23). - С.13-21.

5. Сигарев Е.Н. Двухъярусная гарнисажная фурма для конвертера ПАО «ДМКД» / Е.Н. Сигарев Е.Н., **Н.Н. Недбайло**, Д.А. Семенова, И.В. Чернятевич // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. – 2014. - № 2(25). – С. 9-16.

6. Sigarev E.M. Investigation of fluid and gas dynamic principles of slag splashing in the combined blowing converter / E.M. Sigarev, A.G. Chernyatevych, **M.M. Nedbaylo**, I.V. Chernyatevych // *Theory and practice of Metallurgy*. - 2015. – № 1,2 (102-103). - P. 207-209.

7. Сигарев Е.Н. Компьютерное моделирование нанесения шлакового гарнисажа на футерівку конвертера при изменении положения фурмы / Е.Н. Сигарев, А.Н. Сокол, **Н.Н. Недбайло** // *Математичне моделювання*. - 2015. – №1. – С.15-17.

8. Сигарев Е.Н. Модернизация гарнисажной фурмы для ошлакования футерівки / Е.Н. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, Р.В. Борщевский // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. – 2014. - № 1(24). - С. 7-13.

9. Сигарев Е.Н. Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж – футерівка» с учетом неравномерности её толщины / Е.Н. Сигарев, А.Н.

Сокол, **Н.Н. Недбайло** // Математичне моделювання. - 2016. - №2 (35). - С. 70-73.

10. Сигарев Е.Н. Энергосберегающий технологический маршрут выплавки стали для ПАО «ДМКД» / Е.Н. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, Д.О. Гуржий // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). – 2015. - № 1(26). – С. 3-10.

Статті у спеціалізованих періодичних виданнях:

11. Моделирование динамики формирования гарнисажного слоя / Е.Н. Сигарев, А.Н. Сокол, **Н.Н. Недбайло**, Д.А. Семенова // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus (XI International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», June 1-5, 2015), Varna, Bulgaria, 2015. - Special number. – P.148-150.

12. Багатоярусна гарнісажна фурма з розділеним потоком / **М.М. Недбайло**, Є.М. Сігарьов, Ю.В. Байдуж // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus (XIII International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», June 5 – 8, 2017), Varna, Bulgaria, 2017. - Special number. – P. 167-172.

13. Сигарев Е.Н. Определение параметров раздувки шлаковой ванны на футерівку конвертера / Е.Н. Сигарев, К.Г. Низяев, Н.К. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, Ю.В. Байдуж // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2016 . - №3. - С. 31-36.

Патенти України:

14. Патент України №130174 / Гарнісажна фурма із змінним розташуванням ярусів / Є.М. Сігарьов, С.П. Пантейков, **М.М. Недбайло**, Ю.В. Байдуж, К.І. Чубін – № u 201806283; Заявл. 05.06.2018; Опубл. 26.11.2018, бюл. № 22.

15. Патент України №129813 / Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття; С 21 С 5/06, С 21 С 5/36, С 21 С 5/44 / Є.М. Сігарьов, С.П. Пантейков, **М.М. Недбайло**, Ю.В. Байдуж, О.А. Чубіна – № u201805972; Заявл. 29.05.2018; Опубл. 12.11.2018, бюл. №21.

Матеріали наукових конференцій:

16. Численное исследование раздувки шлаковой ванны газовыми и газопорошковыми струями / Е.Н. Сигарев, **Н.Н. Недбайло**, Д.А. Семенова // Міжнародна конференція «Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво». (28-29 квітня 2015 р., м. Дніпропетровськ): матеріали / уклад: В.П. Іващенко, Ю.О. Ступак, - Дніпропетровськ: Герда, 2015. – С. 107 -113.

17. Гарнісажна фурма із різноімпульсними струменями / **М.М. Недбайло**, Є. М. Сігарьов, І.В. Чернятевич // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2017»: (23-25 травня 2017 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С. 365-368.

18. Комп'ютерне моделювання теплового стану футерівки при нанесенні шлакового гарнісажу / Є.М. Сігарьов, А.М. Сокол, **М.М. Недбайло** // Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання» (24-26 травня 2017 р., м. Кам'янське). - Дніпро. - Вид. Біла К.О. - 2017. – С. 56-57.

19. Моделирование тепломассопереноса в рабочем пространстве кислородного конвертера / Е.Н. Сигарев, К.И. Чубин, **Н.Н. Недбайло** // Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті.

Європейський досвід»: Матеріали у 2-х томах. Том I. – Дніпро-Відень, 2017. – С. 318-322.

20. Напрямки удосконалення конструкції гарнісажної фурми / **М.М. Недбайло**, Є.М. Сігарьов, О.А. Чубіна // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2018». (22-24 травня 2018 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С. 281-283.

21. Вплив донних газових потоків на умови роздування шлакової ванни у конвертері / Є.М. Сігарьов, **М.М. Недбайло**, А.В. Артамонова // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Металургія – 2019». (21-23 травня 2019 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко. – Запоріжжя : ФОП Систерова Н.О. – 380 с. – С. 346-348.

22. Коригування крайового кута змочування поверхні вогнетриву первинним конвертерним шлаком / **М.М. Недбайло**, Є.М. Сігарьов, Ю.С. Лобанов // Monografia pokonferencyjna “SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. №34” (Paris), 29 – 30 вересня 2020).– Warszawa: Sp.z.o. «Diamond trading tour», 2020.– Str. 22-24.

АНОТАЦІЯ

Недбайло М.М. Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Національна металургійна академія України, спеціалізована вчена рада Д.08.084.03 при Національній металургійній академії України, м. Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена розвитку теоретичних основ формування шлакового гарнісажу на футерівці конвертера та розробці ресурсозберігаючої технології модифікування конвертерного шлаку і роздування останнього на футерівку агрегату з використанням нової конструкції багатоярусної гарнісажної фурми.

У дисертаційній роботі отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що у сукупності є суттєвими для рішення актуальної задачі підвищення стійкості футерівки конвертерів.

З використанням методик фізичного та математичного моделювання отримано нову інформацію щодо гідрогазодинаміки роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням, умов модифікування кінцевого конвертерного шлаку та формування захисного шлакового гарнісажного шару на різних горизонтах футерівки агрегату при використанні багатоярусної гарнісажної фурми для роздування шлакової ванни.

На основі теоретичного обґрунтування, результатів фізичного та математичного моделювання, даних дослідно-промислових кампаній конвертерних плавок розроблено і впроваджено у промислове виробництво нову конструкцію багатоярусної гарнісажної фурми, режими нанесення шлакового гарнісажу з її використанням із відновленням раціонального профілю робочого простору 250-т конвертера шляхом перенаправлення частини відхідного газошлакового потоку на

визначені зони на футерівці, які забезпечують підвищення технологічних та поліпшення техніко-економічних показників конвертерної плавки.

Ключові слова: конвертер, шлак, футерівка, гарнісаж, фурма, роздування, ванна, модифікатори, адгезія.

ABSTRACT

Nedbaylo M.M. Development of the theory and development of resource-saving technology for applying a slag skull to the converter lining. - Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of technical sciences in specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". - National Metallurgical Academy of Ukraine, Specialized Academic Council D.08.084.03. Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the development of the theoretical foundations of the formation of a slag skull on the converterslag and to the development of a resource-saving technology for modifying the converter slag and blowing the latter onto the unit lining using a new design of a multi-tiered skull lance.

In the dissertation work, new scientifically substantiated theoretical and experimental results were obtained, which together are essential for solving the urgent problem of increasing the stability of the converter lining. Using physical and mathematical modeling, new information on the fluid dynamics of slag bath inflation in a converter with combined blowing, conditions for slag modification and the formation of a slag skull layer at different levels of the unit lining using a multi-tiered skull lance were achieved.

Based on the results of theoretical substantiation, physical and mathematical modeling, pilot-industrial campaigns of smelting, a new design of a multi-tiered skull lance was developed, improved and introduced into industrial production, modes of applying a slag skull with its use and restoring a rational profile of the working space of a 250-ton converter. All this was due to redirection parts of the gas and slag flow into certain zones on the futures, providing an increase in technological, technical, and economic indicators of converter smelting.

Key words: converter, slag, lining, skull, lance, blowing, bath, modifiers, adhesion.

