

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НЕДБАЙЛО МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 669.184.125.046

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

Спеціальність 05.16.02 – Металургія чорних
і кольорових металів та спеціальних сплавів

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ М. М. Недбайло

Науковий керівник – Сігарьов Євген Миколайович
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Дніпровський державний технічний університет. – м. Кам'янське - 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню та розвитку теоретичних основ і наукових уявлень щодо механізму, газогідродинаміки і фізико-хімічних закономірностей модифікування та роздування кінцевого конвертерного шлаку з метою формування шлакового захисного гарнісажного покриття на периклазовуглецевій футерівці кисневого конвертера.

Основний зміст дисертаційної роботи.

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне завдання щодо вдосконалення способів модифікування та роздування кінцевого конвертерного шлаку на футерівку кисневого конвертера, які забезпечують підвищення стійкості сформованого гарнісажного покриття та відновлення раціонального профілю робочого простору конвертера за рахунок перенаправлення частини газошлакового потоку у визначені сектори на стінах, що базується на теоретичних уявленнях і отриманих експериментальних даних про гідрогазодинамічні та тепломасообмінні закономірності роздування ванни та взаємодії шлаку з вогнетривом.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступних положеннях:

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 не-

глибоких 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 «запечатуння» донних вставок.

Відомості відносно впливу розташування наконечника фурми та донних вставок конвертера на закономірності нанесення гарнісажу при комбінованому роздуванні шлакової ванни були відсутні.

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 Лаваля фурми для забезпечення максимальної густини шару гарнісажу на футерівці знаходиться у діапазоні 3,8-4,1.

До цього часу відомості щодо розподілу гарнісажного шару за товщиною на робочій поверхні футерівки конвертера та характеру впливу бокових газових струменів на зворотній газошлаковий потік й раціональні режими комбінованого роздування шлакової ванни були відсутні.

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.

Відомості щодо комплексного впливу умов роздування, товщини й температури футерівки на утримання гарнісажного шару були відсутні.

4. Науково обгрунтований 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 $0,2 \dots 0,8 \text{ Н/м}^2$, у залежності від співвідношення вмісту (CaO) та (MgO). Раціональним визнано розосереджене у часі внесення до шлаку тугоплавких часток діаметром 1-3 мм.

Відомості щодо впливу тугоплавких часток різних фракцій у складі конвертерного шлаку на його адгезію до периклазовуглецевого вогнетриву були відсутні.

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 Лаваля (з кутом нахилу 17°) та розташованими на відстані у 2,5 м соплами верхнього блоку (з кутом нахилу 115°), 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 ($H_{\text{ф}}$) 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 $H_{\text{ф}}$ повинні бути у діапазоні 1,50-1,65 м у перший та 0,40-0,55 м у основний період роздування шлакової ванни.

Відомості щодо впливу впливу бокових струменів та відстані між ярусами двоярусної фурми, кутів нахилу сопел її наконечника на розміри нанесеної гарнісажної «плями», при нестационарних режимах роздування шлакової

ванни, були відсутні.

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 шести сопловий наконечник зі згрупованими по три у напрямках цапфених зон соплами Лаваля 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.

Ключові слова: конвертер, шлак, футерівка, вогнетрив, шлаковий гарнісаж, гарнісажна фурма, роздування, шлакова ванна, модифікатори, адгезія.

ANNOTATION

Nedbailo M.M. Development of the theory and working-out of resource-saving technology for applying a slag skull on the converter lining. - Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". - Dniprovsky State Technical University. - Kamianske - 2019.

The thesis is devoted to the study and development of the theoretical foundations and scientific concepts of the mechanism, gas hydrodynamics and physicochemical laws of the modification and inflation of the final converter slag with the formation of a protective skull coating on the periclase-carbon lining of the oxygen converter.

The main content of the thesis.

In the thesis, an urgent scientific and practical problem was solved to improve the methods for modifying and blowing up the final converter slag on the lining of an oxygen converter, providing an increase in the stability of the existing skull

coating and restoring a rational profile of the converter working space by redirecting part of the gas and slag flow to certain sectors on the walls, based on theoretical concepts and obtained experimental data on the hydro-gas-dynamic and heat and mass transfer regularities of the swelling of the bath and the interaction of slag with refractory.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following paragraphs:

1. Using the models of interaction of supra- and subsonic jets with a gas-slag flow, the provisions of the theory of similarity, the engineering substantiation of the defining parameters of the mode of multi-jet slag pool inflation in a converter with combined blowing was carried out. It is proved that the displacement by the gas jets flows from the bottom inserts, the slag layer from the reaction zones of the interaction of the upper jets with the slag leads to a decrease in the intensity of formation, the volume and direction of the removal of gas and slag flows into the working space of the unit.

The predominant influence of the height of the location of the tip of the multi-tiered lance relative to the bottom inserts was established, and it was shown that in the range of the ratio of the height of the lance to the diameter of the circumference of the location of the bottom inserts from 0,28 to 0,44, a decrease in "slagging" of the lance shaft with a simultaneous increase in on the converter walls. A rational relationship has been established between the angle of inclination of the nozzles of the upper block and the Laval nozzles of the lance in the range from 3,8 to 4,1 to ensure the maximum density of slag drops deposition on certain zones on the lining.

There was no information on the influence of the location of the lance tip and the bottom inserts of the converter on the patterns of scull deposition during combined blowing of the slag bath.

2. A new method of influencing the outgoing gas-slag flow with side gas jets from the upper block of a two-tier lance to redirect a part of the slag drops to certain zones on the futerwastheoretically and experimentally substantiated. The obtained mathematical models for determining the thickness and area of the refractory coating with the slag of the skull, taking into account the influence of the corrective

side jets were obtained. It has been established that the area of overlapping the working surface of the converter by the side jets is from 29,5 to 46,9%; for the conditions of a 250-ton converter, the working heights of the location of the tip of the two-tier lance should be in the range from 1,50 to 1,65 m in the first and 0,40 to 0,55 m during the main period of swelling of the slag bath.

By this time, there was no information about the nature of the effect of side gas jets on the reverse gas-slag flow and the rational modes of combined blowing of the slag bath.

4. The methodology for designing a multi-tiered skull lance adapted for blowing up modified converter slag in converters with top and combined bath blowing has been developed. A method and an algorithm for determining the required duration of slag bath inflation and the location of a two-tier lance have been developed, designed to restore the rational profile of the converter working space during the campaign.

It was established for the first time that when slag was blown in a 250-ton converter using a two-tier lance tip with Laval nozzles (with an angle of 17°) and nozzles of the upper block (with an angle of 115°) located at a distance of 2,5 m, the height of the applied slag "spot" does not depend on the location of the lance, and is 3,27 m, which determines the basic conditions for adjusting the profile of the working space of the converter by changing the direction of the side jets and moving the lance along the height with a given algorithm.

Information on the influence of the distance between the tiers of the two-tier lance and the angles of inclination of the nozzles of its tip, the dimensions of the skull "spot" were absent.

5. Using the developed mathematical models of fluid dynamics of slag swelling and mass transfer in the "skull-refractory" system, for the first time, the regularities of the formation of the skull slag layer were determined under unsteady modes of swelling of the bath and changes in the thermal state of the converter lining.

There was no information on the regularities of the formation of the skull layer under unsteady modes of swelling of the slag bath and changes in the thermal

state of the lining.

The practical significance of the obtained results:

1. Experimental installations and author's methods of modeling the processes of combined blowing up of a liquid bath on the walls of the converter and studying the interaction of refractory particles of slag modified with additives with periclase-carbon refractory have been developed.

2. A two-tier skull lance was designed and put into commercial operation in the converter shop of JSC "Dneprovsky Metallurgical Plant". The lance contains a 6 nozzle tip with Laval nozzles of two different diameters grouped in three in the directions of the trunnion zones and is located at a distance of 2,5 m from the tip end of the second tier with 4 cylindrical nozzles designed to correct the profile of the internal working space of the converter by creating skull layer of a given thickness in certain sectors for a certain period of time.

3. A technology for swelling a slag bath with the provision of prompt correction of its physicochemical state during the operation due to the supply of powdered magnesia materials in the flow of the bottom blast has been developed; it also improves the adhesion properties of the skull.

4. The novelty and industrial usefulness of technical solutions are confirmed by the obtained patents for utility models "Head lance with variable arrangement of tiers" No. 130174 (published on November 26, 2018, bulletin No. 22), "Method of applying a slag skull on the lining of combined blast converters" No. 129813 (published on 12.11.2018, bul. No. 21).

5. Due to the introduction of developments, an effect was achieved with an increase in the productivity of converters due to a decrease in downtime for hot repair of the lining by 1,35%; increase in sustainability by 9,5%; reduction in the consumption of refractory materials for lining repair by 6,01%. The resulting economic effect in 2016 amounted to UAH 1,694,223.44. (1,96 UAH / T of steel).

6. The methods developed in the dissertation work are used at the Department of Ferrous Metallurgy of Dniprovsky State Technical University in the educational process in the disciplines course: "Ferrous Metallurgy", "Technologies of Resource

Saving in Metallurgy", as well as when applicants for higher education write qualification works.

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

Список публікацій здобувача (List of publications).

Основний зміст дисертації відображено у наступних 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.

(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. Кащеев, Ю.В. Байдуж // *Металл и литье Украины*. - 2018. - № 9-10. - С. 21-28. **(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. **(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 на корисні моделі:

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. Сигарев Е.Н. 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.Камянське). - 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** // Міжнарод-

на конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»: Матеріали у 2-х томах. Том І. – 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. **Недбайло М.М.**, Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С. Коригування крайового кута змочування поверхні вогнетриву первинним конвертерним шлаком // Monografia pokonferencyjna “SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. №34” (Paris), 29.09.2020 - 30.09.2020).– Warszawa: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2020.– Str. 22-24.

ЗМІСТ

Вступ	17
Розділ 1. Переваги та недоліки сучасних технологій гарячого ремонту футерівки кисневого конвертера.....	25
1.1 Сучасні технології контролю та відновлення раціонального профілю футерівки робочого простору кисневого конвертера	25
1.2 Особливості нанесення шлакового гарнісажу на футерівку у конвертерах із комбінованим продуванням ванни	31
1.3 Механізм та закономірності зносу футерівки у різні періоди конвертерної плавки	33
1.4 Підготовка шлаку до роздування та механізм формування гарнісажного шлакового покриття на периклазовуглецевих вогнетривах	46
1.4.1 Підготовка конвертерного шлаку до роздування на футерівку	46
1.4.2 Особливості нанесення та формування шлакового гарнісажного шару на футерівці конвертера.....	54
1.5 Математичне моделювання гідрогазодинаміки роздування шлаку при формуванні шлакового гарнісажного покриття на футерівці конвертера	57
1.6 Дуттьові пристрої для роздування шлакової ванни на футерівку кисневого конвертера	59
1.7 Мета та завдання досліджень	67
Розділ 2. Установки та методики досліджень	70
2.1 Критерії подібності при моделюванні гідрогазодинаміки роздування конвертерного шлаку на футерівку конвертера	70
2.2 Установка для моделювання роздування рідкої ванни у конвертері з комбінованим та верхнім продуванням	78
2.3 Установки та методики для дослідження поверхневих явищ у системі «шлаковий розплав – вогнетрив»	84
2.4 Методика проведення промислового експерименту	89
2.5 Висновки по розділу 2	90

Розділ 3. Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей нанесення гарнісажного покриття шляхом роздування рідкої ванни на робочу поверхню футерівки конвертера	93
3.1 Результати дослідження гідрогазодинамічних закономірностей роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням ванни	93
3.2 Результати моделювання гідрогазодинаміки верхнього роздування рідкої ванни з використанням одно- та двоярусної фурми ...	100
3.3 Результати дослідження впливу конструкції фурми на рівномірність розподілу гарнісажного покриття на стінах конвертера ...	105
3.4 Висновки за розділом 3	110
Розділ 4. Чисельне та високотемпературне моделювання формування шлакового гарнісажного покриття на поверхні вогнетривів	113
4.1 Чисельне моделювання процесу утворення шлакового гарнісажного покриття на робочому шарі футерівки конвертера по ходу роздування шлакової ванни	113
4.2 Термодинамічна оцінка впливу реакцій на границі шлаковогнетрив на умови руйнування периклазовуглецевих вогнетривів	120
4.3 Результати високотемпературних експериментів з визначення крайового кута змочування модифікованим шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву	124
4.4 Висновки за розділом 4	137
РОЗДІЛ 5. Розробка удосконаленої конструкції гарнісажної фурми та технології відновлення профілю робочого простору конвертера шляхом керованого роздування шлакової ванни на футерівку.....	139
5.1 Штатна технологія нанесення шлакового гарнісажу роздуванням шлакової ванни у конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат».....	139
5.2 Визначення зон випереджаючого зносу футерівки конвертера та розробка методики розрахунку раціональних параметрів роздування шлакової ванни	140

5.3 Удосконалення конструкції гарнісажної фурми та технології роздування шлаку на футерівку 250-т конвертера	152
5.4 Напрямки подальшого удосконалення конструкції двоярусної гарнісажної фурми	159
5.5 Розрахунок ресурсо- та енергозберігаючої ефективності запропонованого способу відновлення профілю робочого простору конвертера	163
5.6 Висновки за розділом 5	166
Висновки	169
Список використаних джерел	173
Додаток А. Про впровадження на ПАТ «Дніпровський меткомбінат» результатів дисертаційної роботи	184
Додаток Б. Розрахунок економічної ефективності від використання результатів дисертаційної роботи	186
Додаток В. Акт використання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи	187
Додаток Г. Список наукових публікацій здобувача за темою дисертації	189

ВСТУП

Сучасні вимоги до футерівки кисневих конвертерів засновані на необхідності досягнення її високої стійкості із одночасною мінімізацією питомих витрат на вогнетриви. Поряд із удосконаленням якості, типорозміру та складу вогнетривів, конструкції футерівки з врахуванням необхідності гармонізації зносу різних її зон, невід'ємним елементом експлуатації залишається своєчасне та ефективне обслуговування футерівки.

В основі подальшого покращення експлуатаційних характеристик периклазовуглецевих вогнетривів - розвиток наукових уявлень та отримання додаткових відомостей стосовно механізму їх руйнування, закономірностей взаємодії зі шлаками різних періодів конвертерної плавки та гарнісажним шлаковим шаром. Питання розвитку наукових основ, вдосконалення та освоєння технології нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера, розробки нових конструкцій гарнісажних фурм розглядались в ряді досліджень Смирнова О.М., Чернятевича А.Г., Бойченко Б.М., Стовпченко Г.П., Нізяєва К.Г., Молчанова Л.С. Дослідження особливостей взаємодії пористих тіл з розплавами, фізико-хімічних закономірностей протікання процесів між металевим та шлаковим розплавами і складовими вогнетривкої футерівки, подальше удосконалення конструкцій гарнісажних фурм та технології нанесення гарнісажного покриття залишається актуальним завданням.

Слід особливо відзначити, що поширена на більшості провідних металургійних підприємств світу та випробувана на ряді металургійних підприємств України технологія комбінованої продувки ванни 160 та 250-350-тонних конвертерів киснем зверху з витратою 400-500, 1050-1500 м³/хв. крізь звичайну багатосоплову фурму і нейтральним газом (20-30 м³/хв.) крізь 10-16 донних вогнетривких блоків [1,2,3], хоч і сприяє покращенню перемішування ванни зі зниженням окисленості металу і шлаку, але характеризується наступними недоліками: інтенсифікується заметалювання технологічного обладнання (стовбура кисневої фурми, горловини конвертера і екранних поверхонь газовідвідного тракту) внаслідок більш тривалої продувки в режимі «згортання» шлаку,

особливо при вмісті в ньому більше 8 %MgO; істотно ускладнюється технологія нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера і особливо догляд за днищем з метою запобігання його зносу й забезпечення працездатності всіх донних фурм протягом кампанії.

На сьогодні ефективним способом підвищення стійкості футерівки агрегатів залишається роздування модифікованого магnezіальними добавками конвертерного шлаку, який кристалізується та утворює на поверхні вогнетривкої футерівки кисневого конвертера термостійкий гарнісажний шар. Фізико-хімічний стан та температура плавлення шлаку, який роздувається, кут змочування та адгезія до поверхні футерівки безпосередньо впливають на динаміку та можливість формування гарнісажного шару заданої товщини [4, 5]. На сьогодні показники стійкості футерівки на підприємствах Китаю і Північної Америки складають 10000-35000 плавов, при рекордній – понад 60000 плавов [6,7]. Успіхи металургійних підприємств колишнього СНД в цьому напрямку значно скромніше зарубіжних і складають 7000-8000 плавов (РФ) і до 5000 плавов (Україна) [8].

Для стабілізації динаміки фаз у конвертері та дугтьового режиму продувки ванни, підвищення стійкості футерівки, по ходу кампанії необхідною умовою є також забезпечення симетричності робочого простору агрегату. Проблемою залишається й забезпечення належної стійкості нанесеного на футерівку шару гарнісажного покриття та обмежені можливості оперативного коригування профілю робочого простору агрегату.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Розглянуті в дисертаційній роботі питання і задачі складають результати досліджень, що виконані автором 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» (договір № 19-0282-02 від 20.03.2019 р.)). 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. Дослідження механізму модифікування кінцевого конвертерного шлаку, газогідродинамічних особливостей його роздування фізико-хімічних закономірностей взаємодії нанесеного шлаку з периклазовуглецевою футерівкою конвертера та розробка напрямків удосконалення операції нанесення гарнісажного шлакового покриття.

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

- провести критичний аналіз сучасних методів підготовки кінцевого конвертерного шлаку та пристроїв для роздування останнього на футерівку, визначити напрямки їх удосконалення;

- обґрунтувати і експериментально підтвердити можливість керування відхідним газошлаковим потоком з застосуванням багатоярусних фурм, що дозволяє формувати шар гарнісажу заданої товщини у визначених зонах на футерівці та коригувати профіль робочого простору конвертера по ходу його кампанії;

- теоретично та експериментально дослідити формування гарнісажного шару та вплив модифікаторів та фізико-хімічного стану шлаку на його адгезійну здатність до периклазовуглецевого вогнетриву;

- розробити на основі проведених досліджень методичку розрахунку технологічних параметрів роздування шлакової ванни та конструктивних параметрів багатоярусної фурми, призначеної для керованого перерозподілу крапель з газошлакового потоку між зонами на поверхні футерівки;

- розробити та впровадити інноваційну конструкцію багатоярусної гарнісажної фурми та технологію нанесення шлакового гарнісажу підвищеної стійкості на футерівку конвертера у промислове виробництво.

Предмет дослідження. Гідрогазодинамічні та тепломасообмінні закономірності процесів роздування шлакової ванни та формування шлакового га-

рнісажу на футерівці, способи коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни та напрямку винесення газошлакового потоку, адгезія та умови формування гарнісажного покриття необхідної товщини у визначених зонах робочої поверхні 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 методики та установки для «холодного» і високотемпературного моделювання. Оцінку результатів високотемпературних експериментів дослідження взаємодії шлакових розплавів з вогнетривом проводили з використанням рентгеноспектрального та кількісного хімічного аналізу, фото- та відеофіксацією 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 Лавалю 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 обгрунтований 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 $0,2 \dots 0,8 \text{ Н/м}^2$, 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 Лавалю (з кутом нахилу 17°) та розташованими на відстані у 2,5 м соплами верхнього блоку (з кутом нахилу 115°), 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 ($H_{\text{Ф}}$) 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 шести сопловий наконечник зі згрупованими по три у напрямках цапфених зон соплами Лаваля 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 ДДТУ; міжнародних науково-технічних

конференціях, у тому числі: *проведених в Україні* - Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2014 р., 2015 р., 2017 р., 2018 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., 2019 р.); *проведених у країнах Європейського союзу* - «International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», (Varna, Bulgaria, 2015, 2017); «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід», (Відень, 2017 р.); «Science, Research, Development», (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 науковометричних 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, містить 16 таблиць, 65 рисунків та 4 додатки на 9 сторінках. Перелік посилань на 11 сторінках містить 121 літературне джерело. Загальний обсяг складає 192 стор.

РОЗДІЛ 1

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГАРЯЧОГО РЕМОНТУ ФУТЕРІВКИ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА

1.1 Сучасні технології контролю та відновлення раціонального профілю футерівки робочого простору кисневого конвертера

Інтенсивність зносу футерівки кисневого конвертера впливає на техніко-економічні показники металургійного підприємства, їх відтворюваність та експлуатаційну готовність агрегату. Досягненню високої стійкості футерівки сприяє оптимальний температурний режим процесу, що характеризується достатньою (не дуже низкою) температурою ванни на початку операції, що забезпечує успішне шлакоутворення і відсутність викидів, та обмеженням температури ванни наприкінці плавки (до оптимальної, з точки зору якості сталі) [1-9]. В цілому, підвищенню стійкості периклазовуглецевої футерівки сприяють наступні заходи: заміна руди як охолоджувача металевим брuxтом, що призводить до зменшення кількості та кислотності шлаку, середньої температури ванни в процесі продувки і кількості перегрітих плавок; прискорення формування активного основного шлаку, що дозволяє скоротити тривалість агресивного впливу оксиду кремнію на футерівку; підвищення інтенсивності продувки ванни, що зменшує тривалість контакту вогнетривів зі шлаком і високотемпературним підфурменим факелом; збагачення шлаку оксидом магнію до визначеної межі, що уповільнює масоперенос MgO з вогнетривів до шлаку і міграцію оксидів у пори вогнетриву; забезпечення окисленості шлаків на визначеному рівні, що обумовлено двоякою дією (FeO) на футерівку: позитивною для прискорення шлакоутворення і негативною внаслідок прискорення міграції шлаку у вогнетриви; застосування зондового методу контролю температури і хімічного складу розплаву по ходу продувки без повалки конвертера, що дозволяє довести кількість плавок без додувок до 90-95 %; технічне обслуговування футерівки, у тому числі збагачення оксидом магнію шлаку з наступним його накатуванням на стіни, використання саморозтікаючих сумішей,

торкретування зон інтенсивного зносу торкрет-сумішами та використання методу роздувки підготовленого (модифікованого присадками MgO) кінцевого шлаку на футерівку після випуску з конвертера металевого розплаву (ошлакування).

Сучасні досягнення науки і техніки дозволяють знайти найприйнятніші методи оперативного контролю зносу футерівки, наприклад, на базі лазерної, голографічної або надвисокочастотної техніки. Аналіз результатів лазерного сканування (рис. 1.1) дозволяє визначити місця інтенсивного зносу футерівки та прийняти оперативні заходи для її відновлення.

Нерівномірний не тільки по висоті, а і за перетином конвертера (рис. 1.2, а) знос футерівки визначається комплексним впливом ряду факторів, при цьому в різних місцях поверхні футерівки існують зони переважного впливу будь-якого з них. З метою підвищення ефективності використання футерівки та подовження терміну її експлуатації, зазвичай, використовують «зонну» (диференційовану за типорозмірами та властивостями вогнетривів) схему кладки (рис. 1.2, б).

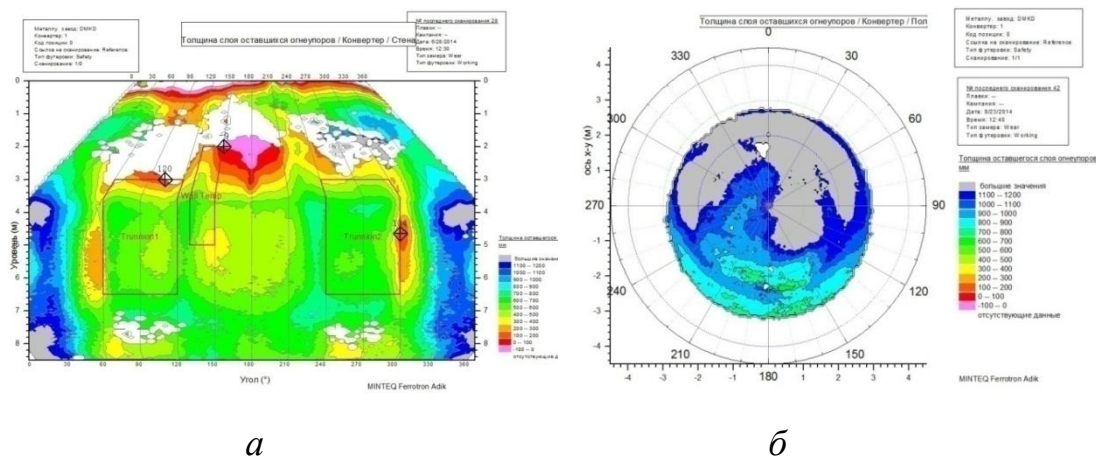


Рис. 1.1 – Остаточна товщина футерівки (а) та вогнетривів днища конвертера (б) за результатами сканування робочого простору конвертера

В цілому, на поверхні футерівки конвертера існують чотири зони, що найбільше зношуються - дві у області цапф і дві - на горловині над цапфами (рис. 1.3).

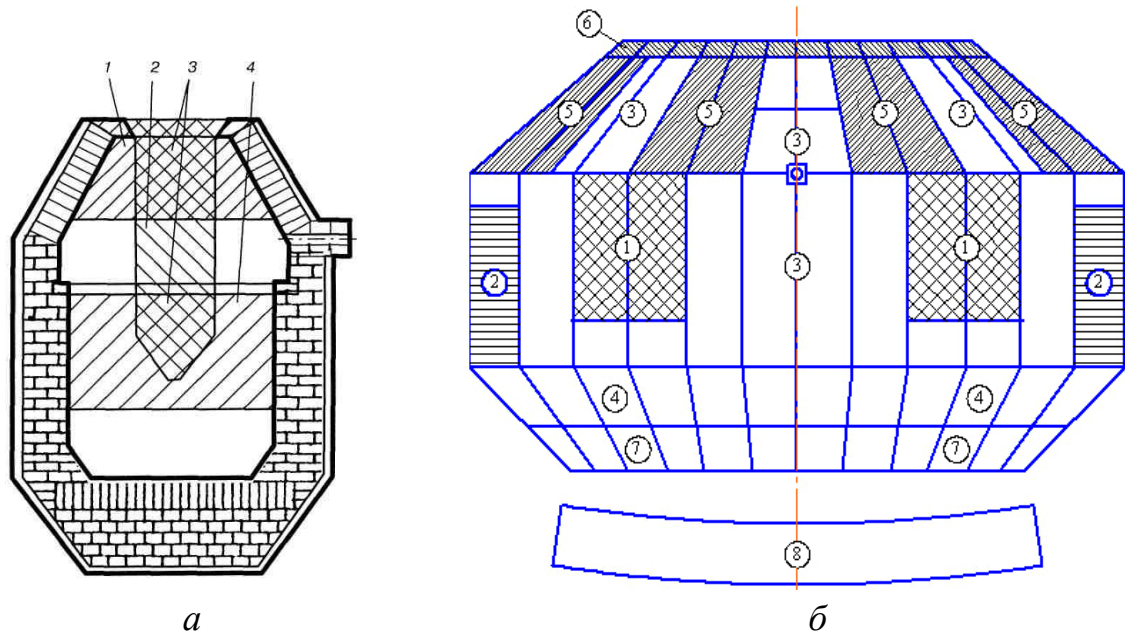
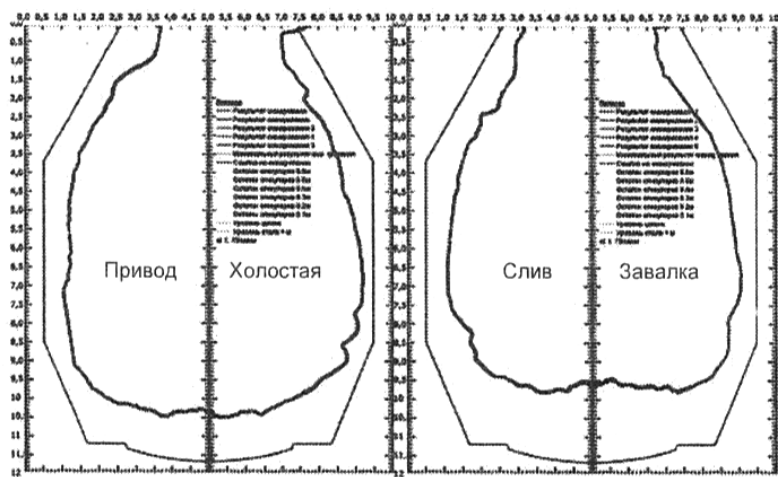


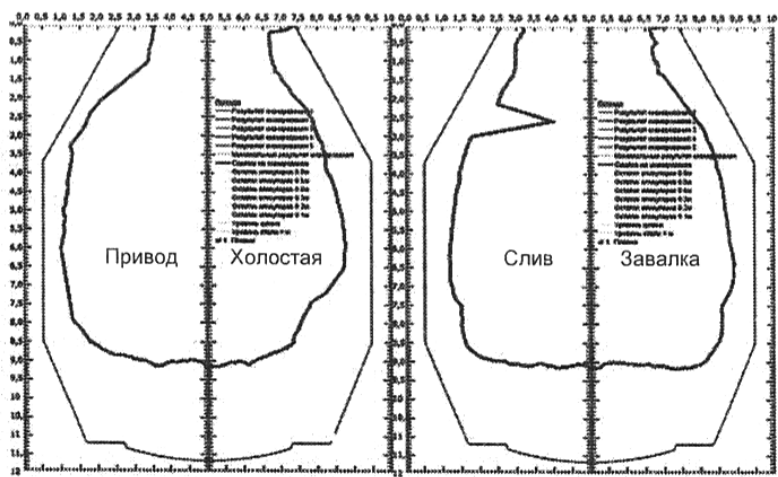
Рис. 1.2 - Зони інтенсивного зносу футерівки конвертерів (а) та схема футерівки конвертера з використанням периклазовуглецевих вогнетривів різних типів за «зонною» схемою (фірми «Фематек» (ФРТ)) (б) [10]: а: 1 - зона дії кисню повітря, що підсмоктується в конвертер під час продувки; 2 - зона футерівки, що не змочується шлаком на повалках конвертера; 3 - зони, що зношуються найбільше; 4 – зона футерівки, що омивається шлаком у процесі продувки; б: 1 – цапфена зона (ANCARBON CX93X, CX73X); 2 – ударна зона скрапу (ANKER CX90X, CX70X, CX30X); 3 – шлакова зона (ANCARBON CX92, CX72, SX32); 4 – нижній конус (ANCARBON SX32, ANKER SX30, ТТ1); 5 – верхній конус (ANKER SX30, ТТ1); 6 – горловина (ANCARBON ВХ13, РВ13, ANKER Т25); 7 – нижній конус в зоні днища (ANKER ТТ1, ТТ8); 8 – днище (ANKER CX90, CX70, SX30, ANCARBON SX32)

Знос футерівки нерівномірний також протягом кампанії - у першій половині вогнетриви зношуються в 1,2-1,5 рази швидше, ніж у другій половині, коли робоча поверхня футерівки внаслідок зносу віддаляється від реакційних зон, а вогнетриви вже пройшли своєрідну термообробку в процесі служби. Вважається [8], що основне значення має той факт, що з цього періоду профіль конвертера найбільше відповідає умовам низькотурбулентної течії шлаку біля вогнетривів. У випадку застосування в другій половині кампанії торкретування, ошлаковування та інших заходів гарячого ремонту футерівки розходження у швидкості зносу стає ще більшим.

На сьогодні існують декілька концепцій експлуатації периклазовуглецевої футерівки конвертерів [10]. До першої («Північноамериканської») відносять



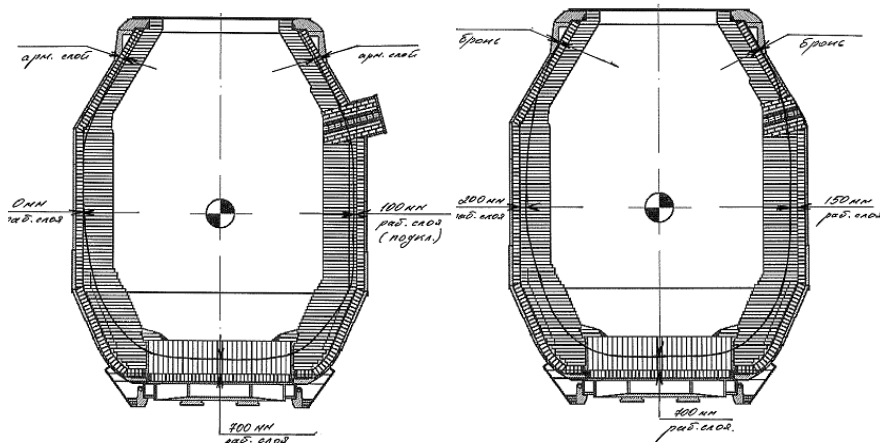
Кампания «А»



Кампания «В»

а

б



в

Рис. 1.3 - Нерівномірність зносу футерівки 300-тонного конвертера (завершення кампанії) з постійним (а), періодичним (б) [8], та 250-тонного конвертера ПАТ «ДМК» (в) з постійним уходом за футерівкою

принцип постійного уходу за футерівкою із забезпеченням максимально можливої її стійкості, до другої – максимізації обсягів виплавки сталі («Європейська») за рахунок мінімального циклу плавки. Стійкість футерівки у першому випадку складає від 10000 до 60000 плавок [8, 11] (на провідних підприємствах КНР, США), другої концепції - 2500-5000 плавок відповідно (таблиця 1.1). Згідно з результатами аналізу [8] для сировинних умов роботи металургійних підприємств України раціональною є стійкість для 300-т конвертерів 4000-5000 плавок, для 160-т – 6000-7000 плавок відповідно.

Таблиця 1.1

Стандартні умови експлуатації кисневих конвертерів (BOF) у Північній Америці (ПА) та Європі [11]

Показник	ПА	Європа
Стійкість футерівки, кількість, тис. плавок	20-35	2,5-5,0
Масова частка MgO в шлаку, %	10-14	2-7
Витрата торкрет-маси, кг/т	0,3-0,7	0,2-0,4
Кількість шлаку, кг/т	70-120	80-120
[P] у чавуні, ppm	300-500	500-1300
[C]x[O]	30-40	20-25
Тривалість виготовлення футерівки, год.	240	150
Тривалість роздувки шлаку, хв.	4	0
Тривалість торкретування, хв.	1,2	0,3
Швидкість торкретування, кг/хв.	100	250
Витрати торкрет-маси, кг/т сталі	0,6	0,4
Ar/N ₂ перемішування	відсутнє	використ.
Цикл плавки від випуску до випуску, хв.	50-70	40-60
Кількість плавок у добу, шт.	18-26	24-36

У рамках «північноамериканської» концепції існують декілька варіантів заходів технічного обслуговування, які застосовують в залежності від зони зносу футерівки [11]: Slag Coating, Slag Washing, Slag Splashing та Patching-Steine (табл. 1.2). За допомогою таких методів, як сплеск шлаків, його намив або піноутворення, шлак на футерівці конвертера утворює захисний гарнісажний шар [12-14]. Гарнісаж зберігається на поверхні приблизно протягом 40-50 % загальної тривалості продувки ванни, швидкість зносу вогнетривів у зонах (рис. 1.1, а), не захищених гарнісажем, майже у 2 рази вища.

Таблиця 1.2

Матриця ремонту футерівки конвертерів з урахуванням капітальних витрат, навантаження обслуговуючого персоналу та металургійного процесу [11]

	Метод	Капітальні витрати на обладнання	Фізичне навантаження обслуговуючого персоналу	Металургійні результати	Верхній конус	Зона удару скрапу	Донний шов	Днище з продувними каменями	Днище без продувних каменів	Зона випуску	Зміна випуску	Цапфи	Нижній конус
Ремонт шлаком	на-сич. Mg O шлак	Ні	Ні	Середні	+	+	+	+	+	++		+	+
	SSp	Ні	Ні	Високі		+	++	+	++ +	++		+	+
	SW	Ні	Ні	Середні		+	++	+	++	++			+
	Вспіювання	Ні	Ні	Середні		+	++	+	++	++		+	+
Ремонт за допомогою вогнетривких матеріалів	Розбрикування: вручну	Низькі	Висока	Низькі	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	маніпулятором	Середні	Середня	Низькі	++	+	++	++	+	++	+		
	автоматичне	Високі	Низька	Низькі	++ +	+	++ +	++ +	++	++ +	+	+	+
	PS	Ні	Низька	Середні	+	+	++		+	+			+

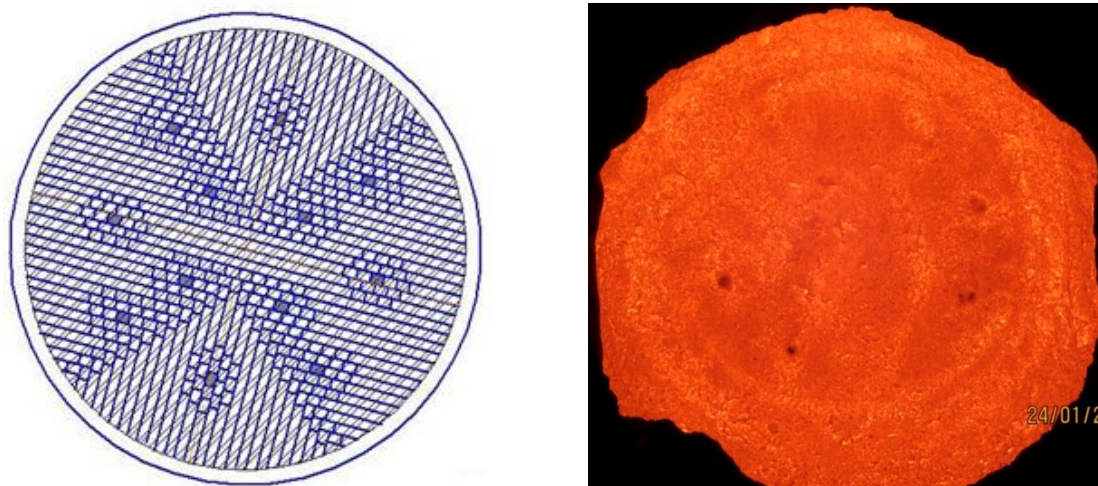
Доцільно (+), добре (++), ідеально (+++), (пусте місце) специфічна зона цим методом не можна обробляти

У якості основного показника, що визначає стан кінцевого конвертерного шлаку, використовують вміст кисню у металі перед його випуском з конвертера [14]. При вмісті кисню менше 0,004% шлак може виявитися недостатньо рідкорухомим для операції роздування; при вмісті кисню 0,004-0,009% - «оптимальним» для роздування, а більш ніж 0,009% - шлак потребує коригування.

З метою збільшення стійкості футерівки, окрім виконання кладки за «зонною» схемою (рис. 1.2, б), запропоновано подальше удосконалення її конструкції. Так, наприклад, на АТ «ЄВРАЗ ЗСМК» використовують футерівку у вигляді виступів з вогнетривів різної стійкості, на ВАТ «Мечел» - розробили високостійку вогнетривку масу для заповнення швів між виробами [15,16]; на ПАТ «Дніпровський меткомбінат» зменшили товщину футерівки, у тому числі з метою підвищення інтенсивності теплообміну.

1.2 Особливості нанесення шлакового гарнісажу на футерівку у конвертерах із комбінованим продуванням ванни

Підвищені вимоги, що пред'являються до вогнетривів кисневого конвертера із комбінованим продуванням ванни, пов'язані як з жорсткістю умов служби, так і з підвищеним зносом донних вставок (рис. 1.4). На відміну від робочого шару футерівки фурмена донна вставка піддається: локальному охолодженню газом, що подається для продування ванни, що створює значний температурний градієнт; руйнуванню перемичок між трубками блоку, яке обумовлено розшаруванням вогнетриву; блокуванню донних продувних вставок внаслідок «закупорення» шлаком (рис. 1.4, б); швидкому зносу, який пов'язаний з витратою і тиском газу, що вдувається; розтріскуванню каналів та ерозії тощо. Умови служби вогнетривів футерівки у конвертерах з верхнім та комбінованим продуванням ванни (киснем зверху та нейтральними газами знизу) відрізняються (таблиця 1.3) [11], при комбінованому продуванні донний продувний елемент має підвищений потенціал зносу.



а

б

Рис. 1.4 – Схема розташування у днищі (а) та вигляд (б) «запечатаних» шлаком донних вставок. Робоча 1 та «запечатана» шлаком 2 донна вставка

Таблиця 1.3

Порівняння умов служби вогнетривів футерівки у конвертерах з верхнім та комбінованим продуванням ванни [11]

Показники	Вдування кисню зверху	Комбінований процес продувки
Особливості	Великий обсяг шлаку Посилене окиснення заліза Високий ризик викидів Слабке перемішування металеві ванни	Швидке утворення шлаку Низький ризик викидів Підвищений вихід рідкого Підвищена гнучкість при рафінуванні розплаву Вдосконалена кінетика ванни
Критичні області інтенсивного зносу футерівки	Зона удару скрапу Зона випуску розплаву Шлаковий пояс Цапфові зони	Зона удару скрапу Зона випуску розплаву Шлаковий пояс Днище агрегату Цапфові зони
Стійкість (плавки)	від 3000 до > 10000 при використанні Slag Splashing	2000-4000 при адаптаційному використанні Slag Splashing
Інтенсивність використання Slag Splashing, %	80-100	10-20
Тривалість обробки Slag Splashing, хв.	5-8	1-3
Необхідне додаткове обладнання	-	Обертвий колектор Магістраль/трубопроводи Продувальні елементи Інертні гази

Slag Splashing при верхньому продуванні використовують практично після кожної плавки протягом тривалого часу, що забезпечує проведення пер-

шого періоду плавки при нанесеному на футерівку захисному гарнісажному шарі.

Процеси з комбінованою продувкою характеризується малою частотою й тривалістю обробки методом Slag Splashing для запобігання утворенню масивних і неконтрольованих скупчень шлаків у донній частини (рис. 1.4, б). За даними [11] якщо донне скупчення шлаку перевищує 150 мм, газ проникає крізь зазор між шлаковим покриттям і поверхнею футерівки, особливо через кутову зону днища і процес донної продувки повністю втрачає свою ефективність.

На сьогодні обсяг інформації стосовно механізму та закономірностей взаємодії газових струменів, що вдувають у шлакову ванну крізь сопла накопичника фурми та потоків газу, що подають крізь донні вставки при роздуванні шлакової ванни, обмежений.

1.3 Механізм та закономірності зносу футерівки у різні періоди конвертерної плавки

Періклазовуглецеві вогнетриви працюють у конвертері у жорстких умовах: окислювальна атмосфера (при температурах вище 600 °С) з одного боку призводить до часткового або повного випалювання вуглецю з робочого шару, з іншого – протікає корозія (хімічна та фізична) внаслідок проникнення шлакометалевого розплаву в тіло вогнетриву крізь пори та канали [17]. Футерівка конвертера руйнується під впливом трьох основних механізмів зносу (термічний, механічний та хімічний), які в різних зонах робочих агрегату проявляються з різним ступенем інтенсивності й пов'язані один з одним.

Дія термічних навантажень на футерівку, що пов'язані з її нерівномірним нагріванням, протіканням екзотермічних реакцій, циклічним нагріванням та охолодженням, режимом продувки призводить до виникнення тріщин.

Під час дії механічних навантажень (у періоди завалки шихти, руху шлаку та металу, повертання конвертера), а також внаслідок недосконалості викладки

вогнетривів, в окремих дільницях (зонах) виникають значні внутрішні напруження та навіть зсув вогнетривів відносно один до одного.

Відносно хімічного механізму, вважають, що процес корозії вогнетривів периклазовуглецевої футерівки протікає за наступною схемою [18, 19]:

- термоокиснення вуглецевого компоненту вогнетриву, яке супроводжується збільшенням розміру пор та розвитком каналної пористості. Процес активізується за рахунок окиснення як киснем повітря (у період розігрівання футерівки), так і киснем дуття у початковий період плавки. У наступні періоди плавки окиснення вуглецевої складової стає можливим за рахунок взаємодії з окислами шлаку (FeO , MnO). Окрім того, можливими є розчинення вуглецю вогнетривів у металевому розплаві та пряма реакція вуглецю виробів з оксидом магнію шлаку, призводить до утворення пористого шару на робочій поверхні та пор-каналів;

- проникнення металошлакового розплаву вглиб тіла вогнетриву по утвореним порам, а також по границям зерен, з протіканням відповідних хімічних реакцій та механо-хімічним пошкодженням його матриці (у тому числі за рахунок реакції MgO вогнетриву зі складовими шлаку);

- розчинення складових компонентів вогнетриву у шлаку в процесі дифузії останнього у вогнетрив з утворенням вторинних силікатів, шпінелідів та т.ін. з подальшим проникненням оновленої рідкої фази по границях зерен;

- вимивання крупних зерен периклазу зі структури (ерозія), що підтверджено дослідженнями складу шлаку на границі контакту з вогнетривом [18].

У ході досліджень зносу MgO -С вогнетривів [20] ідентифіковані зерна оксиду магнію, що відокремилися від вогнетриву і занурені в шлак. Рідкорухомий шлак проникає у внутризернисту силікатну зв'язку спечених і плавлених зерен MgO , прискорює утворення низькотемпературних фаз і полегшує вилучення зерен вогнетриву.

Перехід складових вогнетриву до шлаку є результатом одночасного протікання ланок зовнішнього та внутрішнього масообмінних процесів [21]. При цьому внутрішній масообмін закінчується фізичною та хімічною адсорбцією розчинника, а зовнішній – залежить від характеру руху рідких фаз, що

омивають робочу поверхню вогнетриву. До основних факторів, що впливають на внутрішній масоперенос, відносять пористість та ефективний діаметр пор, концентрацію розчинника перед зоною просочування, градієнт концентрації розчинника, міжфазний натяг та змочуваність.

Тільки при швидкостях руху шлаку менше 0,05 м/с, які мають місце лише на початку плавки, коли швидкість окиснення вуглецю мала, знос вогнетривів залежить від зовнішнього масопереносу. Протягом основної частини продувки ванни знос вогнетривів не залежить від інтенсивності перемішування ванни і ланки зовнішнього масопереносу. Тому важливим завданням є зменшення швидкості масопереносу у шлаку, що можливо за рахунок підвищення його в'язкості, зменшення зони контакту останнього з футерівкою та збільшення крайового кута змочування шлаком.

Розчинення вогнетриву у рідкому шлаку, у першу чергу, проходить через розчинення матричної частини вогнетриву, що розміщена між крупними зернами та складається з компонентів розміром менш ніж 0,1 мм [18]. Швидкість зменшення товщини вогнетриву (V) розглядається як процес розчинення та залежить від масопереносу і може бути описана рівнянням:

$$V = k(n_s - n_b) , \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт масопередачі; n_s , n_b – вміст оксиду на контакті з вогнетривом та у загальному об'ємі шлаку відповідно.

Розчинення складових вогнетриву в шлаку, що стікає по його поверхні зі швидкістю (V_p), визначається як температурним, так і концентраційним чинниками. У дифузійному режимі розчинення вогнетриву може бути описане рівнянням [17]:

$$V_p = \frac{dm}{d\tau} = K_1(C_s - C_o) / D , \quad (1.2)$$

де K_1 - константа, пов'язана з природою системи і температурою; C_s и C_o – концентрація MgO у шлаку при насиченні та об'ємна; D - товщина дифузійного слою у поверхні твердої фази, величина якої залежить від гідродинамічних характеристик розплаву (в'язкості та швидкості руху рідкої фази відносно

твердої поверхні w) $D = K_2 \sqrt{\left(\frac{\eta}{w}\right)}$, де K_2 - константа, що враховує фізичні і хімічні властивості системи «вогнетрив-шлак». Для визначення швидкості розчинення запропоновано використання виразу

$$\frac{dm}{d\tau} = \sqrt{K_3 \cdot w} (C_s - C_o), \text{ де } K_3 = f(K_1, K_2) \quad (1.3)$$

Правомірність представленого теоретичного обґрунтування та наявність наведених вище стадій зносу вогнетрива отримала підтвердження і у роботі [22]. На основі рентгеноспектрального аналізу, залучення оптичної та електронної мікроскопії для дослідження взаємодії між гарнісажем та вогнетривом, встановлені механізми агресивної дії шлаку та визначені мікроструктурні зміни у об'ємі вогнетрива.

На думку авторів дослідження [23] в основі процесу руйнування вогнетриву шлаками електрокапілярні та електрохімічні процеси, які протікають, у значній мірі, у порах та тріщинах останнього. На підтвердження цієї теорії автори наводять дані досліджень [24], у ході яких встановлено, що при пропусканні електричного струму крізь шлак та периклазовуглецевий вогнетрив на поверхні останнього виникає подвійний електричний шар.

Встановлене підвищення стійкості вогнетривів шляхом регулювання розподілу та кількості графіту (сажі, технічного вуглецю), що додають до складу виробів, обґрунтовано його властивостями. Доцільним визнано також введення у склад вогнетривів антиоксидантів, що уповільнюють окиснення вуглецю [23, 25]. Найбільшу стійкість периклазовуглецевих вогнетривів до окиснення встановлено при вводиті до їх складу металевого магнію. Останній легко окиснюється навіть у оточенні графіту при незначному парціальному тиску кисню з утворенням периклазу ($t_{пл} = 3000$ К) вже при температурі у 800 К. Сублімація Mg ($t_{кип} = 1390$ К) у робочому шарі вогнетриву викликає підвищення парціального тиску парів газоподібного магнію та їх переміщення у напрямку поверхні контакту футерівки зі шлакометалевим середовищем. На цій поверхні створені умови для окиснення магнію та утворенню відкладень у вигляді шару вторинного периклазу [21], який запобігає проникненню шлаку у вогнетрив.

За даними [26] глибина інфільтрації середньосного ($B = 2,7$) шлаку у

периклазовуглецевий вогнетрив зі вмістом вуглецю більш ніж 6 мас.% не перевищує 0,5 мм, в той же час для кислих шлаків ($B = 1,0$) цей показник складає 4,0-5,0 мм.

Температура плавлення середньоосновного шлаку підвищується при взаємодії з вогнетривом пропорційно вмісту в останньому вуглецю. Так, при вмісті 6,0 %С вказана температура практично не змінюється, а при 20 %С – підвищується на 120° [26]. Підвищення температури появи низькоосновного шлакового розплаву ($B = 1,7$) менше залежить від підвищення вмісту вуглецю, а кислі шлаки ($B = 0,8-1,0$) при цьому стають більш легкоплавкими.

Глибина проникнення шлаку у вогнетрив може бути визначена за виразом [18]

$$L = \frac{\sigma \cdot d \cdot \cos\theta}{2 \cdot \eta} t, \quad (1.4)$$

де L – глибина проникнення, м; σ - поверхневий натяг рідкого шлаку, Н/м; d – діаметр пори, м; θ - крайовий кут змочування, град.; t – час, с.

Важливим фактором, що впливає на глибину проникнення шлаку, є його в'язкість, яка у процесі взаємодії компонентів шлаку та вогнетриву змінюється. Підвищення в'язкості, по мірі проникнення останнього вглиб вогнетриву, пов'язано з насиченням розчиненими оксидами вогнетриву. Більш глибоке проникнення можливе тільки за рахунок дифузії крізь в'язкісний бар'єрний шар. Внаслідок цього, вогнетрив стає достатньо стійким до впливу навіть шлаку, який не повністю насичений вогнетривками оксидами.

Внаслідок проникнення шлакометалевого розплаву крізь пори у вогнетриві протікають зміни, що закінчуються утворенням робочої зони на границі шлак-вогнетрив [26]. Проникнення окисленого ($\text{FeO} > 20\%$) шлаку, з крайовим кутом змочування $< 10^{\circ}$ у вогнетрив при температурах вище 1400°C протікає у в'язкісному режимі, який лімітується не капілярним тиском, а в'язкою течією розплаву у порах [27]. В той же час, поверхня графіту не змочується шлаковим розплавом (крайовий кут змочування більше 90°), що термодинамічно унеможлиблює капілярне проникнення шлаку у вуглецьвміщуючий матеріал. Проникнення шлаку у вогнетрив полегшується зі зменшенням поверхневого

натягу та крайового кута змочування (менше 90 град), збільшенням діаметру пор та каналів.

Зміна швидкості переходу оксидів магнію з вогнетривів футерівки конвертера до шлаку та межа розчинності MgO у шлаках по ходу конвертерної плавки наведена на рис. 1.5.

Залежність інтенсивності зносу футерівки від ступеня насиченості шлаку оксидом магнію наведена на рис. 1.6.

Для зменшення хімічного впливу на футерівку шлак повинен знаходитись у області насичення MgO. У цьому разі відбувається гальмування масо-переносу MgO з периклазовуглецевої футерівки до шлаку, шлак буде насичуватись MgO з розчиненням присадженого флюсу, тим самим запобігаючи хімічному зносу футерівки.

Оцінкою впливу температури металу, основності та окисленості шлаків на межу насиченості оксидом магнію показано (рис. 1.7) [25, 26], що на протязі основного часу продувки ванни цей показник визначається переважно температурою металу та основністю шлаку (особливо у області температур більш ніж 1500 °C). Визначено, що на початку продувки при вмісті (MgO) 9,1% ступінь його перенасиченості сягає 1,3, у середині продувки - підвищується до 1,4 при середньому вмісті (MgO) 10,3%, а наприкінці продувки при (MgO) 15,1% - складає 1,73.

У роботі [30] досліджений неоднозначний вплив основності (CaO)/(SiO₂) на розчинність оксидів магнію. Fe₂O₃ пов'язує MgO у ферити, тим самим знижуючи активність оксиду магнію і підвищуючи його розчинність.

(FeO), з одного боку, збільшує частку вільного кисню і, відповідно, активність MgO, що має зменшити розчинність. Але, з іншого боку, іони Fe²⁺ концентруються, головним чином, в RO-підсистемі, зменшуючи іонну частку катіонів магнію і, відповідно, активність MgO. В цілому, для шлаків конвертерної плавки характерно збільшення розчинності MgO з підвищенням вмісту оксидів заліза.

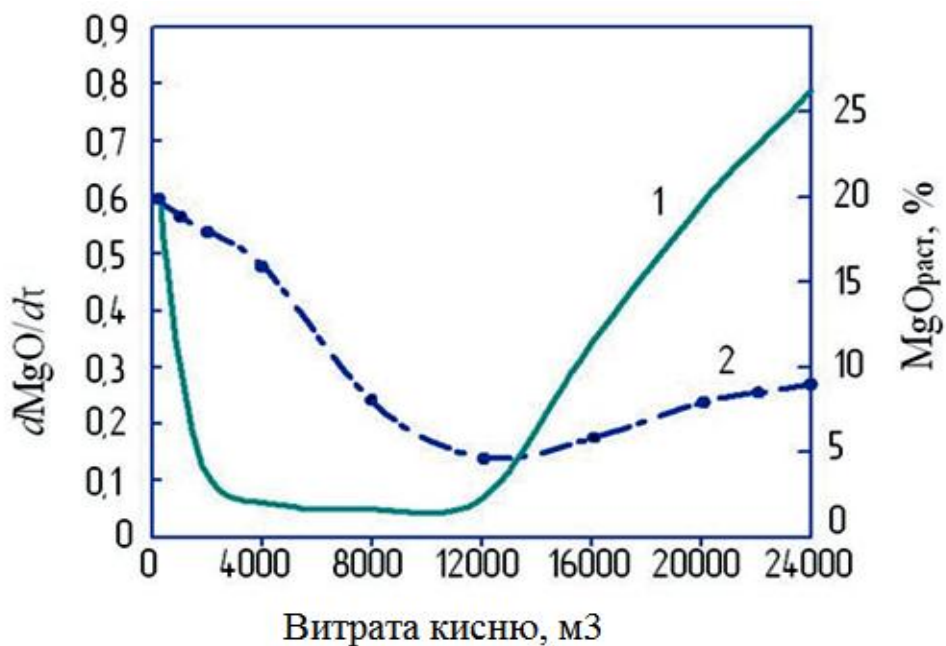


Рис. 1.5 - Зміна швидкості переходу оксидів магнію з вогнетривів футерівки конвертера до шлаку (1) та межа розчинності MgO у шлаках (2) по ходу конвертерної плавки [28].

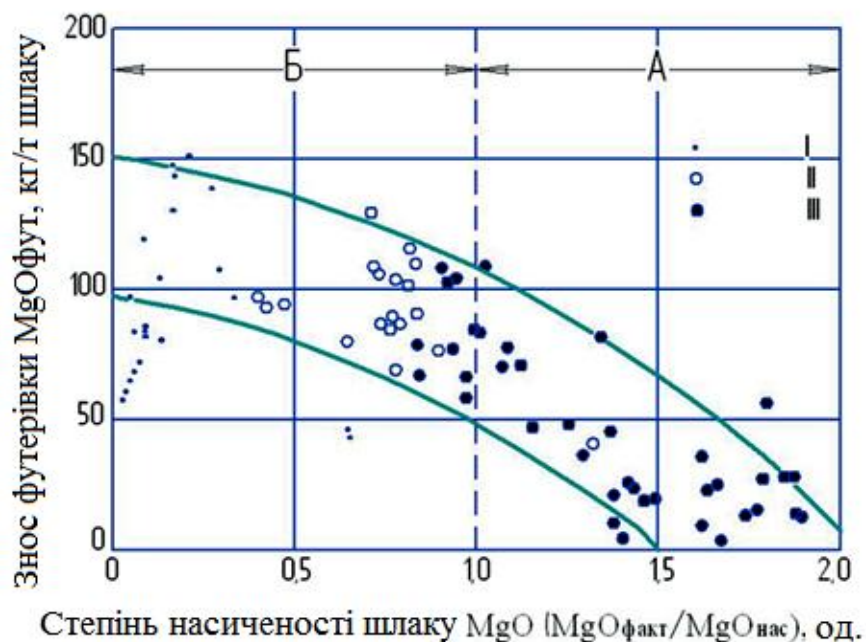
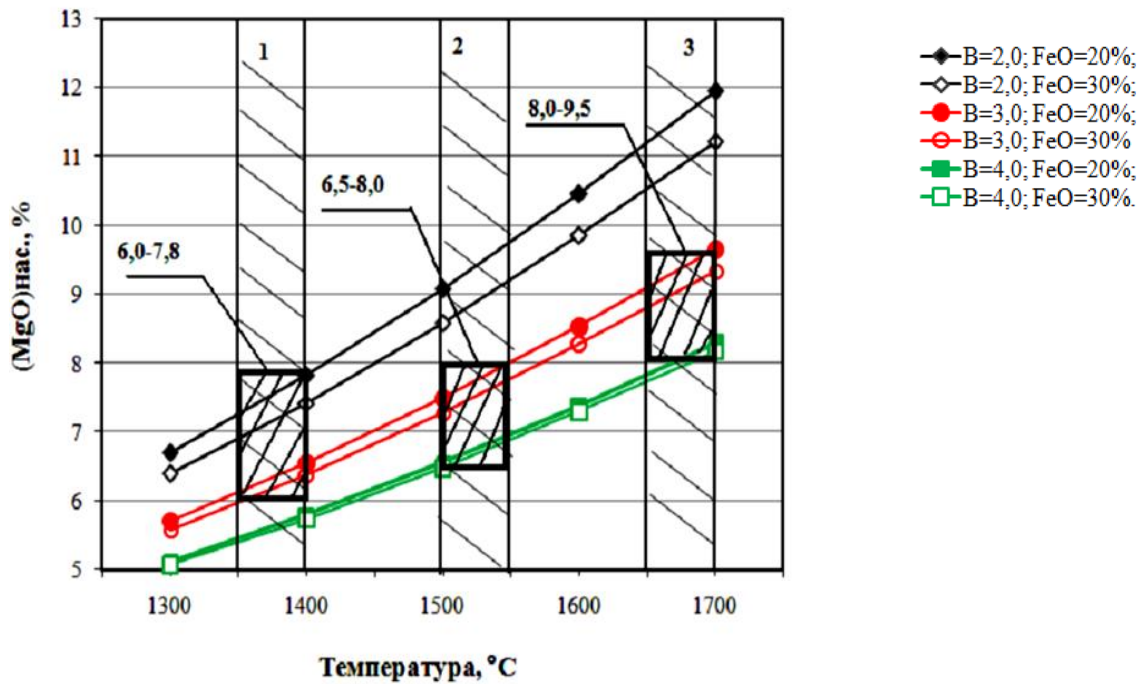


Рис. 1.6 - Залежність інтенсивності зносу футерівки від ступеня насиченості шлаку оксидом магнію



Періоди продувки: область 1 – перший (20-30% тривалості продувки);
2 – основний (60-70%); 3 – заключний (71-100%) відповідно

Рис. 1.7 – Вплив температури металу, основності та окисленості шлаку на концентрацію насиченості шлаку MgO за періодами продувки [29]

Із підвищенням основності більше 2,5 (у другому періоді плавки) зростання (FeO) сприяє розчиненню оксиду магнію, незважаючи на стає зростання основності за рахунок засвоєння вапна. Кальцій та магній співіснують у шлаку у вигляді складних феритів за наявності тривалентного заліза. Надлишковий кальцій може переходити у RO-систему, зменшуючи активність MgO. Це не дозволяє зменшити розчинність MgO тільки за рахунок підвищення основності шлаку.

Відповідно до рекомендацій авторів [29] для формування шлаків з зменшеною агресивною дією на футерівку та збереженням високих рафінуючих властивостей на початку продувки у діапазоні температур (T) 1350-1400 °C та основності шлаку (B) 2,0-3,0 од. концентрацію магнію у шлаку достатньо підтримувати на рівні 6,0-7,8 %, у середині продувки ($T=1500-1550$ °C; $B=3,0-4,0$ од.) – на рівні 6,5-8,0 % та наприкінці продувки ($T=1650-1700$ °C; $B=3,0-4,0$ од.) – на рівні 8,0-9,5 % відповідно.

Автори роботи [31] для вказаних вище періодів продувки конвертерної ванни пропонують дотримуватись наступних концентрацій (MgO) 6,5-7,5 %; 7,0-8,0 % та 11-13 % відповідно при ступеню перенасиченості шлаку оксидом магнію до 1,5.

З використанням запропонованих Бабенко А.О. моделей, заснованих на даних [33, 44] отримані діаграми концентрацій насиченості MgO для шлаків системи CaO-FeO-SiO₂, що містять 7% MnO, 0,3% P₂O₅, 4% Al₂O₃ при 1550 та 1650⁰C (рис. 1.8). Відмічено суттєвий вплив основності шлаку та практичну відсутність впливу (FeO) на концентрацію насичення MgO. Визначено, що у період плавління при температурі 1550 ⁰C, основності 2,0-2,5 та окисленості шлаку 20-30% достатнім є підтримання концентрації MgO на рівні 7,5-9,2%, а у окислювальний період при температурі 1650 ⁰C, основності 2,5-3,0 та окисленості шлаку 30-40% - 8,2-9,5% MgO відповідно.

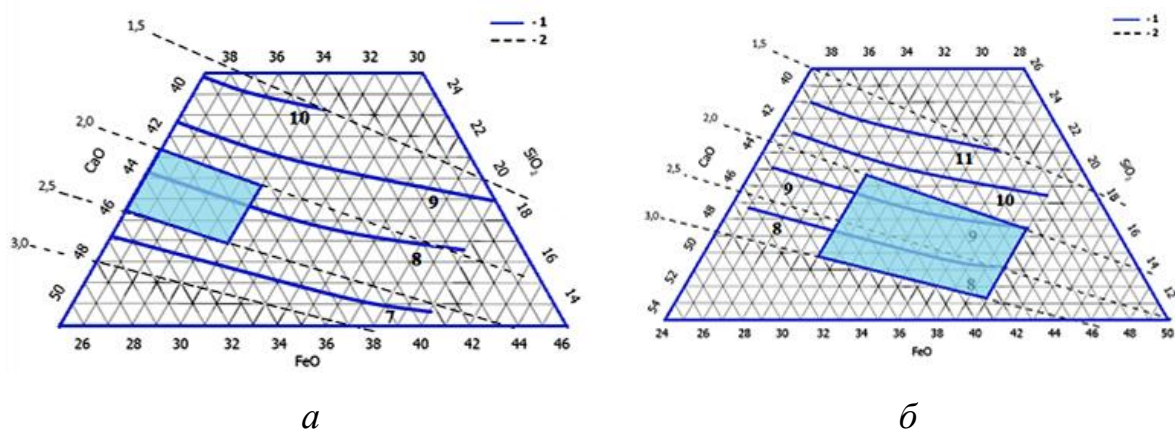


Рис. 1.8 - Діаграма концентрації насичення MgO шлаків системи CaO-FeO-SiO₂ при 1550 ⁰C (а) та 1650 ⁰C (б) відповідно. 1 – концентрація насичення MgO; 2 – основність шлаку

Підвищена концентрація насичення MgO (20-25%) для шлаків початкового періоду плавки визначається за діаграмою стану системи CaO-MgO-FeO_x-SiO₂ (рис. 1.9), наведеною у роботі [32].

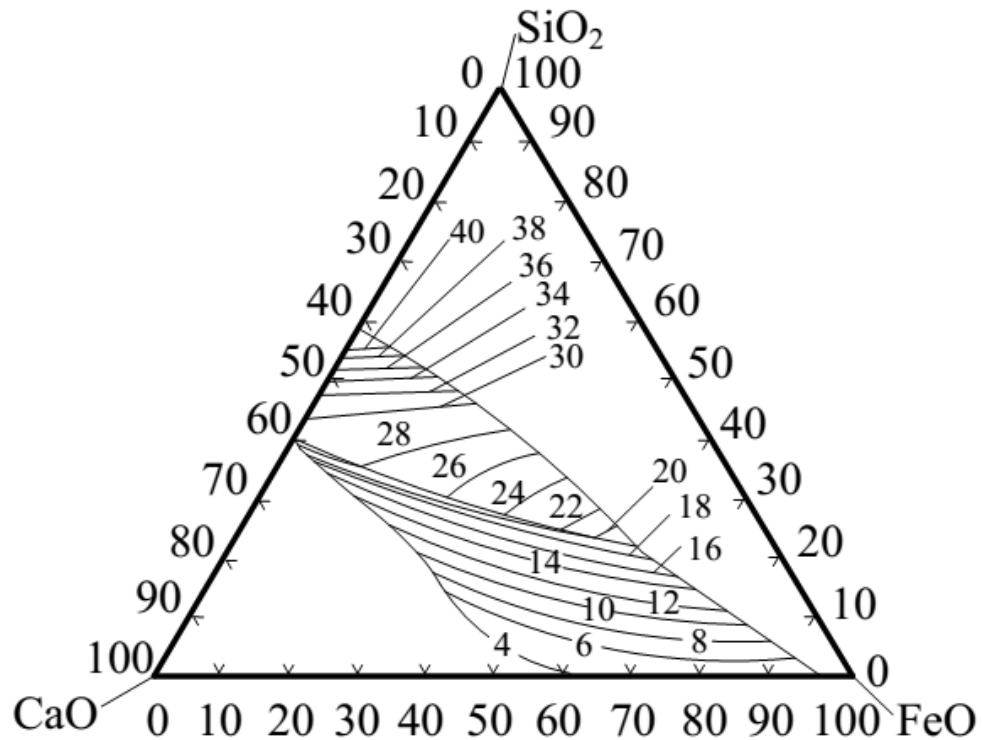


Рис. 1.9 – Діаграма стану системи $\text{CaO-MgO-FeO}_x\text{-SiO}_2$ у рівновазі із залізом, у проекції на потрійну крайову діаграму при температурі $1600\text{ }^\circ\text{C}$

У цей період такі оксидні системи здатні розчинити додатково ще 8-14 %MgO. У середині продувки забезпечується формування шлаків з концентрацією MgO, наближеною до області насичення, а наприкінці – до області пере-насичення магнезівюститом (до 9 %MgO) (рис. 1.9).

Розрахунок розчинності MgO для промислових шлаків, отриманих при продуванні низькомарганцовистого чавуну у КЦ ВАТ «ММК» [38], який виконано з використанням полімерної моделі шлаків [39], наведений на рис. 1.10.

Відомо також [40], що шлак, вже насичений твердою фазою, не може руйнувати вогнетрив, що складається з тієї ж фази. Іншими словами, швидкість корозії зменшується з підвищенням кількості MgO у шлаку при раціональному вмісті та співвідношенні $(\text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{FeO})$ (рис. 1.11).

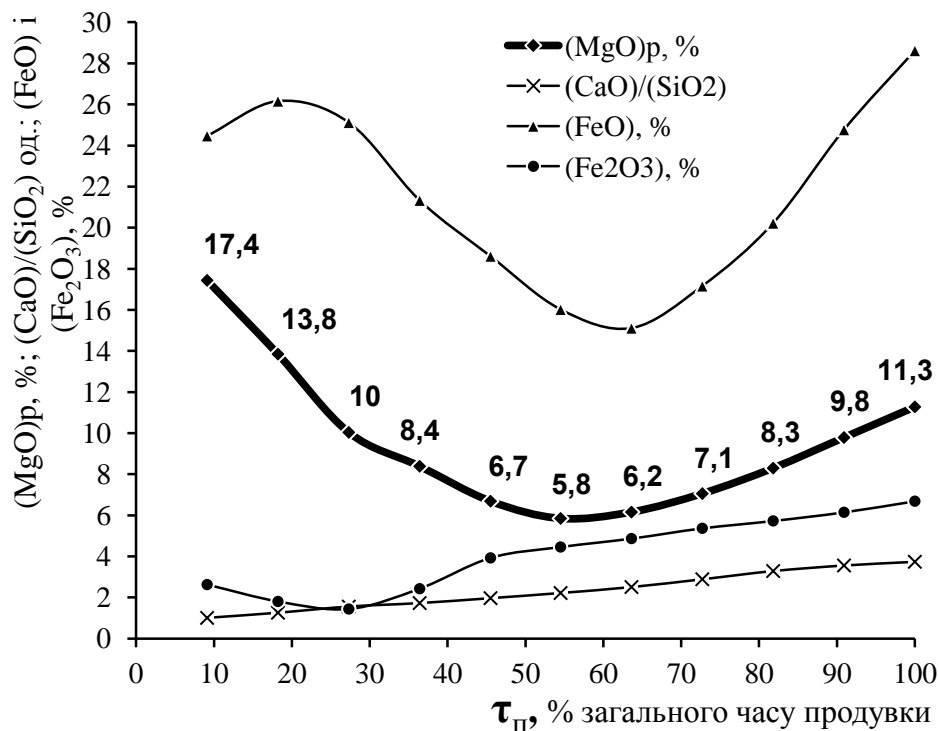


Рис. 1.10 – Зміна межі розчинності оксиду магнію у шлаку $(MgO)_p$ по ходу продувки чавуну у 370-т конвертерах. Числа поряд з точками – температура металу по ходу продувки, °C

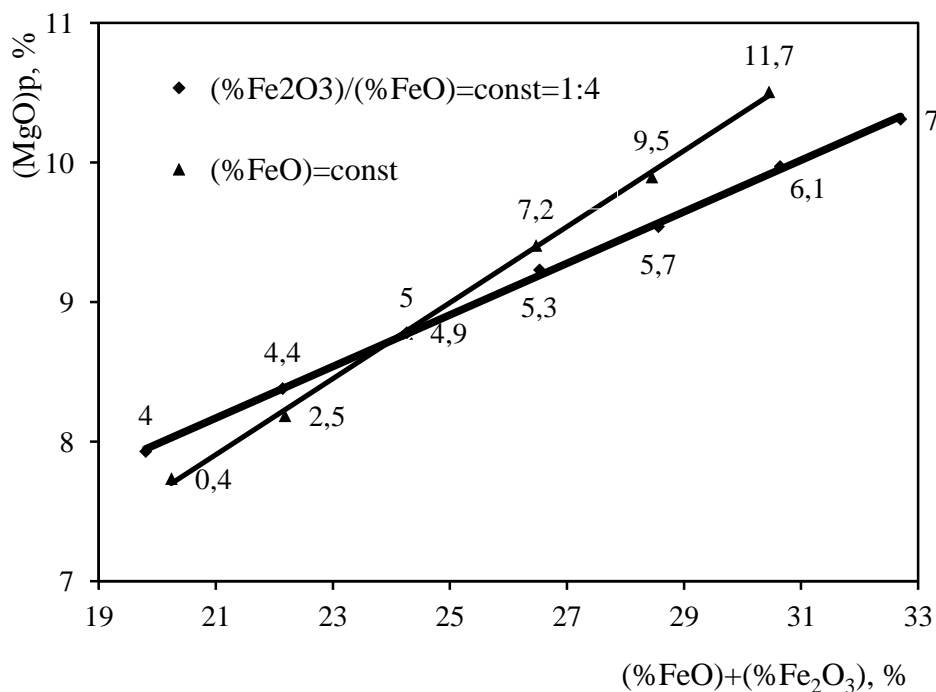
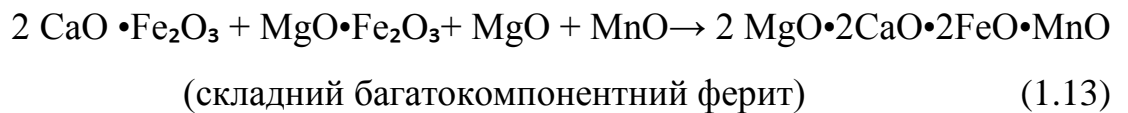


Рис. 1.11 – Зміна межі розчинності оксиду магнію у шлаках в залежності від вмісту оксидів заліза при температурі 1650°C та основності шалку 3,0. Цифри у маркерів – вміст Fe_2O_3 у шлаку [40]

Так як в'язкість шлаку підвищується при насиченні його твердими частками, що вимиваються з футерівки, критичне значення температури плавлення постійно зростає та можна очікувати, що проникнення шлаку у пори вогнетриву припиниться, коли температура футерівки стане нижчою ніж температура плавлення шлаку, збагаченого компонентами вогнетриву.

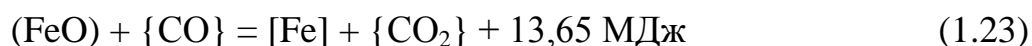
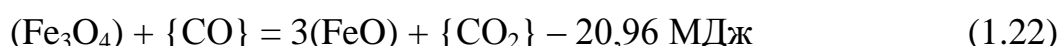
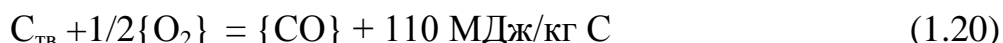
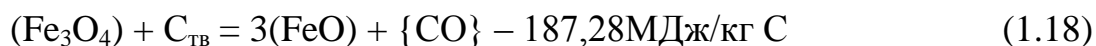
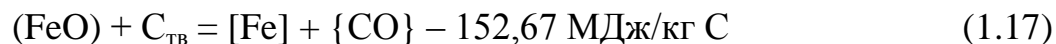
Автори роботи [41], стверджують, що легкоплавкі фази з підвищеним вмістом FeO сприяють адгезії шлаку до вогнетриву, а тугоплавкі фази – забезпечують опір ерозії та тепловий.

У конвертерному шлаку можливі наступні основні хімічні реакції [29]:



За результатами дослідження адгезії шлаків різного хімічного складу до вогнетривів конвертера [42], показана можливість адгезії шлаку до часток MgO в MgO-C футерівки, при цьому не виявлені реакції між частками MgO в зразках футерівки і шаром нанесеного шлаку. Проте виявлений газовий проміжок на поверхні розділу між цим шаром шлаку і MgO-C матрицею футерівки та виявлені гранули заліза в шарі шлаку при високому вмісті FeO.

Поряд з реакціями (1.5-1.16) у окислювальній атмосфері робочого простору конвертера та на границях контакту метал-шлак- MgO вогнетрив можуть протікати також реакції [29] (наведені значення зміни енергії Гіббса визначені для середньої температури конвертерного процесу 1873 К):



Відновлене за реакціями (1.17, 1.23) залізо проникає у зерна MgO та прискорює утворення магнієвого вюститу. Нова фаза знижує вогнетривкість зерен оксиду магнію та забезпечує непряме розчинення його зерен у відповідності із механізмом так званої пасивної корозії. Використання емпіричних моделей, наприклад Шурмана та Колма, Парка та Лі, Квонга з колегами та діаграм Преторіуса та Карлайла для розрахунку концентрації насичення (B_i) шлаку оксидом магнію, дозволило [18] розрахувати так званий «корозійний потенціал» шлаку.

Встановлена поява у зернах периклазу мікрогранул заліза розміром 0,1-0,8 мм по закінченню плавки [43] може свідчити на користь відновлювальної атмосфери у тріщинах та порах вогнетриву по ходу його роботи. При цьому, в вогнетривах з невеликим вмістом вуглецю (5,5-6,5 %) спостерігається поява рідкої фази внаслідок проникнення та взаємодії шлакового розплаву з невеликими зернами периклазу. При вмісті у вогнетриві більш ніж 9 % вуглецю рідка фаза не утворюється, що може бути пояснене захисною дією відсутності змочування поверхні графіту шлаковим розплавом.

Визначено [45], до прикладу, що для конвертерів КЦ ПАТ «Дніпровський меткомбінат», за умов використання на плавку доломітизованого вапна, наприкінці плавки цей показник складав 8,2-9,3%, що і обумовлює підвищену, у порівнянні з іншими підприємствами України, стійкість футерівки, але ви-

кликає певні ускладнення при веденні плавки з точки зору десульфурзації сталі, що корелює з відомими даними [46].

Для умов роботи 250-т агрегатів киснево-конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» (у період з 2008 по 2016 рр.) у ході виконання даного дисертаційного дослідження [45] було також встановлено, що підвищення температури шлаку при відповідному збільшенні (FeO) і зменшення в'язкості шлаку в процесі проведення додувок має істотніший вплив на зменшення стійкості футерівки конвертера, ніж перепади температур при охолодженні футерівки під час поточних простоїв (рис. 1.12).

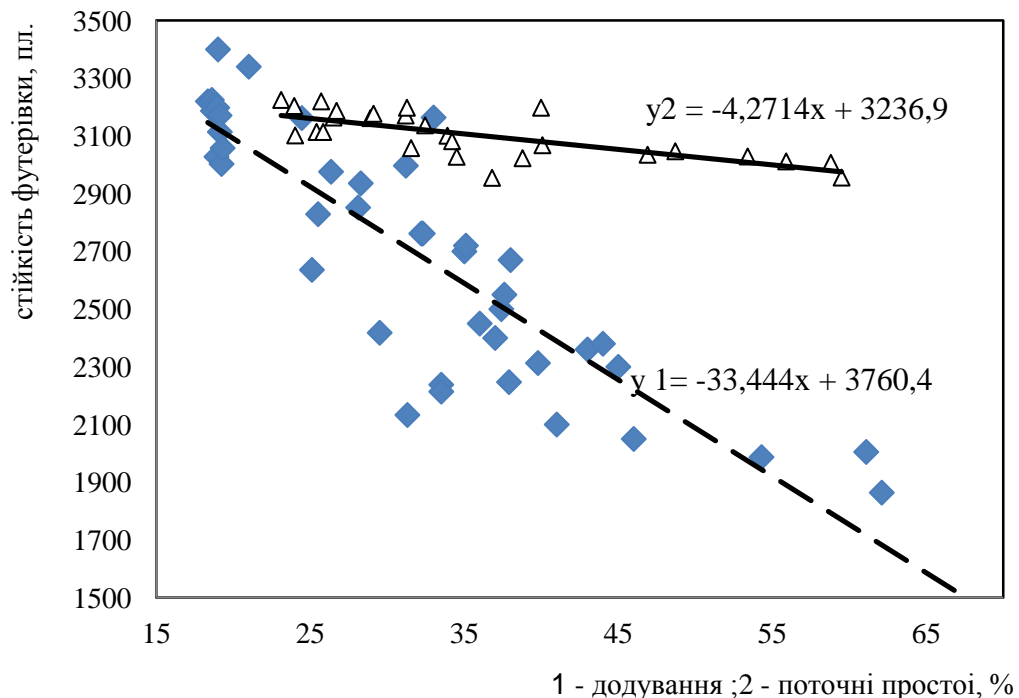


Рис. 1.12 - Залежність стійкості футерівки кисневого конвертера від кількості додувок (1) та простоїв агрегату (2)

1.4 Підготовка шлаку до роздування та механізм формування гарнісажного шлакового покриття на периклазовуглецевих вогнетривах

1.4.1 Підготовка конвертерного шлаку до роздування на футерівку

Згідно з висновками [47] діапазон оптимальних складів шлаку, що забезпечує найкращі умови роздування шлаку для нанесенням шлакового гарні-

сажу, наступний, %: CaO 45-50; SiO₂ 10-13; MgO 9-11; FeO 19-22 при основності шлаку в межах 3,0-3,4. Обґрунтування цих вимог наведено у роботі [5].

Показано, що конвертерний шлак, який містить більше 48 % CaO при 6-8 % MgO, не здатен забезпечити формування стійкого до зносу гарнісажу на футерівці, внаслідок знаходження на 90 % в зоні насичення CaO. Такі шлаки містять значну кількість CaO·Fe₂O₃ та 2CaO·Fe₂O₃ з температурою плавлення 1215 °C і 1440 °C відповідно. Підвищення вмісту MgO в шлаку до 10 % при зниженні CaO до 41,8 % перед роздуванням дозволяє змістити склад шлаку до області насичення MgO, з високотемпературною фазою MgO·Fe₂O₃ (1750 °C) і серією твердих розчинів оксидів магнію і заліза з температурою плавлення близько 2000 °C. Частка магнезіофериту і магнезіовюститу в цьому випадку сягає 15-25 %, а легкоплавкої фази і CaO·Fe₂O₃ скорочується до 3-7 %.

Таким чином, формування термостійкого шару забезпечується досягненням раціонального хімічного складу шлаку, насиченого MgO, наявністю високотемпературної фази MgO-Fe₂O₃ та твердих розчинів із різними пропорціями MgO та FeO (з температурою плавлення на рівні 2000 °C).

Дуттьовий і шлаковий режими конвертерної плавки при використанні магнезіальних флюсів повинні забезпечувати: прискорене розчинення присадок магнезіальних флюсів з підтриманням в шлаку MgO на визначеному для даного періоду рівня насичення при одночасному забезпеченні необхідних фізико-хімічних властивостей шлаку; спокійній без викидів та винесення характер продувки ванни у режимі «занурених» кисневих струменів при розташуванні рівня спіненої шлакометалевої емульсії вище торця наконечника фурми; формування на завершальній стадії продувки максимально насиченого MgO гарнісажного шлаку з необхідною рідкорухомістю для проведення ефективного роздування останнього на стіни конвертера та формуванням високо-стійкого гарнісажу.

На практиці такий режим організувати досить складно, особливо в разі потреби видалення сірки та фосфору до необхідних концентрацій по ходу продувки.

Присадка до шлаку спеціально розроблених магнезіальних флюсів є найбільш ефективним методом уповільнення швидкості зносу футерівки і модифікування шлаку перед роздуванням на футерівку.

На сьогодні у якості модифікаторів шлаку застосовують: озалізоване доломітизоване вапно (72,0-83,6 %CaO, 3,0-3,8 %SiO₂, 8,9-11,8 %MgO, 2,7-2,9 %Fe₂O₃) [49]; озалізований доломітовий флюс (ОДФ) (59,5-59,9 %CaO, 3,8-4,1 %SiO₂, 31,2-31,8 %MgO, 3,4-3,9 %Fe₂O₃) [44]; озалізований вапняно-магнезіальний флюс (ВМФ) (49-51 %CaO, 1,5-4,0 %SiO₂, 31-34 %MgO, 1,0-1,5 %Fe₂O₃); флюс озалізований магнезіальний (ФОМ) (80-90 %MgO, 1,5-3,0 %CaO, 1,5-3,5 %SiO₂, 6,0-8,0 %Fe₂O₃) [48]; саморуйнівні гранули (СМГ) різного складу (70-85 %MgCO₃ і Mg(OH)₂, до 10 %C, до 11 %Fe₂O₃) [44]; флюс магнезійний брикетований (ФМБВЖ) (78-82 %MgO, 1,5-5 %CaO, 1,5-3,5 %SiO₂, 4-8 %Fe₂O₃, 4-8 %C) [29]; брикети доломітові вуглецьвміщуючі (БДВ) (15,5 %MgO, 48,0 %CaO, 10,2 %C, 5,0 %SiO₂) [29] та ін.

Введення магнезіальних модифікаторів дозволяє синтезувати вогнетривку фазу, по-перше, в умовах підвищеної окисленості шлаку, та, по-друге завдяки добавкам, що вводять до складу модифікаторів. Швидкість засвоєння флюсів залежить, в основному, від процесів дисоціації карбонатів кальцію і магнію, що входять до складу флюсу, наявності тугоплавких зв'язуючих та втрат при прокалюванні. За рахунок розкладу гідрокарбонатів і гідроксиду магнію при температурах 421-444 °C флюси, що містять такі складові, оптимально підходять для застосування у якості флюсів для роздування шлаку.

До найважливіших переваг використання магнезіальних флюсів відносять [29]: зменшення швидкості зносу периклазовуглецевих футерівок; сприяння більш ранньому початку процесу шлакоутворення і «вапнякового кипу» в сталеплавильних агрегатах; прискорення процесу розчинення у сталеплавильних шлаках оксиду кальцію у присутності оксиду магнію; підвищення активності розчиненого у шлаці оксиду кальцію, у результаті «зв'язування» оксидом магнію частини оксиду кремнію.

Внесення додаткової кількості MgO з флюсом «Компакт» сприяє утворенню високотемпературних фаз в шлаку і насичення його бульбашками $\{CO\}$, що сприяє кращому роздуванню з витратами меншої кількості енергії і формуванню більш вогнетривкого гарнісажу [29]. Наявність легкоплавких з'єднань в структурі брикетів МГФ, ФМБВЖ, ФОМ дозволяє їм розчинятися у шлаковому розплаві швидше ніж іншим маркам із одночасним забезпеченням рідкорухомості шлаку.

Аналіз наведених вище даних та досвіду використання магнезійно-вміщуючих матеріалів для коригування складу шлаків дозволив сформулювати підхід [38] до їх раціонального застосування: введення легкоплавких магнезійно-вміщуючих матеріалів у завалку або на першому етапі продувки ванни з метою компенсації високої розчинності у початковому періоді плавки; додаткове введення в період 60-80 % продувки з метою компенсації підвищення розчинності оксида магнію наприкінці продувки ванни; введення швидкорозчинних магнезійних флюсів у період роздування азотом шлакової ванни з метою формування високомагнезійного шлаку (більше 11 % MgO).

Разом з тим, необхідно відзначити і недоліки використання магнезійних флюсів для коригування фізико-хімічного стану шлаку:

- CaO , що міститься у ІМФ-30, під впливом атмосферної вологи в процесі транспортування флюсу гідратує, що призводить до зниження міцності флюсу, а високий вміст в шлаку MgO досягається тільки на кінцевій стадії продувки конвертерної ванни;

- використання ФОМ, веде до погіршення шлакоутворення, особливо при виплавці середньо- і високовуглецевих сталей. Відсутність у складі ФОМ оксиду кальцію змушує використовувати його тільки сумісно із іншими магнезійними флюсами;

- має місце інтенсивне зниження температури ванни на кінцевій стадії операції при використанні СМГ, а також труднощі індивідуального підбору модифікатора з огляду зміни умов ходу плавки;

- внесення додаткової кількості сірки і водню в розплав при використанні брикетів ФМБВЖ на зв'язці з сірчаноокислим магнієм ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$);

- інтенсивне поглинання тепла шлаку на дисоціацію карбонатів при використанні БДВ з повним припиненням вильоту бризок шлаку [50] та т. ін.

Таким чином, необхідно знаходити компроміс між стабілізацією зношування вогнетривкої футерівки й металургійними вимогами.

Необхідно відмітити також, що збільшення вмісту MgO до 8-14 % по ходу операції шляхом розосередженої присадки магнезійних шлакоутворюючих матеріалів супроводжується погіршенням ходу продувки і рафінуючих властивостей шлаку через зростання його в'язкості, що негативно позначається на кінетиці дефосфорації і десульфурації розплаву, сприяє розвитку явища «згортання» шлаку; засвоєння окисду магнію шлаком (при вмісті в ньому 20-25 %FeO) складає приблизно 50 %, а інша частина MgO присутня у шлаку у вигляді твердої фази, що підсилює гетерогенність останнього; на поверхню футерівки переноситься від 30 до 50 % початкового об'єму шлакової ванни [51], а залишок - кантується в шлакову чашу, що супроводжується нераціональним використанням магнезійних шлакоутворюючих матеріалів, що присаджують; виробництво магнезійних присадок вимагає наявності виробничих площ і широко застосовуються практично скрізь підвищує енергоємність і собівартість металу, що виплавляється.

У різні періоди відпрацювання та удосконалення технології ошлакування футерівки роздуванням шлаку для модифікування останнього у конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський МК» використовували [45], кг/т сталі: магнезитовий порошок (0,7-2,28), подрібнені відпрацьовані вогнетриви (0,1-1,1), магнезійні флюси (0,04-0,67) у формі гранул та магнезійні добавки ФДФ та ОДФ-К (12,8 та 20,0 кг/т відповідно). Встановлено, що введення по ходу конвертерної плавки добавок ФДФ та ОДФ-К призводило до зменшення основності шлаку на 0,29-0,37 од., підвищення питомих витрат чавуну на 3-4 кг/т сталі та вмісту S у металі на повалці на 0,002 % при збільшенні вмісту MgO у шлаку, у середньому, лише на 0,53-0,31 % на 1 т добавки.

У зарубіжних технологіях, що направлені на забезпечення підвищення (MgO), у якості добавок, зазвичай використовують кускові м'якообпалений доломіт та доломітизоване вапно з витратою 15-30 кг/т сталі при витраті зви-

чайного вапна 30-50 кг/т [5, 6]. До недоліків вказаних способів можна віднести те, що отриманий шлаковий гарнисаж має гетерогенну структуру, вміщує незасвоєні шлаком вкраплення кускових присадок, які легко вимиваються в процесі плавки, що додатково зменшує стійкість гарнисажного покриття.

Окрім того, необхідно відмітити, що у відповідності з молекулярною теорією шлаків [52], використання у початковий період конвертерної плавки (в умовах низької основності шлаків) доломіту та його аналогів призводить до утворення легкоплавких MgO-вміщуючих силікатів (монтичеліт $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, з температурою плавлення 1430°C та мервініт $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ (1575°C)). Оксиди заліза у цей період взаємодіють з MgO з утворенням магнезіофериту (1713°C) та магнезіовюститу, при цьому виникає втрата частини CaO як рафінуючого агента, а MgO підвищує в'язкість шлаку, Одночасно, з підвищенням основності шлаку понад 2,0 у період повного розчинення вапна оксид заліза (Fe_2O_3) знаходиться у вигляді легкоплавкого двокальцієвого фериту $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (з температурою плавлення 1449°C) (рис. 1.13). Тут також протікають реакції заміщення феритів магнію на ферити кальцію, а силікати – утворюють з'єднання $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ та $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Таким чином, загушення шлаку при введенні оксиду магнію у основний період плавки не досягається. Утворення основних фаз у шлаках пояснюють наступним чином [29]. Якщо уявити, що шлак складається з позитивно і від'ємно заряджених іонів (катионів металів: Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} ; аніонів: O^{2-} , SiO_4^{4-} , FeO_2^- , Al_2O_3), то енергію взаємодії іонів між собою можна виразити, керуючись енергіями електростатичного потенціалу катионів металів, представляючого собою відношення заряду до радіусу іонів.

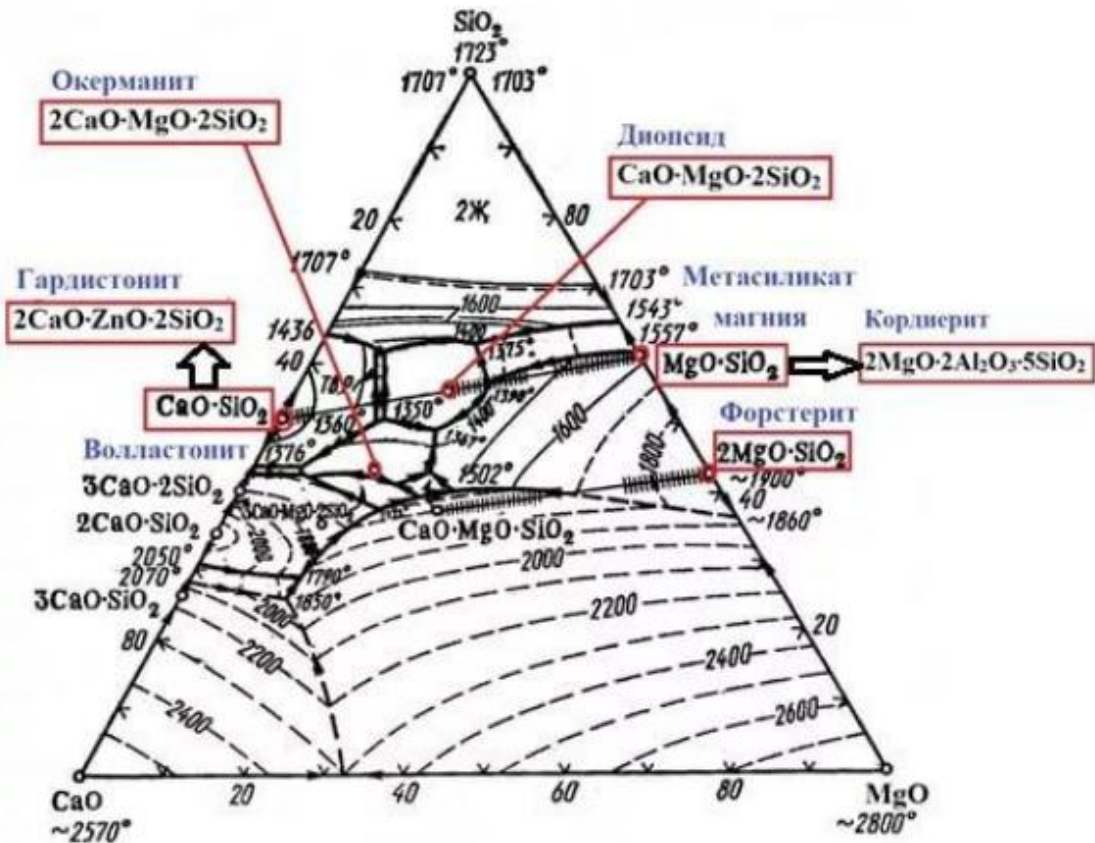


Рис. 1.13 – Діаграма стану системи MgO-CaO-SiO₂ [29]

Отже, значення електростатичного потенціалу катионів зростає у наступному рядку Ca²⁺ - Mn²⁺ - Fe²⁺ - Mg²⁺. Тому катиони з великим потенціалом Fe²⁺, Mg²⁺ будуть притягувати до себе сильні і малі за розмірами аніони O²⁻ (утворення магнезівюститу, магнезіофериту, гематиту і магнезиту), а великі за розмірами SiO₄⁴⁻ і слабкі FeO₂⁻, AlO₂⁻ будуть групуватися навкруги найбільш слабких катионів Ca²⁺ (утворення ранкініту, феритів Ca, браунмілериту).

Засвоєння MgO флюсів конвертерним шлаком протікає за наступною схемою [29]: периклаз – озалізнений периклаз – магнезівюстит – магнезіоферит – складні багатокомпонентні ферити. Підтверджено [29], що розчинність MgO у шлаку визначається хімічним складом останнього та температурою.

Виходячі з умов мінімізації шлакової корозії та неприпустимості загушення шлаку, необхідним є досягнення $(\text{MgO})_{\text{НАС}}$ за якої температура ліквідусу шлакового розплаву буде відповідати температурі ведення конвертерної плавки.

В той же час необхідно відмітити, що підвищення концентрації MgO в шлаку по ходу продувки впливає на процеси десульфурзації (η_s) і дефосфорзації (η_p) розплаву. З підвищенням основності шлаку η_s зростає до максимальної величини, яка залежить від вмісту MgO , високий η_s (6-7) досягається при вмісті MgO 3,1-5,0 % і основності 3,4-3,9. При збільшенні вмісту MgO до 9-10% величина η_s зменшується на 1,0-2,0. З підвищенням вмісту MgO в кінцевому шлаку від 2,5 до 9,5 % вміст фосфору збільшується з 0,007 до 0,009 %. Згідно з [34] в ненасиченої області (до 8 % MgO) CaO і MgO є рівноцінними дефосфораторами, а в області насичення оксиди MgO поступаються оксидам CaO . На думку [35] погіршення η_p сталі в області MgO в шлаку (понад 8%) пов'язано тільки з фізичними властивостями шлаку - підвищенням його в'язкості і зменшенням реакційної здатності. Продувка ванни під такими шлаками супроводжується підсиленням винесення металу з конвертера, необхідності використання додаткової кількості розріджувачів шлаку, утворенням шлакометалевих настилів на фурмі, горловині конвертера та металевих конструкціях газовідвідного тракту, зменшенням виходу рідкого [36, 37].

Намагання швидко насичити шлак оксидами магнію призвело до розробки різних способів введення порошкоподібних матеріалів у шлакову ванну [53]. Так, з метою застосування для підготовки кінцевого шлаку донних фурм у конвертерах з комбінованим продуванням ванни, запропоновано струменями стислого повітря [54], які вдувають у шлак одночасно знизу та зверху зустрічними потоками, наносити на футерівку суміш, що містить кінцевий шлак та вогнетривкий матеріал (вапно, доломіт, магнезит).

1.4.2 Особливості нанесення та формування шлакового гарнісажного шару на футерівці конвертера

Необхідно відмітити, що незважаючи на відпрацьовані способи підготовки шлаку до роздування, нерівномірний розподіл по поверхні футерівки нанесеного гарнісажного шару, переокислення шлакової ванни із зменшенням його густини та стіканням гарнісажу по поверхні футерівки не сприяють формуванню стійкого покриття заданої товщини.

Для формування зносостійкого гарнісажного шару на поверхні периклазовуглецевої футерівки конвертерів недостатньо йти тільки шляхом підвищення концентрації MgO в шлаку. Основне завдання полягає у формуванні в кінцевих твердих шлаках високої частки високотемпературних феритних фаз (магнезіоферриту та магнезіовюститу), які виконують роль цементуючої зв'язки між мікрочастинками периклазу із зменшенням до мінімуму (не більше 5%) концентрації низькотемпературних фаз (феритів кальцію) [55].

Утворення гарнісажного шару проходить умовно у три етапи [56]:

- течія нанесеного роздуванням шлаку по поверхні футерівки;
- явища, що пов'язані з адгезією шлаку до вогнетриву;
- твердіння та кристалізація нанесеного шлакового шару.

По ходу роздування модифікованого конвертерного шлаку краплі останнього переносяться зворотнім газошлаковим потоком на поверхню вогнетривів з формуванням контактного шару. При попаданні на поверхню футерівки з температурою 1460-1490 °С контактний шар шлаку (з температурою 1530-1580 °С) та малою теплопровідністю (0,7-1,2 Вт/(мК)), який стікає по поверхні, охолоджується та формує підкладку (настиль) для нарощування гарнісажу.

Адгезія шлаку до вогнетриву відбувається внаслідок дії капілярних сил, при цьому головна роль відводиться змочуванню поверхні рідким шлаком. Стійке з'єднання між шлаком та футерівкою досягається у результаті дії по-

верхневих сил. Для найбільш ефективного формування шлакової кірки необхідною умовою є зниження в'язкості шлаку у момент його роздування.

З іншого боку, при охолодженні шлакового розплаву в останньому збільшується об'ємна частка твердої фази, а втрата рухомості трапляється коли об'ємна частка останньої переходить через рубіж, необхідний для її перколяції (50-55%), з утворенням твердого каркасу [57] у розплаві шлаку.

Таким чином, причиною утворення гарнісажного шару можна вважати тепловий потік крізь вогнетрив до зовнішнього оточуючого середовища від шлакової плівки, що стікає по поверхні футерівки. По ходу зменшення тепловідведення внаслідок збільшення товщини гарнісажного шару швидкість зростання настилі уповільнюється та дорівнює нулю у момент, коли підведення тепла з боку розплаву до фронту кристалізації дорівнює відведенню тепла до корки. Після цього розпочинається стадія розплавлення корки, її товщина зменшується. Закінчується процес коли товщина корки дорівнює нулю, після чого теплова взаємодія вогнетриву з розплавом шлаку приймає вигляд звичайного конвективного теплообміну рідини з твердою стінкою.

До особливостей гарнісажного шару відносять те, що його товщина не може бути вільно обраною, а визначається інтенсивністю тепловіддачі від розплаву шлаку до поверхні вогнетриву. Товщина гарнісажного шару залежить від часу, відведеного на операцію його нанесення, температури та теплоти твердіння шлаку, температурного поля та теплового опору футерівки. Показано також [57], що швидкість зносу футерівки, при нанесенні гарнісажу, зменшується пропорційно зменшенню її залишкової величини з одночасним збільшенням товщини гарнісажного шару.

Внаслідок того, що тепловіддача від розплаву шлаку до гарнісажу здійснюється шляхом конвекції, то єдиним способом збільшення товщини останнього є раціональна організація руху розплаву зі зменшенням при цьому швидкості його у поверхні футерівки [22].

Відомо [29], що основні рідкі шлаки за температур сталеплавильних процесів приблизно 1600 °C мають уявну в'язкість приблизно у 10 разів бі-

льшу за в'язкість рідкої сталі. Наявність твердих часток у зваженому стані у шлаці може забезпечити його гетерогенність та уповільнення течії по футерівці конвертера. Згідно з даними [44] наявність твердої фази у шлаку у кількості до 30% зменшує в'язкість гетерогенного шлаку одночасно дозволяючи йому розтікатися по футерівці. В'язкість основних конвертерних шлаків збільшується з підвищенням змісту CaO і особливо MgO. Істотно підвищується в'язкість шлаку, за наявності в ньому нерозчинених часток розміром 10^{-3} - 10^{-2} мм, що викликають значне збільшення внутрішнього тертя. У основному шлаку такими частками можуть бути кристали MgO, CaO, Cr₂O₃.

За даними [58] протягом більшої частини продувки шлак знаходиться у гетерогенному стані. При цьому, по ходу продувки його в'язкість зменшується з 0,96 до 0,1 Па·с. Вплив твердих часток на в'язкість, у такому випадку, проявляється у вигляді порушення рівномірного розподілу градієнта швидкості в об'ємі останнього, що призводить до збільшення градієнта дисипації енергії еквівалентному підвищенню в'язкості шлаку [58]. Крім того, в'язкість конвертерного шлаку слід розглядати у комплексі з температурою його ліквідусу.

Враховуючи результати досліджень [22, 29, 44, 55-58] та наведені вище дані можна зробити наступні висновки:

1. Уповільнення корозійного руйнування футерівки конвертерів обумовлено наближенням активності MgO шлаку до активності MgO футерівки, а запобігання зносу останньої може бути забезпечено за умов насиченості основного шлаку магнезією, підвищенням в'язкості шлаку та утворенням стійкого шлакового гарнісажу на поверхні вогнетриву [59].

2. Інтенсивне переміщення шлаку з безперервним оновленням його складу на границі контакту шлак-вогнетрив за умов відсутності захисного гарнісажного шару підвищує швидкість розчинення вогнетриву. Вагомих результатів з підвищення стійкості футерівки можливо досягнути лише при пересиченні шлаку MgO до 8-12 % наприкінці продувки. Такі шлаки містять

значну кількість дисперсної твердої фази, яка надає шлаку здатність утворити стійке гарнісажне покриття.

3. На хід шлакоутворення та показники стійкості футерівки суттєво впливають фізико-хімічні властивості магнезійних флюсів або магнезійно-новміщуючих матеріалів. Забезпечити швидке насичення шлаку оксидом магнію у визначені періоди продувки конвертерної ванни можливо шляхом вдування крізь верхню фурму у кисневих струменях порошкоподібних матеріалів (м'якобпаленого доломіту або каустичного магнезиту). При використанні такого способу, за даними [60] інтенсивність зносу футерівки зменшується настільки, що зникає необхідність у торкретуванні останньої.

4. Необхідно обмежувати до раціональних значень кількість тугоплавких фаз у кінцевому конвертерному шлаку з метою запобігання його окомкування, що здатно зменшити адгезію останнього до вогнетриву або призвести до відшарування гарнісажного шару. В той же час, необхідним вважається наявність у шлаку, що роздувають на футерівку, визначеної частки феритів магнію з температурою плавлення вище 1750°C .

5. Доцільним можна вважати введення до складу рідкої шлакової ванни тугоплавких погано розчинних часток визначених розмірів, для збільшення внутрішнього тертя та запобігання стіканню плівок рідкого шлаку по поверхні вогнетриву.

1.5 Математичне моделювання гідрогазодинаміки роздування шлаку та тепломасообміну при формуванні шлакового гарнісажного покриття на футерівці конвертера

Експериментальні дослідження шлакової корозії та динаміки зміни товщини вогнетриву, особливостей гідрогазодинаміки та тепломасообмінних процесів, що протікають при роздуванні шлакової ванни та формуванні шлакового гарнісажного покриття на її поверхні у різні періоди кампанії конвертера, обмежені високими температурами та вартістю постановки та прове-

дення таких досліджень. Більш доцільним є використання для такого роду досліджень математичного моделювання.

На основі викладених вище фізико-хімічних уявлень та статистичних даних (лазерного сканування футерівки у період експлуатації) авторами роботи [61] запропонована математична модель та програмне забезпечення для опису шлакової корозії периклазовуглецевого вогнетриву. Можливість опису динаміки фаз, що взаємодіють (азот, шлакові краплі, гарнісаж, вогнетрив тощо) дозволяє дослідити закономірності перебігу процесів у поєднанні з результатами фізичного моделювання та розробити раціональні варіанти проведення операції роздування шлаку на футерівку.

У роботах [62, 63] запропоновані варіанти підходів до опису теплового стану футерівки та гарнісажного шару та виконані розрахунки зміни температури крапель шлаку та зони контакту газових та газопорошкових струменів з ванною. Опис динаміки газорідного середовища при роздуванні шлаку, представлений у роботі [64], являє собою сполучене завдання гідрогазодинаміки у багатофазному середовищі з рухомими границями розділу фаз. Визначений орієнтовний розподіл товщини гарнісажу за висотою конвертера (від 35 мм у днища до 2 мм у горловини). В той же час, у моделі процеси формування та кристалізації гарнісажного шару представлені у спрощеній формі та не враховують фізико-хімічного стану шлакової ванни.

Для моделювання газодинаміки при роздуванні шлаку у 160-т конвертері «ЄВРАЗ НТМК» [29] використали середовище ANSYS Fluent, а кристалізації гарнісажу - програмний комплекс FLUENT - призначений для вирішення завдань механіки рідин і газів. Встановлено, що при недостатньому насиченні шлаку оксидом магнію (менше 6%) і значній залишковій товщині футерівки (більше 800 мм) шлак при роздуванні зберігає текучі властивості і може не втриматися на стінках конвертера. Згідно з розрахунками, мінімально необхідна температура плавлення шлаку, щоби в ньому почалася кристалізація, становить 1530 °С.

Використання програмного комплексу FLUENT дозволило у роботі [65] дослідити гідрогазодинаміку шлакової ванни при її роздуванні та визначити вплив розташування фурми, інтенсивності вдування азоту та густини шлаку на розподіл його крапель по поверхні футерівки.

Необхідно відмітити, що при постановці та вирішенні вказаних вище завдань не було враховано вплив розташування та кути нахилу сопел наконечника фурми, зміну фізичного стану та хімічного складу шлаку (крайовий кут змочування, в'язкість тощо), що зменшує цінність отриманих результатів для перенесення на промисловий агрегат та потребує удосконалення відповідних моделей.

До напрямків подальшого розвитку математичних моделей, придатних для досліджень гідрогазодинаміки у робочому просторі конвертера та тепло-масообмінних процесів у системі «шлак-вогнетрив» можна віднести врахування впливу кутів нахилу сопел Лавалю та зміни положення наконечника фурми на розподіл газошлакового потоку у робочому просторі агрегату, форми та розміщення утворених на стінах агрегату шлакових «плям», перенесення результатів моделювання у тривимірний простір з врахуванням геометрії промислового кисневого конвертера, впливу зміни фізико-хімічного стану шлакової ванни по ходу роздування та товщини футерівки по ходу кампанії конвертера тощо.

1.6 Дуттьові пристрої для роздування шлакової ванни на футерівку кисневого конвертера

Промислова реалізація технології нанесення шлакового гарнісажу заданої товщини на визначені зони на футерівці, у тому числі з метою коригування профілю робочого простору конвертера, можлива в разі застосування спеціальних гарнісажних фурм, що здатні забезпечити:

- формування шлакових крапель з необхідними властивостями безпосередньо в реакційних зонах впливу газових струменів на шлаковий розплав з

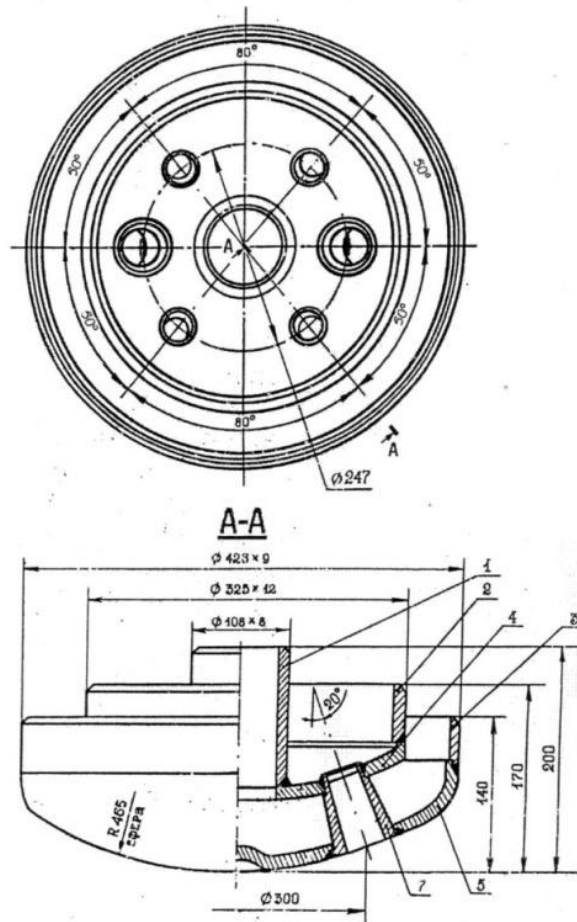
винесенням крапель у відбитому від поверхні ванни або днища крапель з їх наморожуванням на стіни конвертера;

- перенаправлення частини газошлакового потоку у визначені, найбільш зношені зони на футерівці агрегату з забезпеченням утворення на останніх гарнісажного шару підвищеної товщини.

Спеціальні гарнісажні фурми здатні забезпечити виконання різноманітних завдань: насичення шлакової ванни оксидом магнію за рахунок додавання у газовий потік порошкоподібних матеріалів; перенаправлення частини газошлакового потоку у верхні горизонти футерівки конвертера [53]; умовно рівномірний розподіл крапель шлаку з газошлакового потоку по поверхні футерівки за рахунок використання декількох десятків додаткових циліндрових сопел на стовбурі фурми [64]; розосередження газових потоків на поверхні шлакової ванни шляхом подачі газових струменів з основних та додаткових сопел наконечника [53] та т.ін.

Відомі конструкції спеціальних гарнісажних фурм, призначених виключно для роздування шлакової ванни. Так, до прикладу [67] на вихровий потік газошлакової суміші впливають хвилевим енергетичним полем, що збуджується при витіканні струменів газоподібного нейтрального продувального агенту. Конструкція фурми відрізняється складністю у виготовленні, приклади її використання не відомі.

Наконечник спеціальної гарнісажної фурми, що використовували у конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» з 2006 року (рис. 1.14, а) має 2 симетрично розміщених в напрямку цапф конвертера сопла Лаваля з критичним і вихідним діаметрами сопел 43 мм і 49 мм відповідно; 4 додаткових сопла Лаваля з $d_{кр}=37$ мм та $d_{вих}=43$ мм відповідно.



a



б

Рис. 1.14 - Конструкція (а) та вигляд (б) 6-ти соплового наконечника водоохолоджуваної гарнісажної фурми з згрупованими по три соплами Лавалля: 1, 3 - патрубки подачі та відводу охолоджувальної води; 2 - патрубков подводу азоту; 4, 5 - верхня та нижня чаші; 6, 7 - вкладиші з соплами Лавалля $d_{\text{вих}}=43$ мм та $d_{\text{кр}}=37$ мм відповідно

До основних недоліків використання спеціальної гарнісажної фурми (рис. 1.14) можна віднести: втрати з винесенням невеликих за розмірами фракцій модифікаторів шлаку через горловину конвертера; втрати коштовних магнезійних флюсів із залишками модифікованого шлаку, який скачує з конвертера у шлакову чашу після завершення операції ошлакування, ускладнення у забезпеченні нанесення гарнісажу у зони зносу – сектори між конусною та циліндровою частиною агрегату [68].

Позитивного результату при нанесенні шлакового гарнісажу на футерівку 350-т конвертерів ВАТ «ЗСМК» отримано [69] при використанні водоохолоджуваної гарнісажної фурми (рис. 1.15, з наконечником діаметром 325 мм зі дворядним розташуванням 12-ти різноспрямованих сопел: 4-х донизу на шлакову ванну та 8-ми орієнтованих вгору).

У ході дослідно-промислової кампанії плавок на 160-т конвертерах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» була перевірена [70] також працездатність конструкції водоохолоджуваної гарнісажної фурми (з наконечником діаметром 219 мм з дворядним розташуванням 4-х сопел Лаваля ($d_{кр}=34$ мм) і восьми циліндричних ($d_{ц}=6$ мм)). Необхідно відмітити, що за результатами проведення операцій роздування встановлені певні ускладнення у нанесенні гарнісажу на футерівку у площинах перетину основного та додаткових газових потоків.

Запропонована у патенті [67] конструкція фурми непридатна до використання у промислових умовах внаслідок неможливості забезпечення належного імпульсу газових струменів, придатних для формування газошлакового потоку, внаслідок багаточисельності основних та додаткових сопел.

Випробувані конструкції як водо-, так і газоохолоджуваних торкрет-гарнісажних фурм [70]. Так, в умовах киснево-конвертерного цеху №2 ВАТ «ЗСМК» випробувана конструкція водоохолоджуваної торкрет-фурми (з діаметром наконечника 426 мм) з блоковим варіантом розміщення різних за конструкцією і призначенням сопел [71] (рис. 1.16).

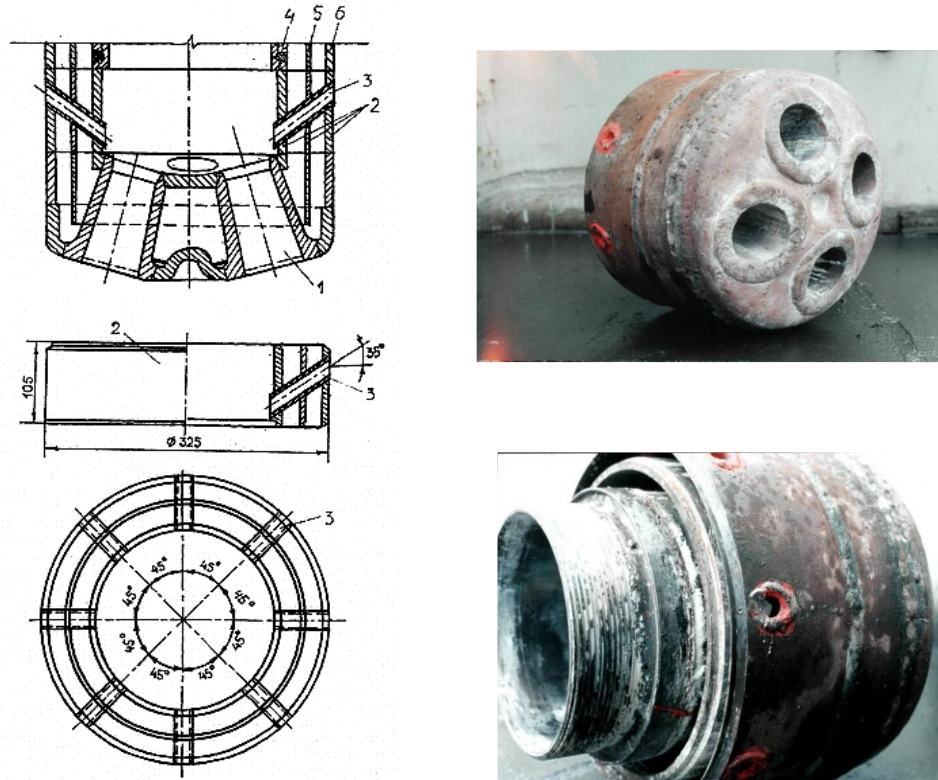


Рис. 1.15 – Водоохолоджувана фурма ВАТ «ЗСМК» з дворядним розташуванням сопел [69]: 1 – сопло Лаваля; 2, 5, 6 – труби; 3 – циліндричне сопло; 4 – сальниковий ущільнювач



Рис. 1.16 – Наконечник багаторувної торкрет-гарісажної фури ВАТ «ЗСМК» [69]

Позитивний досвід в умовах конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» отримано також при використанні для нанесення на футерівку шлакового гарнісажу оригінальних обертових торкрет-гарнісажних та газопорошкових гарнісажних фурм [72] (рис. 1.17).

Удосконалення способу суміщення підготовки шлаку з одночасним його роздуванням на стіни було досягнуто за рахунок використання обертової торкрет-фурми з кільцевими соплами Лаваля типу «труба у трубі» (рис. 1.18) [72]. У такому варіанті при роздуванні непідготовленої шлакової ванни азотними струменями здійснюється подача порошкоподібної торкрет-маси (необпаленого доломіту) у повітряних струменях безпосередньо у об'єм ванни.

До найбільш придатної для вирішення комплексу завдань з формування та підтримання належного фізико-хімічного стану шлакової ванни по ходу її роздування на футерівку можна віднести запропоновану у [73] конструкцію фурми та спосіб роздування шлаку (рис. 1.19).

У такому варіанті за допомогою обертової газопорошкової фурми роздування шлаку здійснюють шляхом вдування у шлак крізь сопла наконечника фурми окремих груп нейтральних та слабоокислювальних газопорошкових струменів при перемінній висоті фурми.

Необхідно відмітити, що для стабілізації динаміки фаз та дуттьового режиму конвертерної плавки необхідною умовою залишається забезпечення симетричності робочого простору кисневого конвертера у незалежності від періоду кампанії агрегату по футерівці, якого не вдалося досягти при використанні наведених на рис. 1.14-1.19 конструкціях наконечників фурм.

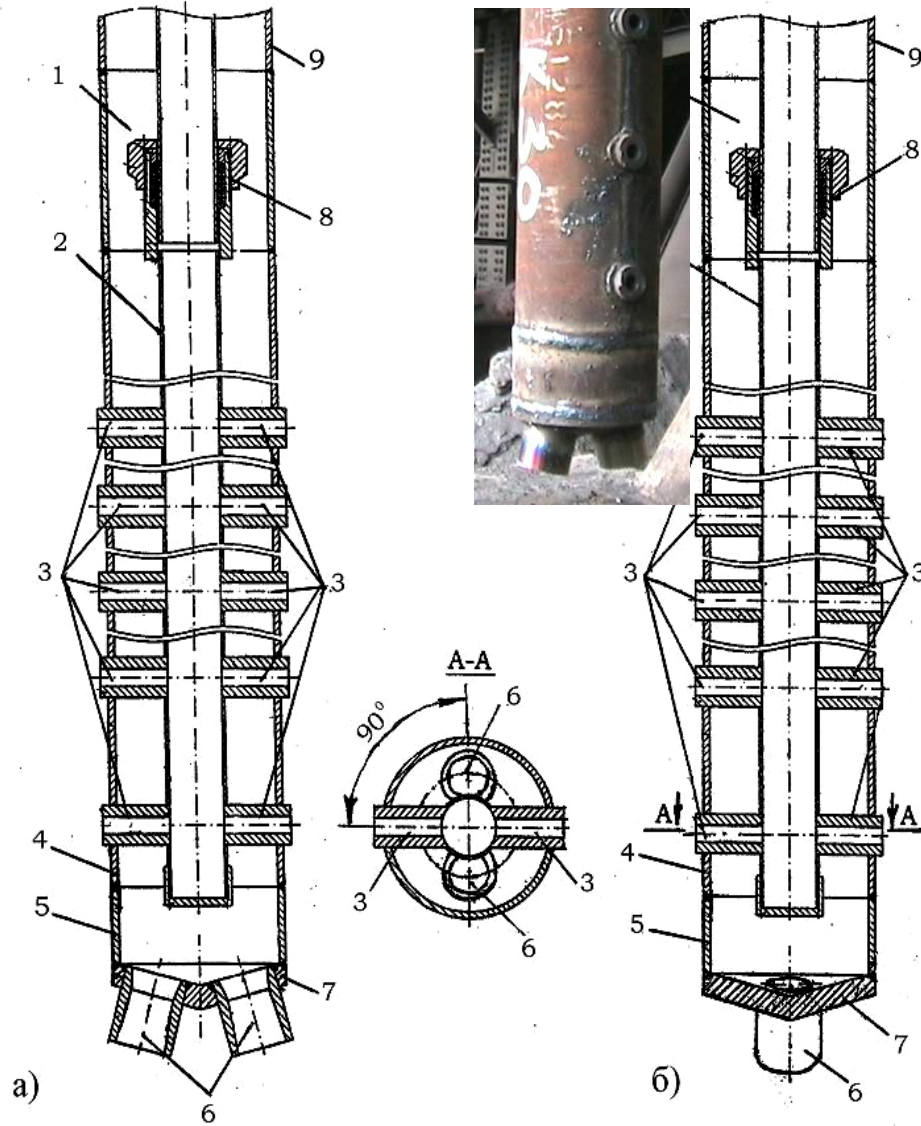


Рис. 1.17 – Газоохолоджувана комбінована газопорошкова багатоярусна торкрет-гарнісажна фурма: 1 – наконечник фурми; 2 – внутрішня труба подачі маси; 3 – бокові сопла; 4 – зовнішня труба; 5 – торцевий наконечник; 6 – сопла Лаваля; 7 – таріль; 8 – компенсатор; 9 – труба стовбура фурми [72]

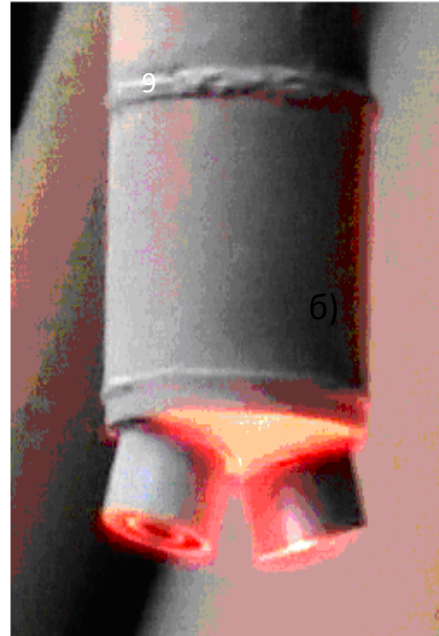
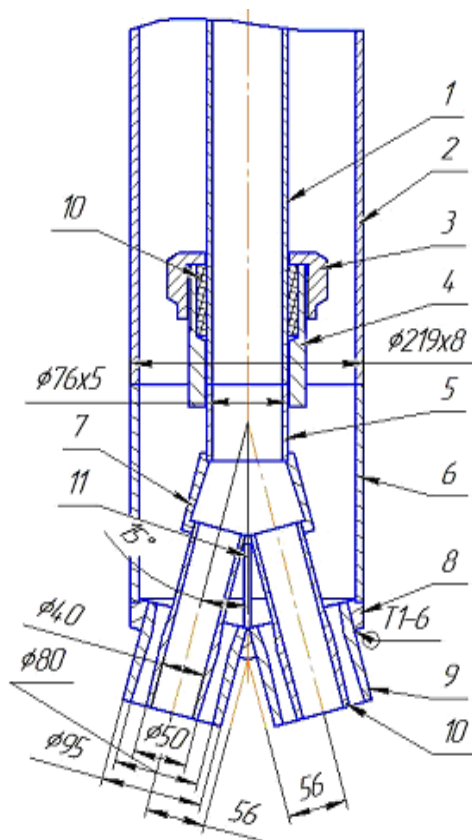


Рис. 1.18 – Схема конструкції та вигляд (б) газоохолоджуваної газопо-рошкової гарнісажної фурми: 1, 2 – внутрішня та зовнішня труби фурми; 3, 4 – система ущільнення та компенсації; 5, 6 – внутрішня та зовнішня труби наконечника; 7 – розподільвач потоків; 8 – таріль наконечника; 9, 10 – кільцеве сопло Лавалю; 11 – рухомий фіксатор [72]

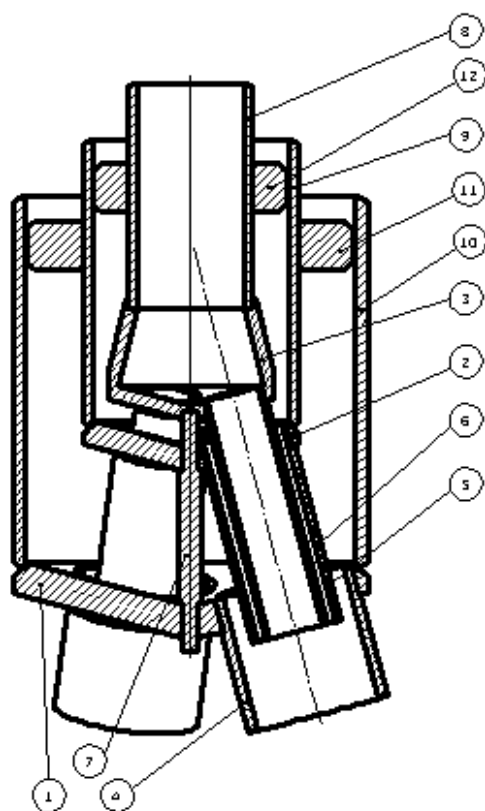


Рис. 1.19 – Газоохолоджувана газопорошкова азотно-киснева гарнісажна фурма [73]: 1, 2 – тарілі наконечника; 3 – обойма; 4 – кільцеве сопло Лавалля; 5, 6 – сопло типу «труба в трубі»; 7 – рухомий фіксатор; 8, 9, 10 – труби; 11, 12 – фіксатори

1.7 Мета та завдання досліджень

Головними факторами, що забезпечують підвищення стійкості футерівки конвертера залишаються раціональні дуттьовий та шлаковий режими плавки, спосіб підготовки кінцевого шлаку з насиченням його оксидом магнію перед роздуванням на футерівку та відповідність конструкції дуттьових пристроїв вимогам операції роздування. Проблемами залишаються ефективність способів забезпечення симетричності та можливості для оперативного коригування профілю робочого простору конвертера, достатньої товщини та високої стійкості нанесеного шляхом роздування шлакової ванни шару гарні-

сажного покриття на футерівці агрегатів за умов зменшення витрат на виробництво металопродукції.

До завдань дослідження віднесли наступні: дослідження газогідродинамічних особливостей роздування шлакової ванни при верхньому та комбінованому її роздуванні з застосуванням багатоярусної фурми; дослідження фізико-хімічних закономірностей модифікування кінцевого конвертерного шлаку, придатного для нанесення на футерівку; розвиток наукових уявлень стосовно механізму взаємодії шлаку з периклазовуглецевим вогнетривом; розробка теоретичних основ удосконаленої технології нанесення гарнісажного покриття на футерівку та пристрою для її реалізації.

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

1. Виконати аналіз сучасного стану технологій підготовки та нанесення кінцевого конвертерного шлаку шляхом роздування на футерівку агрегату і обґрунтувати напрямки їх подальшого удосконалення.

2. Виконати дослідження особливостей газогідродинаміки шлакової ванни при верхньому та комбінованому її роздуванні із використанням багатоярусних фурм з залученням методик низькотемпературного та математичного моделювання.

3. Встановити визначальні параметри нового способу управління відхідним газошлаковим потоком при роздуванні шлаку із перенаправленням частини потоку у визначені зони на футерівці для відновлення раціонального профілю робочого простору конвертера.

4. Дослідити з застосуванням чисельного моделювання гідрогазодинамічні та тепломасообмінні закономірності роздування шлакової ванни та динаміку формування гарнісажного шару в залежності від ступеня зносу футерівки конвертера.

5. Виконати комплекс високотемпературних досліджень з визначенням можливостей прецизійного управління хімічним складом та зміни фізичних характеристик конвертерного шлаку для підвищення його адгезії до перикла-

зовуглецевих вогнетривів.

6. Розробити на основі отриманих у ході досліджень даних методику розрахунку раціональних технологічних параметрів операцій підготовки та роздування кінцевого конвертерного шлаку на футерівку із залученням методів впливу на перерозподіл зворотнього газошлакового потоку між зонами на поверхні останньої.

7. Розробити методику розрахунку конструкції, виготовити та впровадити у виробництво удосконалену конструкцію багатоярусної гарнісажної фурми та технологію нанесення шлакового гарнісажного покриття підвищеної стійкості на футерівку конвертера з її використанням.

РОЗДІЛ 2

УСТАНОВКИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Критерії подібності при моделюванні гідрогазодинаміки роздування конвертерного шлаку на футерівку конвертера

Як відомо [56, 57, 69, 70], у раціональному варіанті ошлакування футерівки конвертера шляхом роздування модифікованого конвертерного шлаку необхідно забезпечити утворення рівномірного за товщиною шару гарнісажного покриття по всій висоті робочого простору агрегату з одночасним запобіганням утворення шлакової охолоді на фурмі та винесення шлакових крапель через горловину. Для процесу роздування шлакової ванни з врахуванням використання неасимілюємого газу (азоту), можливим є використання наступного підходу до визначення критеріїв моделювання.

Як відомо [74], при дослідженні гідродинамічних явищ використовуються критерії, що характеризують течію в'язкої рідини:

- Фруда, що характеризує відношення сил динамічного тиску (інерційних сил) до гравітаційних

$$\text{Fr} = \frac{w_p^2}{g \cdot \ell}; \quad (2.1)$$

- Рейнольдса, яке представляє собою відношення сил динамічного тиску до сил в'язкісного тертя

$$\text{Re} = \frac{w_p \cdot \ell}{\nu_p}; \quad (2.2)$$

- Ейлера, що є відношенням сил статичного тиску до динамічного

$$\text{Eu} = \frac{P_p}{\rho_p \cdot w_p^2}, \quad (2.3)$$

та критерій гомохронності, що характеризує локальну зміну інерційної сили в часі

$$\text{Но} = \frac{w_p \cdot \tau}{\ell} \quad (2.4)$$

У наведених вище виразах: w_p - швидкість потоку рідини, м/с; g – сила тяжіння, м/с²; ℓ - характерний розмір системи, м; ν_p - кінематична в'язкість рідини, м²/с; P_p - тиск рідини, Па; ρ_p - густина рідини, кг/м³; τ - час, с.

Неохідно відмітити, що вирази (2.1-2.4) застосовуються при описі однофазних потоків. Для опису продування рідкої ванни газом необхідно використовувати рівність числа Архімеда, яке є відношенням сили динамічного тиску до архімедової сили, що виникає при проникненні газу з густиною ρ_g у рідке середовище, з густиною ρ_p :

$$\text{Ar} = \frac{g \cdot \ell}{w_g^2} \cdot \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} = idem, \quad (2.5)$$

де w_g - швидкість витікання газу з сопла, м/с; ρ_g – Густина газу кг/м³.

В іноземній літературі подібний критерій носить назву модифікованого критерія Фруда Fr_k :

$$\text{Fr}_k = \frac{w_g^2}{g \cdot \ell} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p - \rho_g} \quad (2.6)$$

Подібність струменевої течії забезпечується дотриманням рівності числа Маха на зразку та моделі:

$$\text{Ma} = \frac{w_g}{c} = idem \quad (2.7)$$

де c - швидкість звуку, м/с.

З врахуванням того, що краплі шлаку утворюються внаслідок розривів поверхні рідкої ванни, суттєвий вплив має поверхневий натяг рідини σ_p та динамічна в'язкість μ_p , Па·с. Вибір модельної рідини необхідно проводити з умови рівності критерію фізичних властивостей рідини [74]:

$$M = \frac{\mu_p^4 \cdot g}{\sigma_p^3 \cdot \rho_p} \equiv idem, \quad (2.8)$$

Сумарний імпульс струменів верхнього дуття $\sum i_{\Gamma}^B$ при цьому знаходиться за виразом:

$$\sum i_2^{\beta} = i_2^{\beta} \cdot \cos \alpha \cdot n_{\beta}, \quad (2.9)$$

де i_{Γ}^B - імпульс поодинокого газового струменя з сопел наконечника фурми, Н; n_{β} і α - відповідно число сопел у наконечнику фурми і кут нахилу їх до вертикалі, град.

Геометрична подібність моделі ту зразку за основними параметрами робочого простору конвертера може бути представлена у вигляді:

$$\frac{H'_{\text{вв}}}{H_{\text{вв}}} = \frac{H'_p}{H_p} = \frac{H'_u}{H_u} = \frac{H'_k}{H_k} = \frac{h'_b}{h_b} = \dots = \frac{D'_z}{D_z} = \frac{D'_u}{D_u} = \frac{D'_d}{D_d} = C_{\ell}, \quad (2.10)$$

У виразі (2.10): $H'_{\text{вв}}$ - вільна висота робочого простору конвертера над рівнем ванни в спокійному стані, м (тут і далі величини зі штрихом відносяться до моделі); H_p , H_u , H_k - відповідно висоти робочого простору, циліндричної і конічної частин агрегату, м; h_b - глибина ванни в спокійному стані, м; D_{Γ} , D_u - відповідно діаметри горловини і циліндричної частини конвертера, м; D_d - діаметр окружності розташування донних фурм (при їх наявності), м; C_{ℓ} - константа геометричної подібності лінійних величин.

При моделюванні нестационарних процесів необхідно також враховувати масштаб часу C_{τ} :

$$C_{\tau} = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{w \cdot \ell'}{w' \cdot \ell} = \frac{C_{\ell}}{C_w} \quad (2.11)$$

Враховуючі, що імпульс потоку струменю (i_{E}), який витікає із сопел Лавалю верхньої фурми, у місці зустрічі із поверхнею ванни визначає обсяг рідини, що витискається з останньої; питомий тиск потоку ($T = i_{\text{J}}/F_x$, Па) - глибину заглиблення струменю та характер розбризкування ванни; потік дуття з донних вставок - зміну напрямку руху крапель, то динамічну подібність

дугтьового режиму у чинній роботі забезпечили за рахунок співвідношень [75]:

$$\left. \begin{aligned} i_z^0 \cdot \cos \alpha_6 \cdot n_n / (m_{ш} \cdot g) &= \text{idem}; \\ H_\phi / d_c^n &= \text{idem}; \\ d_0 / d_y &= \text{idem} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

де F_x - площа струменя азоту у місці зустрічі із ванною, м^2 ;
 $i_z^0 = 0,785 \cdot \rho_z \cdot (U_{ввлх}^n)^2 \cdot (d_c^n)^2$, $\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$; $m = K_k \cdot \rho_{ш} \cdot F_{ш} \cdot h_{ш}$ - маса рідкої ванни, кг ;
 $F_{ш} = 0,785 \cdot (D_{ш})^2$ - площа поверхні шлакової ванни, м^2 ; K_k - коефіцієнт, що враховує форму днища конвертера.

Виходячи з рівняння Бернуллі, що відображає в загальному випадку закон збереження енергії по довжині потоку можна записати

$$\rho \cdot (U_1)^2 / 2 = \rho_{ш} \cdot g \cdot L, \quad (2.13)$$

де U_1 - осьова швидкість струменю в глибині реакційної зони, $\text{м} / \text{с}$; L - глибина реакційної зони, м .

Оскільки осьова швидкість по довжині струменя прогресивно зменшується залежно від початкової швидкості газу $U_{ввлх}^n$, висоти фурми над ванною H_ϕ та діаметра сопла d_c^n за виразом

$$U_1 = U_{ввлх}^n \cdot d_c^n \cdot \beta / (H_\phi + L), \quad (2.14)$$

то після підстановки і проведення відповідних перетворень:

$$\frac{0,637 \cdot \beta^2 \cdot i_z^0}{(H_\phi + L)^2} = \rho_{ш} \cdot g \cdot L, \quad (2.15)$$

де β - коефіцієнт динаміки струменя, що характеризує ступінь його турбулентності.

Зважаючи на ту обставину, що тиск струменя на дно реакційної зони є функцією тиску струменя на поверхню шлаку, перехід від одного до іншого режиму взаємодії азотного струменя з шлаковим розплавом заданого складу з певним ступенем точності може бути описаний залежністю [75]

$$H_{\phi} = f \left(\sqrt[3]{\frac{i_2^0}{\rho_{ш} \cdot g}} \right), \quad (2.16)$$

З іншого боку, якщо сумарний імпульс газових (азотних) струменів $\sum i_2^0$ віднести до маси рідкого шлаку $m_{ш}$, то з проведенням необхідних перетворень отримаємо

$$\left(\frac{H_{\phi} + L}{d_c^n} \right)^2 = \frac{0,5\beta^2 \cdot \sum i_2^0}{m_{ш} \cdot g}, \quad (2.17)$$

а отже умови переходу до різних режимів роздування шлаку [75, 76], можна представити залежністю

$$\frac{H_{\phi}}{d_c^n} = f \left(\sqrt{\frac{\sum i_2^0}{m_{ш} \cdot g}} \right), \quad (2.18)$$

що враховує зміну масштабу процесу.

Діаметр $\left(\frac{D}{H_{\phi}} \right)$ і глибину $\left(\frac{L}{H_{\phi}} \right)$ поодинокій реакційній зоні можна описати у вигляді залежності

$$\frac{D}{H_{\phi}}, \frac{L}{H_{\phi}} = f \left(\frac{i_2^0}{\rho_{ш} \cdot g \cdot H_{\phi}^3} \right), \quad (2.19)$$

а з урахуванням геометричних побудов при багатоструменевому дутті, загальний діаметр реакційної зони можна виразити у вигляді співвідношення

$$D_{заг} = K_1 \cdot H_{\phi} \cdot \left(\frac{i_2^0}{\rho_{ш} \cdot g \cdot H_{\phi}^3} \right)^{K_2} \cdot (1 + L \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon}) + d_0 + 2(H_{\phi} + L) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\epsilon}, \quad (2.20)$$

де K_1, K_2 - емпіричні коефіцієнти.

З використанням вищенаведених залежностей надалі було виконано обґрунтування умов моделювання дуттьового режиму роздування шлаку. Приймаючи до уваги, що співвідношення (2.9) можна представити як:

$$\frac{\sum i_2^6}{m_p \cdot g} = \frac{i_2 \cdot \cos \alpha_B \cdot n_c}{m_p \cdot g} = \frac{\rho_2 \cdot Q_2^2 \cdot \cos \alpha_B \cdot n_c}{m_p \cdot g} = C_D \equiv idem, \quad (2.21)$$

то для роздувки шлакової ванни фурмою з багатосопловим наконечником:

$$\frac{\rho_2 \cdot Q_2^2 \cdot \cos \alpha_B \cdot n_c}{m_p \cdot g \cdot F} = \frac{\rho_2' \cdot (Q_2')^2 \cdot \cos \alpha_B' \cdot n_c'}{m_p' \cdot g \cdot F'} = C_D = idem, \quad (2.22)$$

де Q_2' - витрата газу на одне сопло, м³/с; F – площа критичного перерізу сопла, м²; α_B - кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми, м; n – кількість сопел (' - штрих відноситься до моделі).

Тоді, за умови $\alpha_B = \alpha_B'$ та $n = n'$, витрата газу на одне сопло (Q_2' , м³/с) наконечника фурми для моделі визначається за виразом:

$$Q_2' = \sqrt{\frac{\rho_2 \cdot Q_2^2 \cdot m_{жс} \cdot F'}{m_{жс} \cdot \rho_2' \cdot F}}, \quad (2.23)$$

і для моделювання мінімального значення витрати азоту для 250-т конвертера ПАТ «Дніпровський МК» у 600 м³/хв. та максимальної витрати у 700 м³/хв., для лабораторної моделі отримаємо: 0,67·10⁻³ м³/с та 0,78·10⁻³ м³/с для 5-ти соплового наконечника, відповідно; 0,56·10⁻³ м³/с та 0,65·10⁻³ м³/с для 6-ти соплового. При цьому загальна інтенсивність газового дуття у кожному випадку буде складати відповідно 0,20 м³/хв. та 0,24 м³/хв.

При використанні для роздування шлакової ванни двоярусної фурми за запропонованою автором дисертації схемою (рис. 2.1) [75], у тому числі при моделюванні комбінованого роздування ванни [76], визначальними параметрами повинні бути:

- кількість сопел Лавалю у наконечнику фурми n_L , шт; кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми α , град; вихідний діаметр сопла Лавалю d_c^n , м; діаметр кола розташування вісей вихідних перетинів сопел на торці наконечника d_o^n , м;

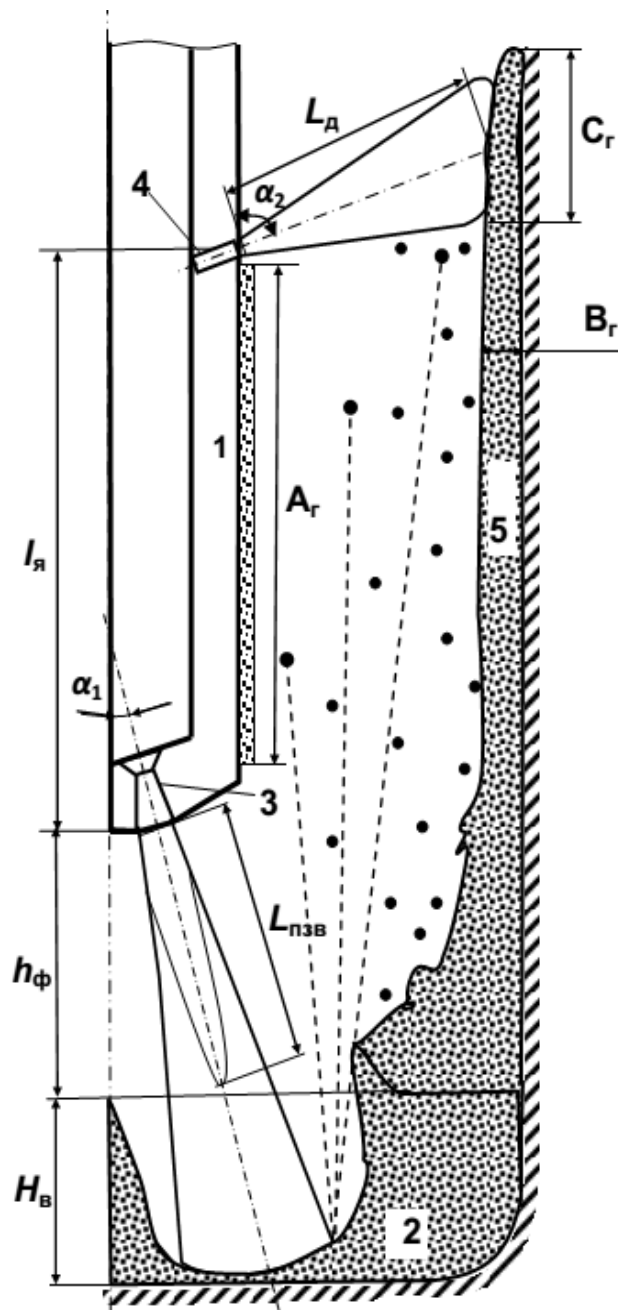


Рис. 2.1 - Запропонована схема роздування рідкої ванни двоярусною фурмою з перенаправленням частини газорідного потоку у визначені зони на стінах конвертера: 1 – фурма; 2 – рідка ванна; 3 – сопло Лавалля; 4 – циліндричне сопло; 5 – гарнісаж; $A_{г}$ – відстань між ярусами сопел; $B_{г}$ – товщина гарнісажного шару; $C_{г}$ – висота зони контакту газових струменів із циліндричних сопел з стінкою конвертера

- кількість циліндричних сопел у верхньому сопловому блоці $n_{ц}$, шт; вихідний діаметр циліндрового сопла d_c^u , м;

- витрата азоту крізь сопло Лавалю q_2^l та циліндричне q_2^u , м³/с; лінійна швидкість $U_{вих}^l$, м/с, густина ρ_r , кг/м³ та температура $T_{вих}$, К азотного струменя на виході з сопла; відстань від вісі сопла верхнього блоку до торця наконечника l , м; відстань від зрізу сопла Лавалю до днища конвертера H_{ϕ} , м;

- глибина рідкої ванни шлаку $H_{в}$, м; діаметр циліндричної частини конвертера $D_{ц}$, м та густина рідкого шлаку $\rho_{ш}$, кг/м³; витрата газу крізь донні фурми (або вставки) м³/с;

- діаметр відокремленого кратеру у шлаковій ванні d_k , м; загальний діаметр реакційної зони на поверхні шлаку $D_{общ}$, м; швидкість відбитого потоку азота, що переміщується уздовж поверхні кратера $U_{отр}$, м/с; прискорення вільного падіння g , м/с².

При використанні для роздувки шлаку запропонованої у чинній роботі двоярусної фурми [75] у систему необхідно додатково увести критерій відносного імпульсу потоків дуття I_d та два симплекса, що враховують сумарний імпульс додаткових струменів другого ярусу $\sum i_d^B$ та геометричні параметри двоярусної фурми – відстань між ярусам сопел ($H_{я}$, м) та діаметр вихідного перетину сопел другого ярусу (d_d^B , м):

$$I_d = \frac{\sum i_{\partial}^{\epsilon}}{\sum i_{\partial}^{\epsilon}} \equiv idem; \quad \frac{H_{я}}{d_{\partial}^{\epsilon}} \equiv idem; \quad \frac{d_{\partial}^{\epsilon}}{d_{\partial}^B} \equiv idem \quad (2.24)$$

Сумарний імпульс додаткових струменів дуття другого ярусу $\sum i_{\partial}^{\epsilon}$:

$$\sum i_{\partial}^{\epsilon} = i_{\partial}^{\epsilon} \cdot \cos \beta n_{\partial}, \quad (2.25)$$

де i_{∂}^e – імпульс поодинокого газового струменя другого ярусу верхньої фурми, Н; n_{∂} і β – відповідно число сопел другого ярусу фурми і кут нахилу їх до вертикалі, град.

Приймаючи до уваги, що запропонована конструкція двоярусної гарнісажної фурми [77] передбачає подачу дуття на другий ярус із загального потоку газу, а сопла верхнього ярусу (на моделі) мають однаковий діаметр із соплами наконечника фурми, то для порівняння результатів роздувки з використанням одно- то двоярусних фурм необхідним є забезпечення збереження імпульсу струменів сопел нижнього ярусу фурми. Витрата газового дуття на другий ярус двоярусної фурми повинна складати: $0,84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ у випадку використання 4-х соплового наконечника при інтенсивності подачі дуття на другий ярус відповідно $0,20 \text{ м}^3/\text{хв.}$ та $0,24 \text{ м}^3/\text{хв.}$ ($I_{\text{д}} = 1$); $0,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ у випадку використання 6-ти соплового наконечника при інтенсивності подачі дуття на другий ярус відповідно $0,13 \text{ м}^3/\text{хв}$ та $0,16 \text{ м}^3/\text{хв}$ ($I_{\text{д}} = 1,5$). Загальна інтенсивність подачі газового дуття при використанні 4-х соплового наконечника у двоярусній фурмі повинна складати $0,40$ та $0,48 \text{ м}^3/\text{хв.}$, при використанні 6-ти соплового наконечника - $0,36 \text{ м}^3/\text{хв}$ та $0,40 \text{ м}^3/\text{хв.}$ відповідно. Основні параметри моделювання наведені у таблиці 2.1.

У запропонованому варіанті роздування шлакової ванни [77, 78] перерозподіл шлакових крапель з формуванням гарнісажного шару на робочій поверхні футерівки визначається структурою та розмірами як реакційних зон, так характером впливу тиску потоків газу з бокових сопел верхнього соплового блоку на відхідний газорідкий потік.

2.2 Установа для моделювання роздування рідкої ванни у конвертері з комбінованим та верхнім продуванням

Експерименти з дослідження особливостей гідрогазодинамічних процесів роздування рідкої ванни проводили з використанням установки [75, 76]

Таблиця 2.1

Основні параметри моделі по відношенню до 250-т конвертера КЦ
ПАТ «Дніпровський меткомбінат»

Параметри	од. вим.	зразок	модель
Діаметр горловини конвертера	м	4,380	0,219
Висота робочого простору конвертера	м	9,825	0,485
Об'єм шлакової ванни	м ³	1,8-3,5	$(3-12) \cdot 10^{-4}$
Тиск дугтя перед соплами:	МПа		
Лавалія		1,2-1,6	0,04-0,05
донної вставки		0,8-1,0	0,02-0,04
Витрата газу на одне сопло:	м ³ /хв.		
Лавалія		100,0-134,0	$(3,78-4,86) \cdot 10^{-2}$
донної вставки		0,6-1,2	$(0,06-0,12) \cdot 10^{-2}$
Кут нахилу сопел Лавалія	град	20	15-20
Діаметр отвору донної вставки	м	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-4}$
Критерій динамічної подібності		0,082-0,156	0,082-0,156
Модифікований критерій Фруда		0,8-1,2	0,8-2,9

на плексигласовій моделі конвертера (рис. 2.2) з профілем і розмірами робочого простору в масштабі по відношенню до 250-т агрегату конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК».

Дослідження проводили за умов як верхнього так і комбінованого роздування рідкої ванни, яка відповідала 5-12% об'єму металевій ванни промислового 250-т конвертера ПАТ «ДМК» у масштабі 1:18. У якості рідини, що моделює шлакову ванну, використовували крохмальний клейстер з визначеною густиною, у якості моделі азотного дуття - стиснене повітря. Для роздування рідкої ванни використовувалися конструкції наконечників лабораторних фурм (рис. 2.3, 2.4), що містили 5-ть та 6-ть сопел, із рівномірним за колом та згрупованим у бік цапф (рис. 2.4) розташуванням на торці наконечника. Сопла у наконечниках фурм були розташовані під кутом (α) 15° до вертикалі.

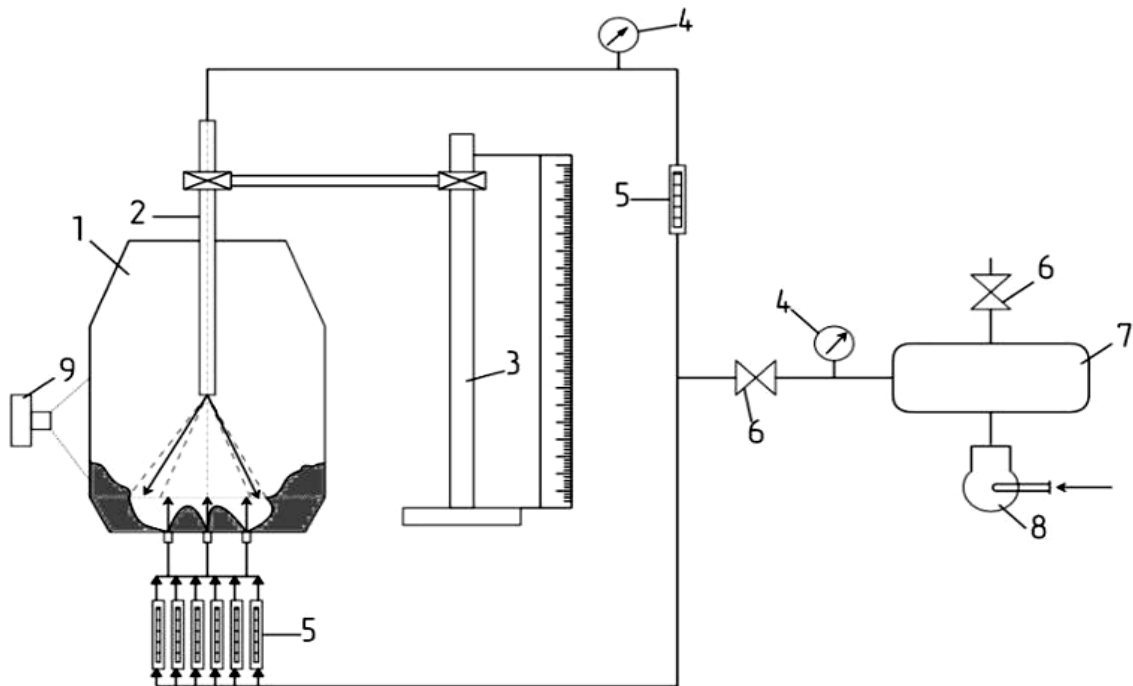
При цьому 6-ти сопловий наконечник зі згрупованими по три соплами, направленими у бік цапфених зон агрегату (рис. 2.4, в), за конструкцією відповідав наконечнику штатної гарнісажної фурми конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» [79]. За допомогою 4-х сопел другого ярусу, що були спрямовані у напрямку навколоцапфених зон конвертера потік крапель перенаправляли у визначені зони на стінах моделі конвертера.

Змінні наконечники за допомогою різьби з'єднувалися із стовбурами фурм. У двоярусній фурмі відстань між ярусами $l_{\text{я}}$ (рис. 2.4, а, б) регулювалася за допомогою різьбового з'єднання труби нижнього ярусу з трубою верхнього ярусу верхньої фурми у межах 80-110 мм.

При моделюванні процесу комбінованого роздування шлакової ванни для подачі газу крізь днище використовували 6-ть циліндрових донних фурм з діаметром отвору ($d_{\text{д}}$) 0,7мм, що були розташовані у одній вертикальній площині із відповідним соплом наконечника верхньої 6-ти соплової фурми.



a



б

Рис. 2.2 - Вигляд (а) та схема (б) установки для фізичного моделювання процесу нанесення шлакового гарнісажу 1 - конвертер; 2 - фурма; 3 – пристрій для переміщення фурми за висотою; 4 – манометр; 5 – ротаметр; 6 – регулюючі вентиля; 7 – ресивер; 8 – компресор; 9 – відеокамера

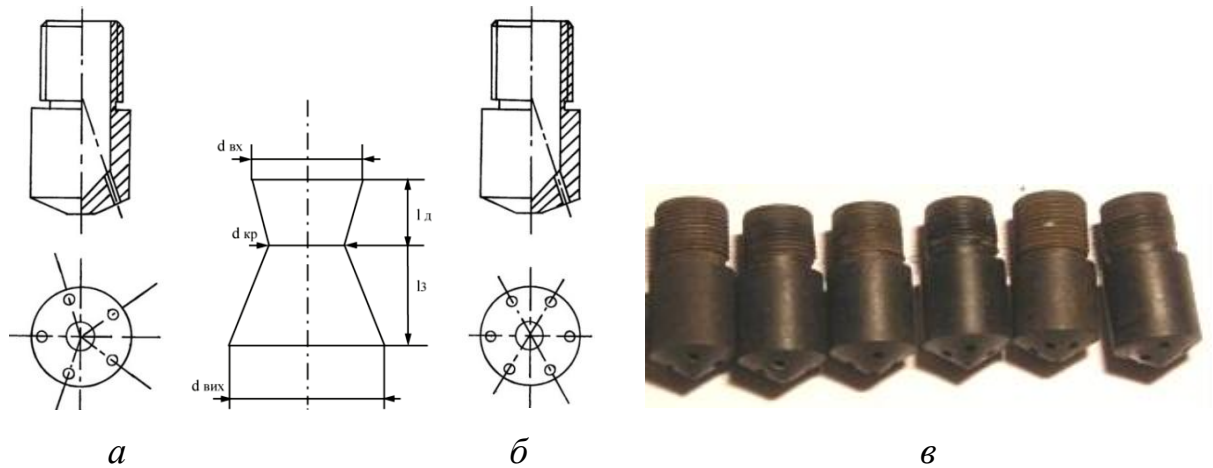


Рис. 2.3 - Конструкції (а, б) та вигляд (в) модельних наконечників фурми для роздування рідкої ванни на стіни моделі конвертера (рис. 2.2)

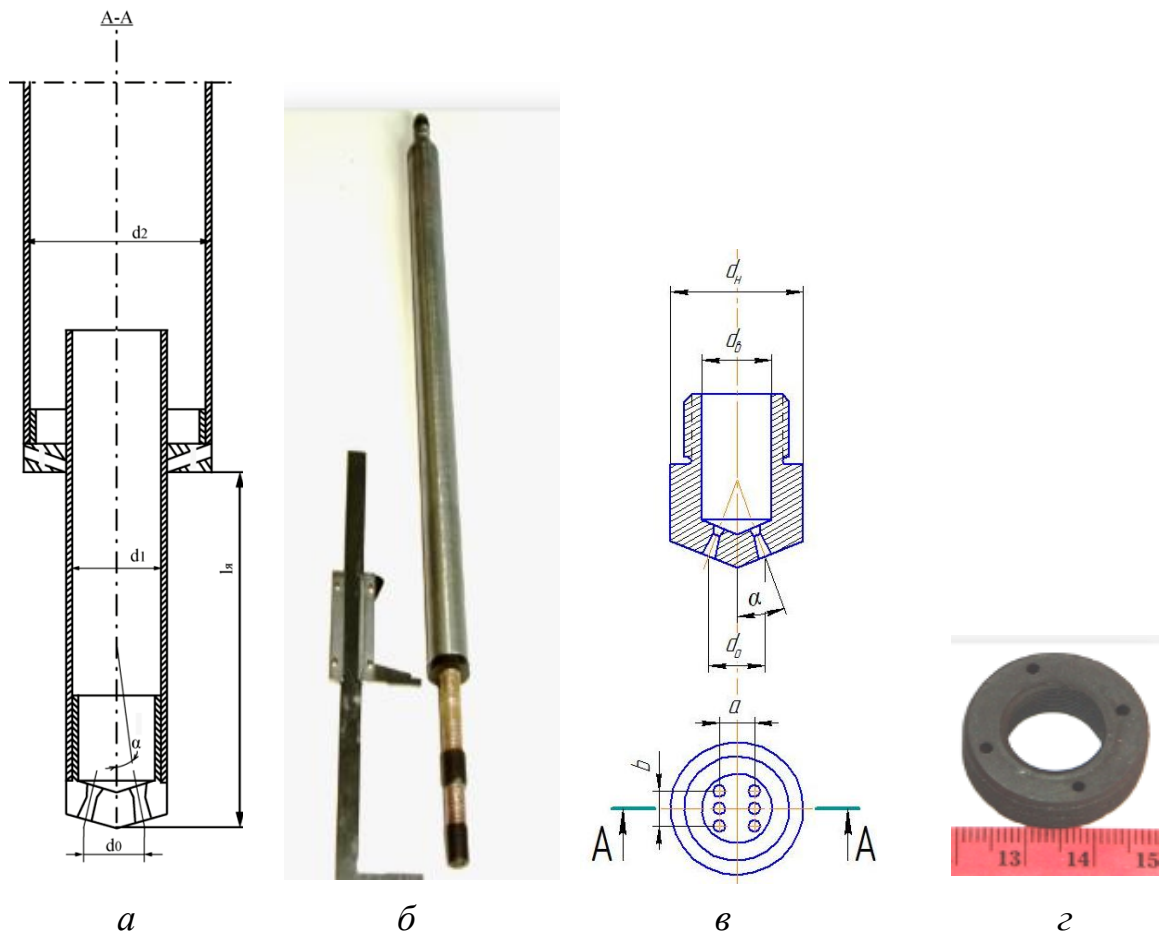


Рис. 2.4 - Схеми конструкції (а, в) та вигляд (б, г) фурми (б), наконечника з згрупованими по три соплами та верхнього соплового блоку (г) лабораторної двоярусної фурми, мм: $d_1=16,0$; $d_2=31,0$; $l_ж=40-110$; $d_0=6$; $a=11$

Процес роздування рідкої ванни газовими струменями фіксували за допомогою цифрової відеокамери *Canon-500FX* із використанням високошвидкісних режимів зйомки (240 к/с).

Основні параметри наконечників фурм наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Основні характеристики наконечників фурм

№	Характеристика наконечника	5-ти сопловий	6-ти сопловий
1	Зовнішній діаметр (d_n), мм	16,3	16,3
2	Внутрішній діаметр (d_b), мм	9,2	9,2
3	Розміри сопла Лавалю, мм		
	вхідний діаметр ($d_{вх}$)	2,0	–
	критичний діаметр ($d_{кр}$)	1,7	–
	вихідний діаметр ($d_{вих}$)	2,3	–
	довжина докритичної частини (l_d)	1,7	–
	довжина закритичної частини (l_3)	5,5	–
4	Розміри циліндричного сопла, мм		
	діаметр (d_c)	–	1,3
	довжина (l_c)	–	5,5
5	Кут нахилу сопла до вертикалі (α), град	15	15
6	Кут у плані між вісями суміжних сопел Лавалю (φ_1), град	21	14

Завданнями досліджень з використанням установки (рис. 2.1) на першому етапі, було визначення впливу взаємного розташування основних та додаткових сопел та положення двоярусної фурми по ходу роздування на перенаправлення крапель рідини та рівномірність формування гарнісажного покриття на стінах моделі конвертера за товщиною.

На другому етапі експериментів, з метою визначення характеру та ступеня впливу глибини шлакової ванни (X_1), висоти розташування наконечника фурми над ванною (X_2) та відстані між наконечником фурми та боковими циліндричними соплами (X_3) на розміри зони «зашлакованості» стовбура фурми (A_r), товщину шару шлаку на стінах конвертера (B_r) та ширину зони шлако-

вого гарнісажу у «проблемних» зонах (C_T) були використані методи планування експерименту.

Був спланований та реалізований повний факторний експеримент (табл. 2.3) за схемою роздування наведеною на рис. 2.1.

Таблиця 2.3

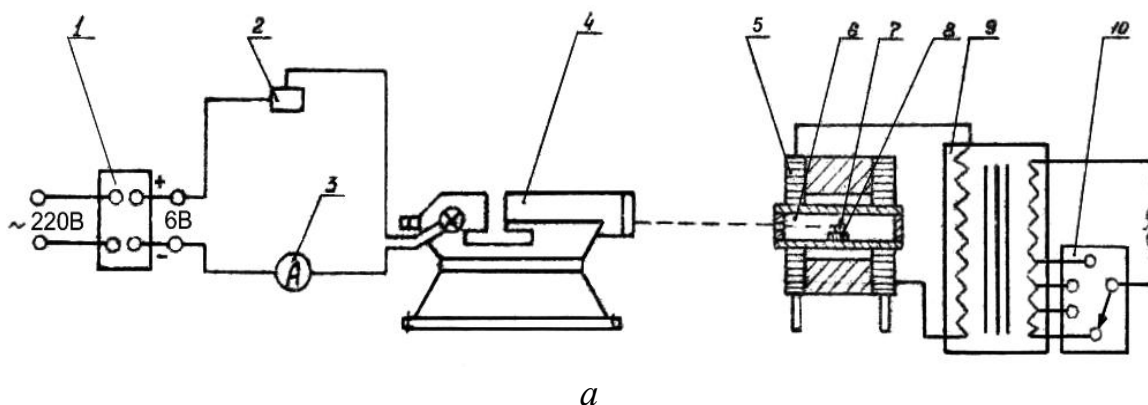
Матриця планування експериментів з дослідження газодинамічних особливостей роздування рідкої ванни газовими струменями із застосуванням двоярусної фурми

№	X_1 , см		X_2 , см		X_3 , см		X_1X_2	X_1X_2	X_1X_2	$X_1X_2X_3$
1	-	1	-	3	-	8	+	+	+	-
2	+	3	-	3	-	8	-	-	+	+
3	-	1	+	9	-	8	-	+	-	+
4	+	3	+	9	-	8	+	-	-	-
5	-	1	-	3	+	11	+	-	-	+
6	+	3	-	3	+	11	-	+	-	-
7	-	1	+	9	+	11	-	-	+	-
8	+	3	+	9	+	11	+	+	+	+

2.3 Установки та методики для дослідження поверхневих явищ у системі «шлаковий розплав – вогнетрив»

Високотемпературні дослідження закономірностей розтікання шлаку, формування гарнісажного покриття та характеру поверхневих явищ у системі «шлаковий розплав -вогнетрив» проводили з використанням лабораторного комплексу на основі печі Таммана, оптичного пірометра ЕОП-66 та контрольно-вимірювальних приладів в умовах сталеплавильної лабораторії кафедри металургії чорних металів Дніпровського ДТУ. Використані основні положення методики визначення поверхневого натягу методом лежачої краплі [80]. На рисунку 2.5 наведено принципову схему установки. Вона складається із двох самостійних частин. Перша, вимірювальна частина – це власне ла-

бораторний оптичний пірометр 4, підключений через реостат 2 до блоку живлення 1. Струм у лампі накаливання пірометра вимірюється за допомогою дзеркального міліамперметра високого класу точності (0,5).



б

Рис. 2.5 - Схема (а) та загальний вигляд комплексу (б) на основі печі Тамана та оптичного пірометра для дослідження поверхневих явищ у системі «шлаковий розплав – вогнетрив»: 1 – блок живлення; 2 – реостат; 3 – міліамперметр; 4 – оптичний пірометр ЕОП-66; 5 – піч опору (Таммана); 6 – графітова трубка (нагрівальний елемент); 7 – досліджуваний зразок; 8 – підставка для зразка; 9 – трансформатор печі; 10 – регулятор потужності

Друга частина складається з печі Тамана 5 і трансформатору 9 з вимірювальною та регулюючою апаратурами 10. У графітову трубку 6 печі 5, вводиться досліджуваний зразок 7 на вогнетривкій підставці 8 (рис. 2.6).

Перед виконанням вимірювань проводили суміщення горизонтальних вісей пірометра й печі, потім встановлювали зразок на підставці в піч та його нагрівання, з реєстрацією його температури, моменту початку розплавлення за допомогою оптичного пірометра та відофіксацією динаміки розтікання. Схема визначення крайового кута змочування шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву за методикою «краплі, що лежить» [80], наведена на рис. 2.7.

У чинній роботі досліджували умови адгезії та змочування поверхні периклазовуглецевого вогнетриву кінцевим конвертерним шлаком (висхідним та модифікованим присадками, у тому числі з добавками твердих нерозчинних частинок). Було реалізовано повний факторний експеримент. З метою дослідження впливу зміни складу у зразки порошкоподібного кінцевого конвертерного шлаку висхідного хімічного складу, %: CaO 45,1; MgO 3,9; SiO₂ 16,5; FeO+Fe₂O₃ 26,3, присаджували порції CaO та MgO, у відповідності з планом експерименту (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

План повного факторного експерименту з визначення кутів змочування поверхні вогнетриву кінцевим конвертерним шлаком, модифікованим добавками

№	X ₁ , %		X ₂ , %		X ₃ , мм*		X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃
	к.	нат.	к.	нат.	к.	нат.				
1	-	5,0	-	5,0	-	0,8	+	+	+	-
2	+	20,0	-	5,0	-	0,8	-	-	+	+
3	-	5,0	+	10,0	-	0,8	-	+	-	+
4	+	20,0	+	10,0	-	0,8	+	-	-	-
5	-	5,0	-	5,0	+	3,3	+	-	-	+
6	+	20,0	-	5,0	+	3,3	-	+	-	-
7	-	5,0	+	10,0	+	3,3	-	-	+	-
8	+	20,0	+	10,0	+	3,3	+	+	+	+

* середній діаметр часток у фракції

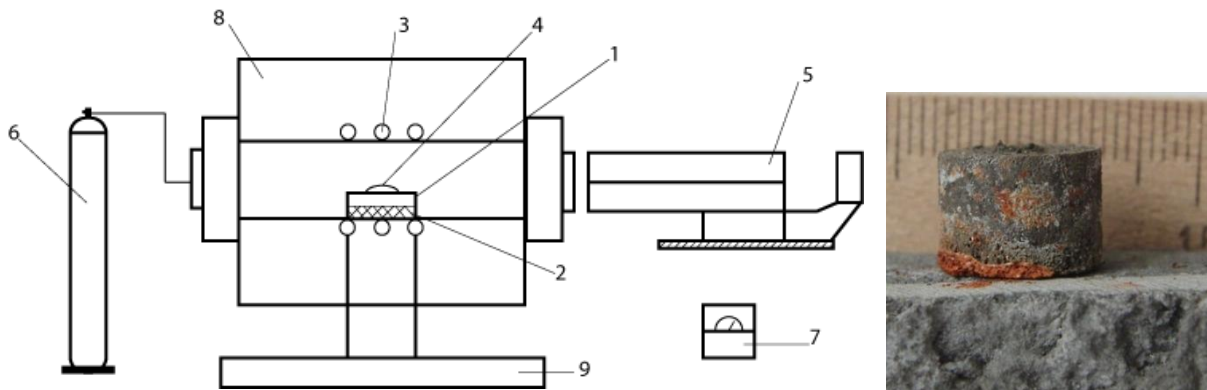


Рис. 2.6 - Схема визначення кута змочування у тиглі печі Таммана (а) та зразок шлаку на поверхні вогнетрива (б)

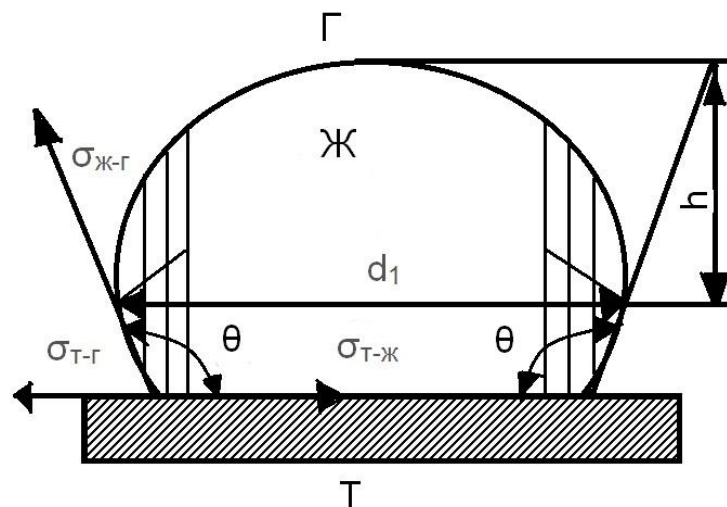


Рис. 2.7 - Схема визначення крайового кута змочування шлаком поверхні вогнетриву: d_1 – максимальний діаметр краплі шлаку; h - відстань від максимального діаметру до вершини краплі; Θ - крайовий кут змочування; $\sigma_{\text{ж-г}}$ - поверхневий натяг на границі розділу «шлак - газ»; $\sigma_{\text{т-ж}}$ – поверхневий натяг на границі розділу «вогнетрив – шлак»; $\sigma_{\text{т-г}}$ - поверхневий натяг на границі «вогнетрив – газ»

У якості параметру оптимізації прийняли величину крайового кута змочування θ , у якості впливових факторів: X_1 – величина добавки CaO, % (від маси шлаку); X_2 – величина добавки MgO, % (від маси шлаку); X_3 – розмір твердих нерозчинних часток (на основі MgO) для модифікування конвертерного шлаку, мм.

З метою визначення особливостей розподілу введених твердих тугоплавких часток у об'ємі шлаку, закономірностей їх впливу (у якості гальмініків руху шлаку та/або «центрів кристалізації») на розтікання краплі шлаку по поверхні периклазовуглецевого вогнетриву, у висхідний конвертерний шлак додавали тверді тугоплавкі частки різних фракцій (діаметром від 0,63 до 3,60 мм) на основі оксидів магнію. Кількість введених тугоплавких добавок складала від 6 до 8% від маси зразку шлаку.

Підготовлений зразок модифікованого кінцевого конвертерного шлаку у вигляді циліндра діаметром 8 мм та висотою 10 мм встановлювали на підложку, виготовлену з периклазовуглецевого вогнетриву (марки *PC-14F*), вилученого з футерівки кисневого конвертера після завершення кампанії (рис. 2.6, б). Піч закривали з однієї сторони прозорим кварцовим склом та пропускали крізь реакційний простір газоподібний азот (для відтворення умов у робочому просторі конвертера при нанесенні шлакового гарнісажу шляхом роздування кінцевого шлаку азотними струменями).

Дослідження характеру розтікання шлаку по поверхні вогнетриву проводили із використанням знімків 25x18 см, де фіксували у часі різні стадії процесу (початок плавлення, розтікання рідкої фази, кінетику розтікання, тощо). Для аналізу отриманих результатів застосовували мультимедійний плеєр та диспетчер рисунків «Microsoft Office». Крайовий кут змочування вимірювали із точністю до $0,5^\circ$, а лінійні розміри краплі шлаку – із точністю до 0,1 мм. Для визначення поверхневих характеристик проводили виміри розмірів краплі.

Поверхневий натяг шлаку на границі рідина — газ визначали з використанням рівняння [80]:

$$\sigma_{ж-г} = d_3^2 \cdot \frac{1}{H} \cdot \Delta\rho \cdot g \quad (2.26)$$

де d_3^2 – екваторіальний діаметр краплі, см; $\frac{1}{H}$ – функція у залежності від співвідношення діаметру до висоти; $\Delta\rho$ – густина зразку при температурі плавлення г/см³.

Роботу адгезії оцінювали за виразом:

$$A_{адг} = \gamma_{ж-г} \cdot (1 + \cos\theta), \quad (2.27)$$

а роботу когезії як

$$A_{ког} = 2\gamma_{ж-г} \quad (2.28)$$

$\gamma_{ж-г}$ — величина, яка еквівалентна поверхневій енергії (при підвищеній температурі).

Дослідження макро- та мікроструктури зон контакту шлакової краплі та поверхні вогнетриву проводили з застосуванням мікроскопу МІМ-8М та електронного растрового вимірювального мікроскопу РЕМ-106І.

2.4 Методика проведення промислового експерименту

Промислові дослідження було проведено на двох 250-т конвертерах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» [81]. З метою забезпечення достовірності отриманих даних при відпрацюванні різних варіантів нанесення гарнісажного шлакового покриття на периклазовуглецеву футерівку конвертера з використанням штатної та дослідної конструкцій гарнісажних фурм обробці піддавали дані плавки, проведених під безпосереднім контролем дослідників. Під час проведення дослідних плавки контролювали режими продувки конвертерної ванни, присадки сипучих матеріалів, поведінку ванни при продуванні, характер та особливості роздування шлакової ванни.

До основних методів отримання інформації у чинній роботі віднесені: відбирання для наступного хімічного та мікроструктурного аналізу проб металу та конвертерного шлаку та використання інтерферометру LaCam M007 (фірми Ferrotec Technologies GmbH, Німеччина) для контролю змін у геоме-

трії робочого простору конвертера до та після проведення операції нанесення гарнісажного покриття. За розробленою методикою [82] у чинній роботі сканування робочого простору конвертерів проводили у перший період кампанії конвертера по футерівці (до 550 плавок), та на завершальному етапі кампанії (після 4000 плавок по футерівці). З метою визначення висхідного профілю робочого простору перед проведенням досліджень нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздування шлакової ванни не виконували. Після випуску сталі у стальковш і роздування протягом 5-6 хв. кінцевого конвертерного шлаку здійснювали повторне сканування робочого простору конвертера для визначення фактичної товщини гарнісажного шару.

Проби металу та шлаку піддавали хімічному аналізу з використанням квантометрів. У пробах металу визначали вміст С, Мп, Si, S та Р. Кінцевий конвертерний шлак, шлак зі стовбура гарнісажної фурми, а також проби шлакового гарнісажу аналізували на вміст SiO_2 , CaO , FeO , MgO , MnO , Al_2O_3 , S та P_2O_5 . Дослідження макро- та мікроструктури зон контакту гарнісажного шару та поверхні вогнетриву проводили з застосуванням мікроскопу МИМ-8М та електронного растрового вимірювального мікроскопу РЕМ-106И.

2.5 Висновки по розділу 2

1. Із застосуванням відомих моделей взаємодії надзвучових газових струменів із рідкою ванною та положень теорії подібності виконано обґрунтування критеріїв подібності та параметрів дуттьового режиму при моделюванні роздування шлаку у конвертері з верхнім і комбінованим продуванням.

2. Розроблені установка та методика низькотемпературного моделювання процесу роздування шлакової ванни для дослідження макрофізичних явищ, що супроводжують взаємодію багаторівневого та багатострумєневого дуття з рідкою ванною, закономірності розподілу газошлакового потоку та гарнісажу на стінах агрегату.

3. Розроблені установка та методика високотемпературного моделювання змочування, розтікання шлаку, у тому числі модифікованого тугоплавкими добавками, по поверхні периклазовуглецевого вогнетриву.

4. Описана методика проведення промислових досліджень в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат», заснована на комбінованому застосуванні фізико-хімічного, рентгеноспектрального аналізу зразків шлаку, інтерферометра для контролю геометрії робочого простору конвертера та профілю гарнісажного покриття.

З матеріалами розділу можна ознайомитись у публікаціях [75, 76, 83, 84, 100, 105, 119].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ НАНЕСЕННЯ ГАРНІСАЖНОГО ПОКРИТТЯ ШЛЯХОМ РОЗДУВАННЯ РІДКОЇ ВАННИ НА РОБОЧУ ПОВЕРХНЮ КОНВЕРТЕРА

3.1 Результати дослідження гідрогазодинамічних закономірностей роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням ванни

Експерименти проводили з використанням методики низькотемпературного моделювання на моделі 250-т конвертера з комбінованим продуванням ванни (див. розд. 2). Використовували прозору плексигласову модель конвертера з профілем і розмірами робочого простору в масштабі 1:18 по відношенню до 250-т агрегату ПАТ «Дніпровський меткомбінат» [76, 83, 84]. З метою визначення особливостей формування гарнісажного покриття (з крохмального клейстеру) на робочій поверхні конвертера експерименти проводили з врахуванням можливості зміни висоти фурми по ходу роздування ванни, кількості та відносного розташування верхніх сопел наконечника фурми та донних сопел, витрат газу на роздування.

Встановлено, що у дослідженому діапазоні витрат газу крізь сопла наконечника фурми ($Q_{\Gamma} = 0,038-0,048 \text{ м}^3/\text{хв.}$ на одне сопло) та $0,004-0,006 \text{ м}^3/\text{хв.}$ на одне донне сопло, висоти розташування наконечника фурми над ванною (15-45 кал.) (H_{Φ}) і кута нахилу сопел останньої до вертикалі (15-25 град) (α), пробивання струменями газу стовпа рідини супроводжується утворенням відбитих від днища зворотних газових потоків.

Останні формують реакційні зони взаємодії газових струменів з рідкою ванною які мають вигляд кратерів різної площі та форми (рис. 3.1, 3.2).

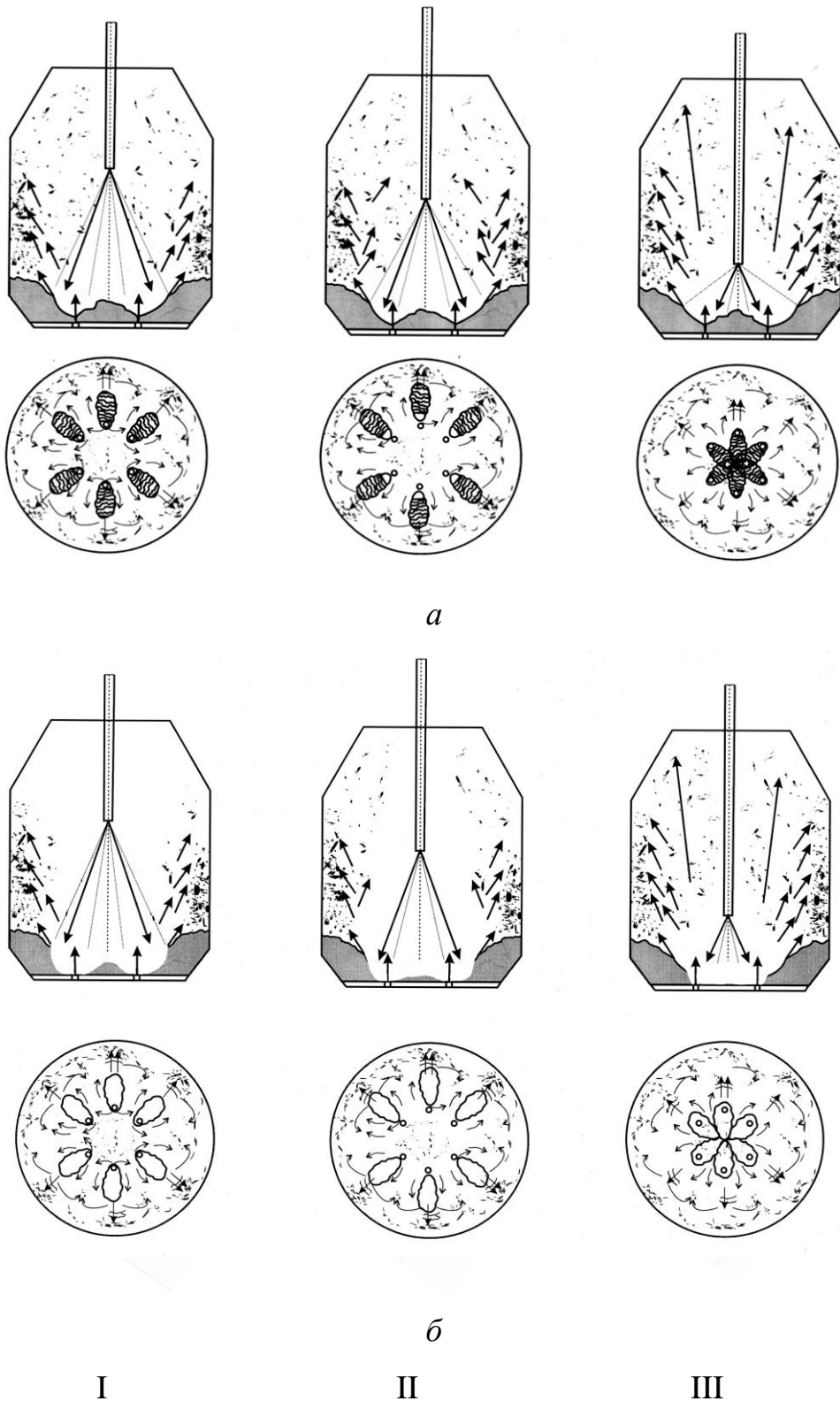


Рис. 3.1 - Схеми нанесення гарнісажу за першим (а) та другим (б) граничним режимами роздування рідкої ванни: а) I - $Q_r=0,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=40$ кал; II - $Q_r=0,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=25$ кал; III - $Q_r=0,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=15$ кал; б) I - $Q_r=0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=40$ кал; II - $Q_r=0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=25$ кал; III - $Q_r=0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $h_\phi/d_\phi=15$ кал

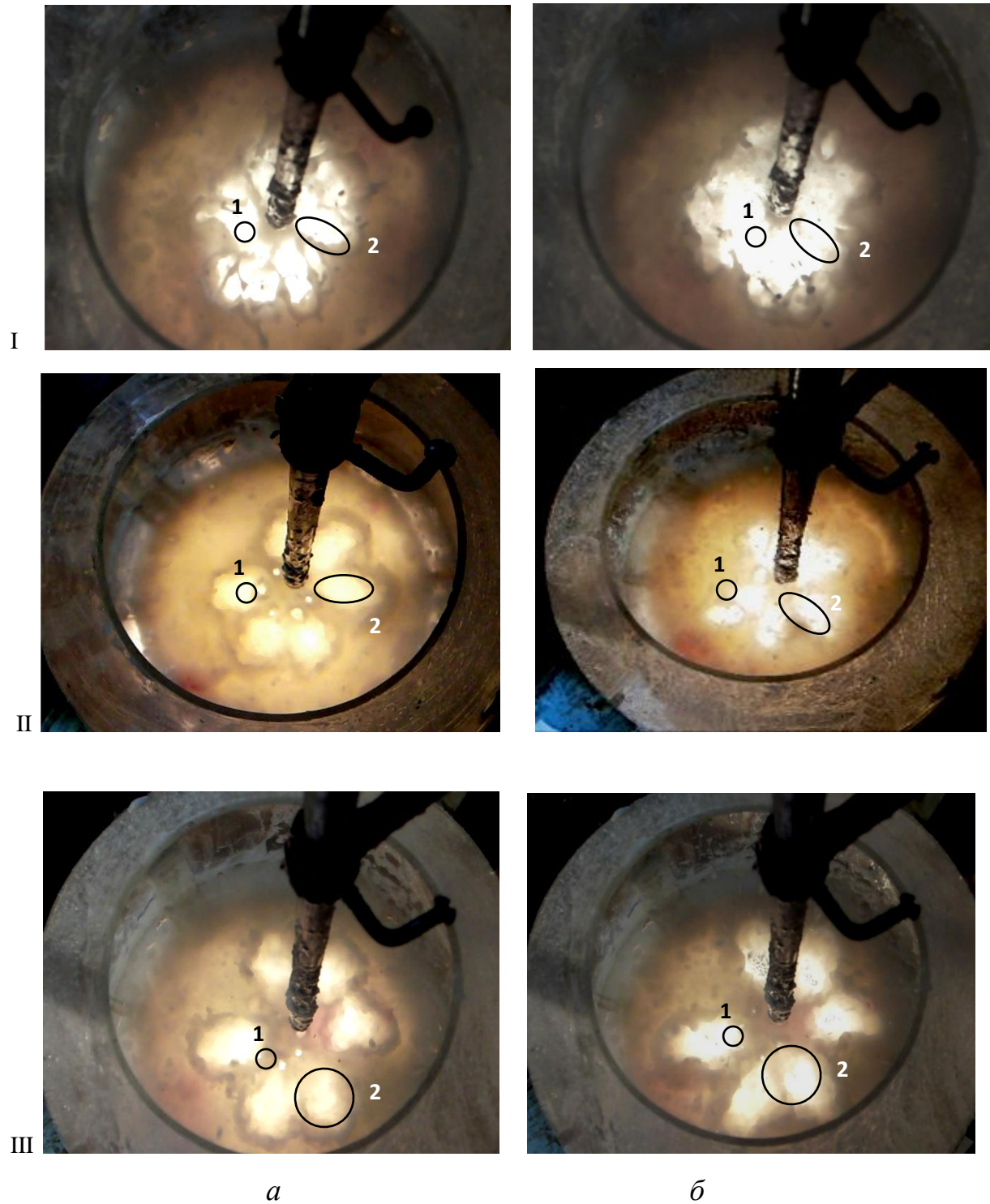


Рис. 3.2 - Картини комбінованого роздування за граничними режимами «без пробую» (а) та «з пробоем» (б) рідкої ванни: 1 – вихід газу крізь донні сопла; 2 – зони контакту верхніх струменів із ванною: I – висота верхньої фурми $H_{\phi}/d_{кр} = 15$ кал; $Q_{Г} = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; II - висота верхньої фурми $H_{\phi}/d_{кр} = 25$ кал; $Q_{Г} = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; III - висота верхньої фурми $H_{\phi}/d_{кр} = 40$ кал; $Q_{Г} = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

За результатами експериментів підтверджено, що як і при використанні тільки верхнього продування ванни [85, 86], можна виділити режими: «намивання» шлаку при утворенні неглибоких кратерів й відношенні висоти накопичника 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. До двох визначальних режимів віднесли «без пробою» та «з пробом ванни» верхніми та донними газовими струменями (рис. 3.1).

Встановлено, що як за першим, так і за другим режимами роздування відтіснення потоком газу, що виходить з донних фурм, шлаку від реакційних зон призводить до зменшення обсягів останнього, які придатні для винесення зворотнім газорідним потоком на стіни агрегату (рис. 3.2). За результатами моделювання визначений переважний вплив розташування донних фурм відносно зони взаємодії верхніх струменів із шлаковою ванною на співвідношення обсягів виносу бризок шлаку у напрямках різних зон футерівки та стовбура фурми. Встановлено, що визначальний вплив на напрям винесення крапель та висоту розташування секторів нанесеного на стіни шару рідини має співвідношення висоти розташування сопел верхньої фурми відносно донних (рис. 3.3) [76, 83]. Так, у досліджених діапазонах розташування верхньої фурми над рівнем ванни ($H_{\phi}=15-45$ кал.) пробивання струменями шару рідини супроводжується утворенням відбитих від поверхні останньої або днища конвертера (рис. 3.1, 3.2) зворотних газошлакових потоків, які формують відповідні зони з відокремлених колоподібних (рис. 3.2, в), еліпсоподібних кратерів (рис. 3.2, б) або об'єднаної зони (рис. 3.2, а). Зворотні газові потоки в залежності від висоти фурми над рідиною, розташовуються за межами (рис. 3.2, б) або перетинають зони виходу газу з донних вставок (рис. 3.2, а). Встановлено, що у визначеному діапазоні h_{ϕ}/d_{ϕ} (області на рис. 3.4, що обмежені вертикальними лініями) забезпечується зменшення «зашлакування» стовбура фурми із одночасним збільшенням обсягу крапель рідини, що спрямовані на стіни конвертера. У режимі роздування «без пробою»



Рис. 3.3 - Вигляд покриття, нанесеного на стіни моделі конвертера за режимами I - III (рис. 3.2) при висоті наконечника фурми у 15, 25 та 40 кал. відповідно

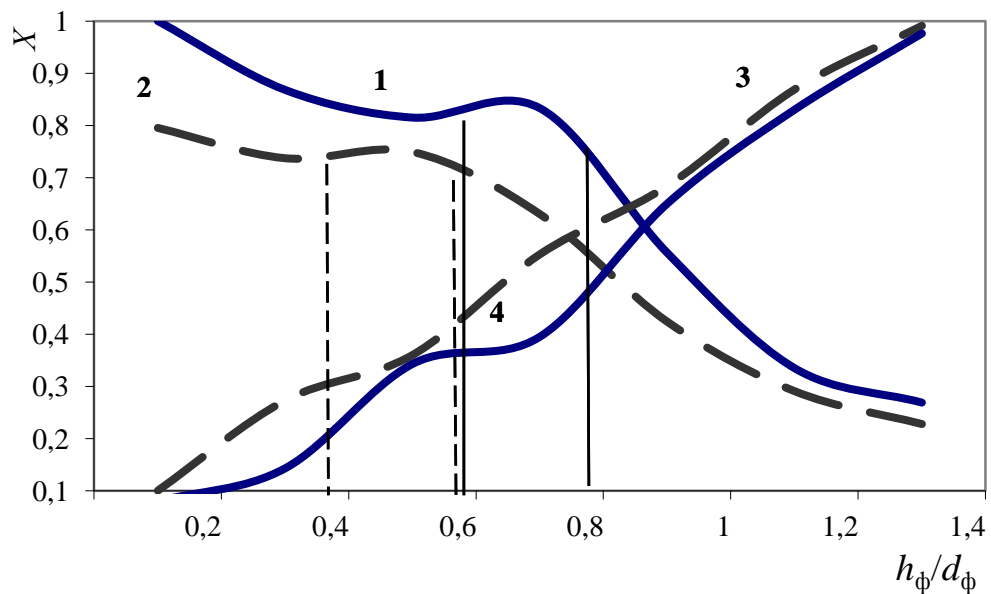


Рис. 3.4 - Залежність відносної густини (X) покриття краплями рідини стін конвертера (1, 2) та відношення зони, вільної від шлакового покриття на стовбурі фурми до її довжини (3, 4) від висоти розташування фурми та витрат газу: на одне сопло наконечника фурми: криві 1, 4 – $0,038 \text{ м}^3/\text{хв.}$; 2, 3 – $0,048 \text{ м}^3/\text{хв.}$ при витратах $0,08 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{хв.}$ - на одне донне сопло

ванни вплив потоку газу з донних сопел відображається у суттєвій дестабілізації кратерів у робочому просторі конвертера. При розташуванні фурми на висоті 40 кал. забезпечується практично повне пригнічення винесення крапель на стовбур фурми, але не досягається щільне покриття шаром рідини верхньої конусної частини агрегату.

Зі зменшенням висоти фурми до 25 кал. відбувається зменшення діаметру кратерів за великою віссю, розширення сектору винесення дрібних крапель рідини на стовбур фурми і верхню циліндричну область конвертера. Подальше зменшення висоти до 15 кал., із об'єднанням кратерів у одну реакційну зону (рис. 3.2, а), збільшує обсяги направленої винос крапель на стовбур фурми та верхню циліндричну і конусну частини конвертера за рахунок додаткового винесення крапель супутніми потоками газу з донних сопел.

Другий режим взаємодії дуття з рідкою ванною («з пробоем») (рис. 3.1, б) в умовах комбінованого роздування ванни також має відмінності від встановленого у [85, 86]. Так, у випадку розташування фурми на відстані 25 кал. забезпечується практично повне пригнічення винесення крапель рідини потоком газу з донних сопел із попередженням «зашлаковування» стовбура фурми при рівномірному за висотою шарі рідини на стінах (рис. 3.3). Потік газу з донних сопел змінює форму та розміри кратерів (кратери більше на 10-15% у порівнянні з верхнім роздуванням), підвищує висоту гребеню рідкої ванни та обсяги рідини, що викидається у напрямку стін конвертера.

Встановлено, що раціональний варіант комбінованого роздування ванни - режим II «з пробоем» ванни. У «ідеальному» технологічному варіанті ошлакування футерівки конвертера з комбінованим роздуванням шлакової ванни забезпечити рівномірне нанесення шлакового гарнісажу по всій висоті робочого простору можливо тільки у тому випадку, коли реалізується направлене бризковинесення шлаку з реакційної зони (рис. 3.5) з переміщенням крапель шлаку по висхідних траєкторіях в межах порожнини циліндра з роз-

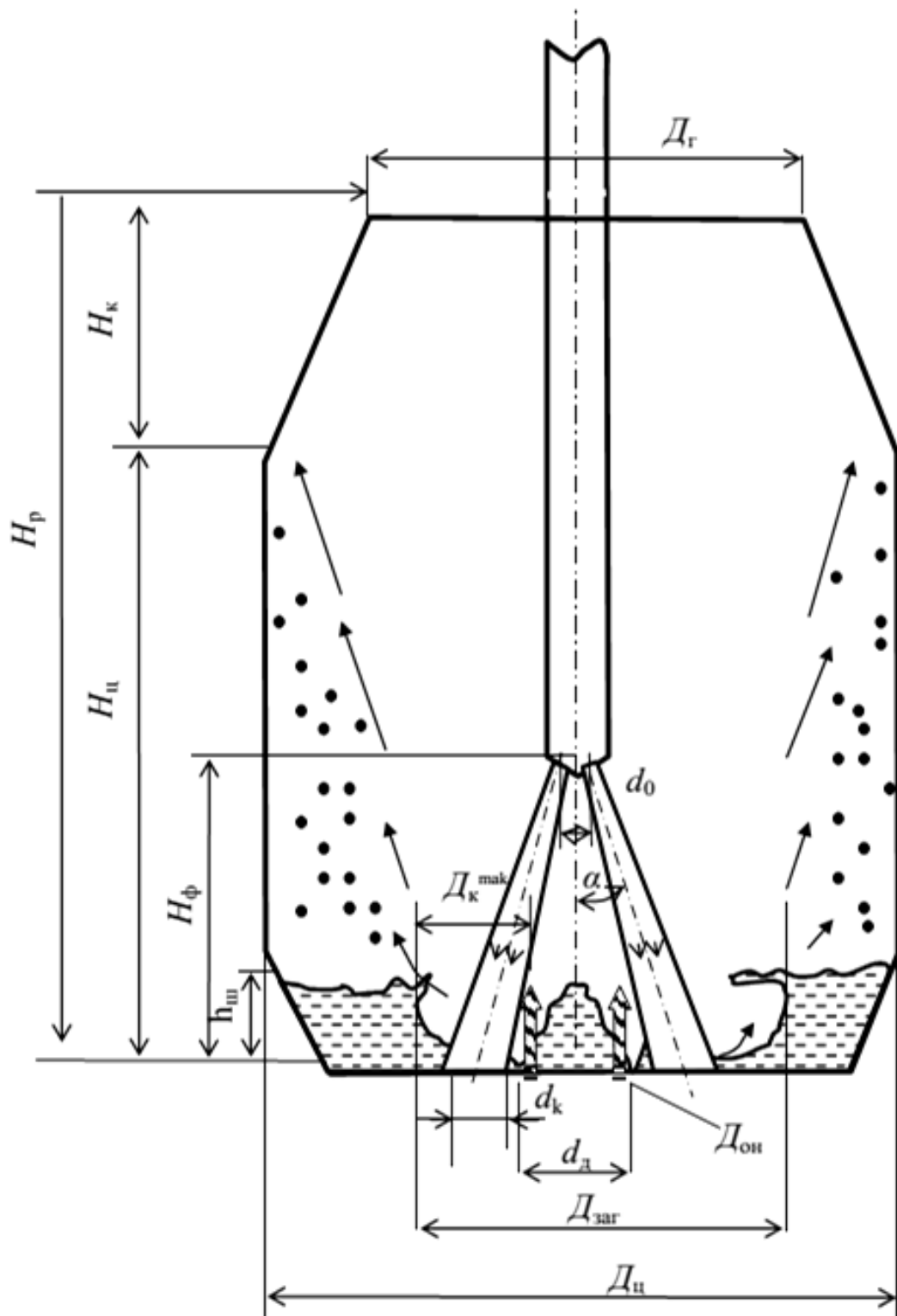


Рис. 3.5 - Схема нанесення шлакового гарнісажу ($D_{дон}$ – місце розташування донних вставок (сопел), $d_{д}$ - діаметр кола, що проходить крізь вісь донних сопел

мірами H_p (висота робочого простору конвертера) та $D_{ц}-D_{г}$ (різниця між діаметрами циліндричної частини конвертера та горловини) (рис. 3.5).

Перерозподіл направленої викиду шлакових крапель, формування гарнісажу заданої товщини визначаються структурою і розмірами (L_k , D_c , D_k , $D_{заг}$) утворених реакційних зон. Як відомо [75, 76, 86] максимальне бризковийнесення шлаку на футерівку досягається тільки при узгодженні розмірів реакційних зон, геометричних параметрів робочого простору конвертера та розташування донних сопел.

Обробкою даних фізичного моделювання встановлено, що перехід від першого до другого режиму взаємодії багатоструменевого газового дуття з шлаковою ванною (2.18) може бути описаний рівнянням

$$\frac{H_{\phi}}{d_{кр}^{\lambda}} = 218,5 \left(\frac{\Sigma i_z^o}{m_{ш} \cdot g} \right)^{0,162} \quad (3.1)$$

На основі отриманих даних для визначення загального діаметру реакційної зони (2.19) запропоновано використовувати вираз

$$D_{заг} = 10,6 \cdot H_{\phi} \left(\left(\frac{i_z}{\rho_{ш} \cdot g \cdot H_{\phi}^3} \right) \right)^{0,71} (1 + h_{ш} \cdot tg \alpha) + d_0 + 2(H_{\phi} + h_{ш}) tg \alpha \quad (3.2)$$

Максимальний діаметр окремої реакційної зони на поверхні шлаку для випадку «пробою» шлакової ванни при нижньому положенні фурми, орієнтовно визначається зі співвідношення

$$D_k^{\max} = 1,49 \cdot H_{\phi} \left[\frac{i_z}{\rho_{ш} \cdot g \cdot (H_{\phi})^3} \right]^{0,137} + d_0 \quad (3.3)$$

Оскільки діаметр основи (d_k) відокремленого кратера на днищі конвертеру збігається з діаметром похилого струменя, що вдувається на цьому рівні, то для його визначення можна застосувати рівняння [87] для випадку витікання надзвукових струменів в неізотермічних умовах

$$tg(\theta_{СЗВ}^{осн} / 2) = 0,165 Ma^{-0,876} n^{-0,121}, \quad (3.4)$$

де Ma – число Маха; n – параметр нерозрахунковості.

Значення робочої висоти фурми ($H_{\phi}^{раб}$) над рівнем шлакової ванни конвертера визначається за виразом

$$\frac{H_{\phi}^{раб}}{d_{кр}^л} = 61,1 \left(\frac{\Sigma i_z^0}{m_{ш} \quad g} \right)^{0,12} . \quad (3.5)$$

Згідно з виконаними розрахунками для умов 250-т конвертера КЦ ПАТ «ДМК» робочі висоти розташування наконечника штатної 6-ти соплової гарнісажної фурми повинні складати: від 0,40 до 0,55 м, що забезпечить утворення об'єднаної реакційної зони у межах малого кола донних вставок та від 1,50 до 1,65 м, що відповідає розташуванню кратерів у області між малим та великим колами донних вставок конвертера.

3.2 Результати моделювання гідрогазодинаміки верхнього роздування рідкої ванни з використанням одно- та двоярусної фурми

Для визначення впливу кількості сопел у наконечнику фурми та розробки завдання на проектування удосконаленої конструкції гарнісажної фурми для 250-т конвертера проведено серію експериментів на низькотемпературній моделі конвертера з максимально можливим зменшенням висоти розташування наконечника фурми над ванною. Як і у попередніх дослідженнях використовували прозору плексигласову модель конвертера в масштабі 1:18 по відношенню до 250-т агрегату ПАТ «Дніпровський МК» та наконечники фурм з 4-ма та 6-ма соплами Лаваля (див. розділ 2).

Внаслідок підвищення витрат газу з 0,24 м³/хв. до 0,36 м³/хв. (при збільшенні кількості сопел у наконечнику з 4-х до 6-ти) збільшилася інтенсивність «ошлаковування» стін моделі в навколоцапфових зонах (рис. 3.6, б). В той же час підвищена і ступінь «зашлаковування» стовбура фурми та винесення бризок клейстеру крізь горловину конвертера.

Встановлено, що найкращий варіант (у досліджених діапазонах), з точки зору рівномірного покриття стін «гарнісажем», досягається при викорис-

танні одноярусної фурми з 6-ма соплами ($\alpha_b=15$ град згрупованими в бік цапф), у режимі «з пробоем» ванни (рис. 3.7, б). В той же час, при використанні одноярусних фурм формування рівномірного за товщиною шару гарнісажного покриття по всій висоті за будь-яких варіантів конструкції наконечника та положенні фурми не забезпечується.

При використанні схеми роздування ванни двоярусними фурмами (рис. 2.1, рис. 2.6), встановлено, що у такому варіанті зменшилася як інтенсивність винесення крапель за межі конвертера так і ступінь «зашлаковування» стовбура фурми. Потік газу з додаткових бокових сопел 4 (рис. 2.1) забезпечив формування характерних «плям», при перенаправленні частини газорідного потоку у визначені сектори на стінах конвертера. Переважним місцем налипання бризок виявилися навколоцапфові зони агрегату, які мають вигляд своєрідних «овалів» (рис. 3.8), з площею, яка корелює з розрахунковими значеннями (див. розділ 4). Необхідно відмітити, що у площа «овалів» гарнісажу (гарнісажної «плями») збільшується пропорційно збільшенню кількості сопел у наконечнику фурми (рис. 3.8, б). Встановлено, що площа та висота гарнісажної «плями» 5 (рис. 3.8) у відповідному секторі на стінах, залежать також від відстані наконечника фурми від ванни та взаємного розташування вісей сопел верхнього блоку та сопел наконечника. Інтенсивність бризковиносу через горловину конвертера закономірно зменшується з переходом до використання двоярусних фурм з 4-ма і 6-ти згрупованими соплами в порівнянні з аналогічними конструкціями одноярусних фурм (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Маса крапель рідини, що винесені з конвертера (M_K) при роздуванні рідкої ванни двоярусною фурмою з 4-ма та 6-ма соплами у наконечнику в залежності від висоти фурми над ванною

№	h_f , см		l_a , см		4 сопла	6 сопел
					m , г	m , г
1	–	3	–	8	7,52	5,61
2	+	9	–	8	12,5	5,35
3	–	3	+	11	6,39	10,76
4	+	9	+	11	6,19	3,9

*a**б*

Рис. 3.6 - Вигляд моделі конвертера з покриттям стін клейстером після роздування ванни газовими струменями з використанням 6-ти соплових наконечників фурм: а) $Q = 0,24 \text{ м}^3/\text{хв.}$; $H_{\phi}/d_{\text{с}}^{\text{II}} = 12 \text{ кал.}$; б) $Q = 0,36 \text{ м}^3/\text{хв.}$; $H_{\phi}/d_{\text{с}}^{\text{II}} = 12 \text{ кал.}$

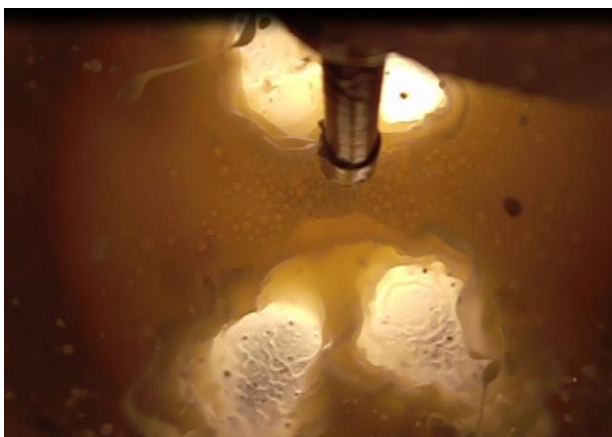
*a**б**в**г*

Рис. 3.7 - Вигляд реакційних зон взаємодії верхніх газових струменів з рідкою ванною при використанні 4-х (*a*, *в*) і 6-ти (*б*, *г*) соплових наконечників фурм у режимах «без пробую» (*a*, *г*) та «з пробоем» ванни (*б*, *в*)

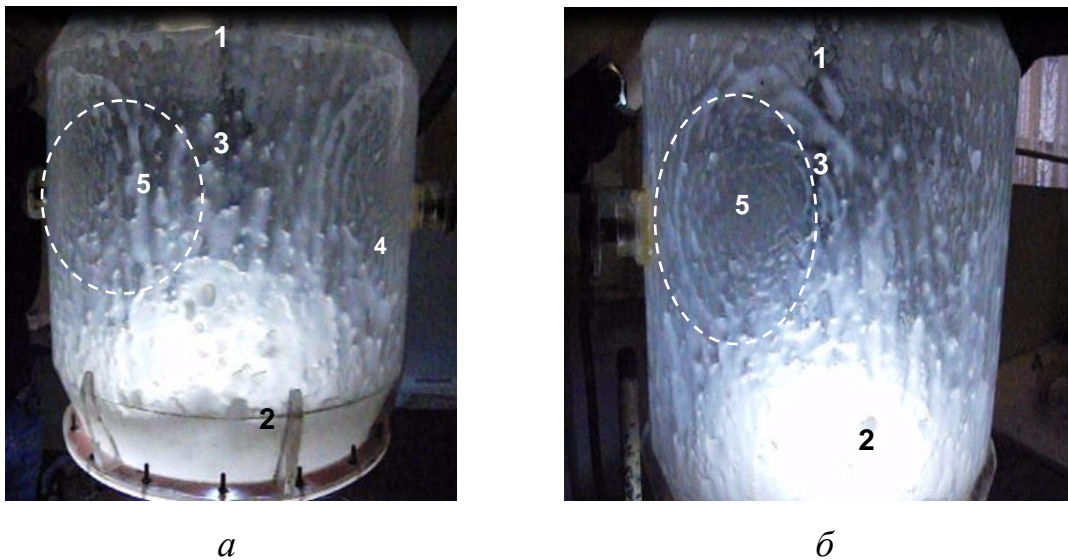


Рис. 3.8 - Вигляд гарнісажного покриття на стінах моделі конвертера при роздуванні рідкої ванни газовими струменями з використанням 4-х (а) та 6-ти (б) соплових наконечників двоярусної фурми: 1 - фурма; 2 – рідка ванна; 3 – другий ярус; 4 – цапфова зона; 5 – гарнісажна «пляма», яку сформовано шляхом перенаправлення частини зворотнього газорідинного потоку: а) $Q = 0,48 \text{ м}^3/\text{хв.}$; $H_{\phi}/d_{\text{с}}^{\text{II}} = 12 \text{ кал.}$; б) $Q = 0,72 \text{ м}^3/\text{хв.}$; $H_{\phi}/d_{\text{с}}^{\text{II}} = 12 \text{ кал.}$

При збільшенні відстані між ярусами 4-х соплової двоярусної фурми до максимальних (у дослідженому діапазоні) значень та відповідному зменшенні висоти наконечника фурми над ванною кількість рідини, що виноситься за межі конвертера мінімізується (рис. 3.9, а).

В той же час, збільшення відстані між ярусами для 6-ти соплового наконечника двоярусної фурми має негативний вплив на утримання рідини в межах робочого простору агрегату (рис. 3.8, б). Так, мінімізація винесення рідини у такому варіанті конструкції забезпечується при мінімальній відстані між ярусами та відповідно мінімально можливому нижньому положенні фурми над ванною. Зменшення інтенсивності бризковиносу за горловину конвертера у випадку застосування двоярусних фурм можна пояснити зміною траєкторії руху крапель рідини, що сприяє у тому числі, зменшенню «зашлакованості» стовбура фурми.

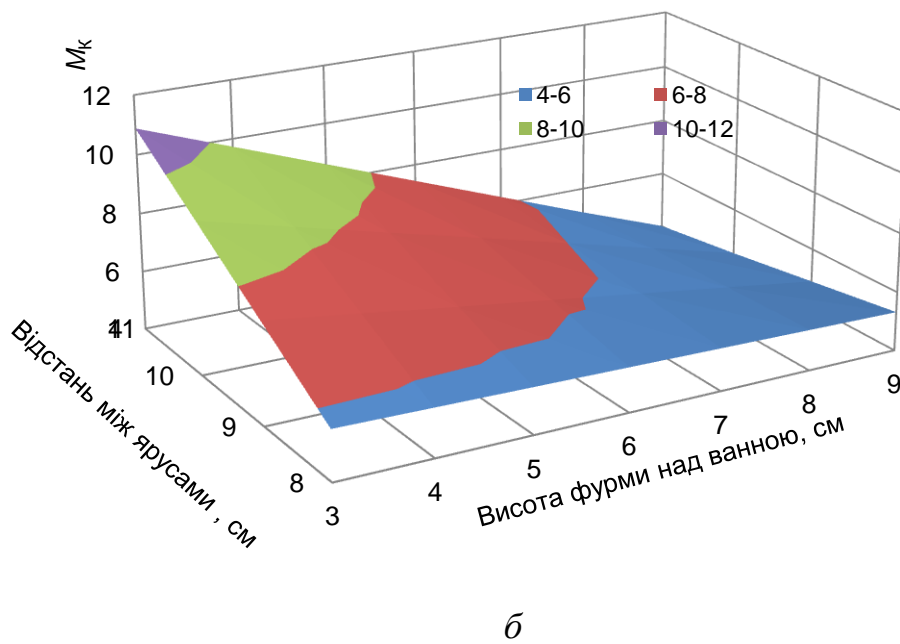
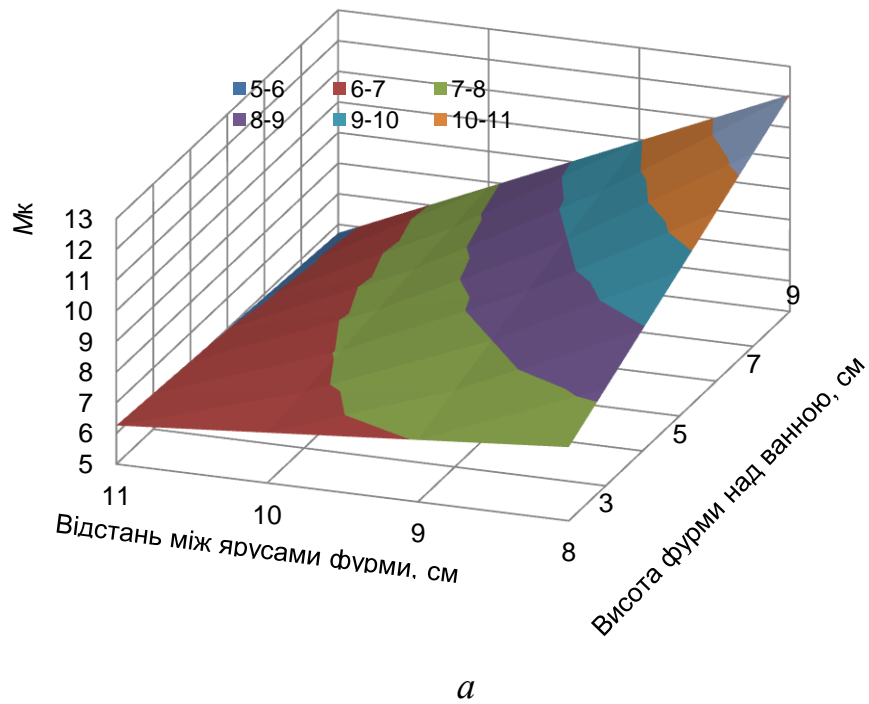


Рис. 3.9 - Поверхня відгуку, що відображає залежність маси рідини, ви-
несеної за межі конвертера, від висоти двоярусної 4-х (*a*) та 6-ти (*б*) соплової
фурми

3.3 Результати дослідження впливу конструкції фурми на рівномірність розподілу гарнісажного покриття на стінах конвертера

Результати проведених експериментів з визначенням товщини нанесеного гарнісажного покриття у різних зонах робочого простору моделі конвертера згідно з планом (табл. 2.3) представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати експерименту згідно матриці (табл. 2.3)

№	Фактори						Результати експерименту		
	H_B , см		h_Φ , см		$l_{я}$, см		B_Γ , см	C_Γ , см	$A_{\Gamma 2}$, см
1	-	1	-	3	-	8	0,4	0,3	28
2	+	3	-	3	-	8	0,2	1,1	15
3	-	1	+	9	-	8	0,3	0,2	19
4	+	3	+	9	-	8	0,1	0,7	35
5	-	1	-	3	+	11	0,8	0,3	29
6	+	3	-	3	+	11	0,2	1,0	20
7	-	1	+	9	+	11	1,0	0,2	30
8	+	3	+	9	+	11	0,4	0,6	22

За результатами обробки даних, отриманих у ході досліджень, запропоновані відповідні математичні моделі, придатні для визначення окремих конструктивних параметрів промислової конструкції двоярусної гарнісажної фурми, у натуральних величинах:

$$A_\Gamma = 80,895 - 37,835 \cdot H_B - 14,579 \cdot h_\Phi - 4,355 \cdot l_{я} + 8,622 \cdot H_B \cdot h_\Phi + 3,015 \cdot H_B \cdot l_{я} + 1,326 \cdot H_B \cdot l_{я} - 0,7739 \cdot H_B \cdot h_\Phi \cdot l_{я} \quad (3.6)$$

$$B_\Gamma = -0,642 + 0,43 \cdot H_B - 0,1476 \cdot h_\Phi + 0,1507 \cdot l_{я} - 0,067 \cdot H_B \cdot l_{я} + 0,0166 \cdot h_\Phi \cdot l_{я} \quad (3.7)$$

$$C_\Gamma = -2,5825 + 6,0825 \cdot H_B + 0,0825 \cdot h_\Phi + 0,168 \cdot l_{я} - 0,2475 \cdot H_B \cdot h_\Phi - 0,1675 \cdot H_B \cdot l_{я} \quad (3.8)$$

Використання отриманих залежностей (3.6-3.8) для чисельного експерименту дозволило встановити особливості використання двоярусної фурми для роздування ванни у дослідженому діапазоні характеристик операції.

Так, мінімізація протяжності зони «зашлакованості» стовбура фурми забезпечується при висоті розташування наконечника фурми над ванною у діапазоні від 2,5 до 4,2 кал. (рис. 3.10) та відстані між ярусами сопел у 9,6 кал.

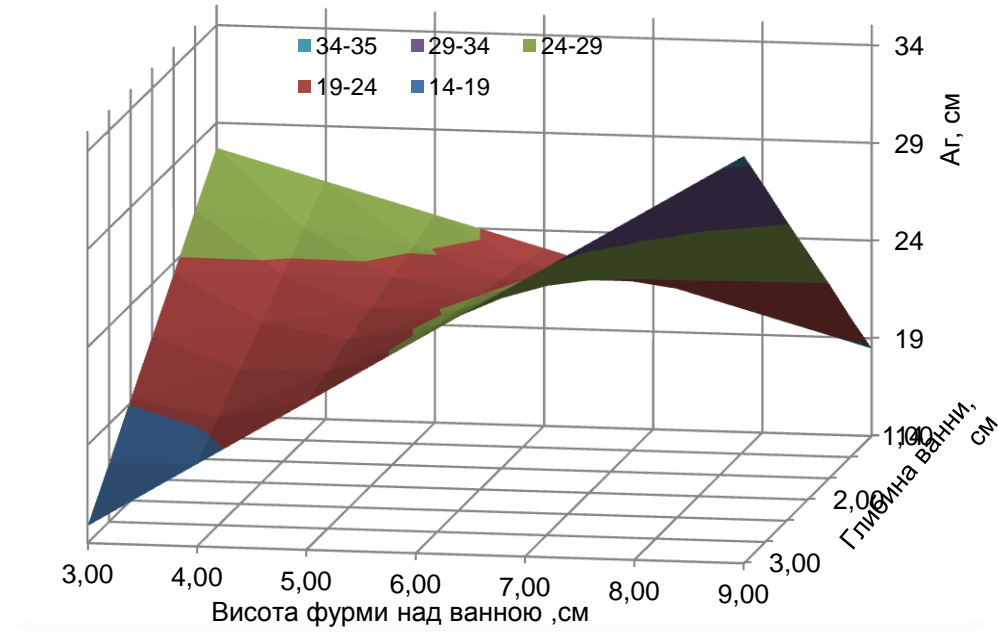
Характер впливу рівня ванни на «зашлакованість» стовбура при переміщенні фурми по висоті різнонаправлений.

Перехід до відстані у 12 кал. між ярусами сопел, при одночасному збільшенні глибини шлакової ванни, призводить до інтенсивного покриття стовбура фурми шлаковим шаром. Визначений раціональний рівень глибини ванни та співвідношення між A_T та висотою розташування фурми над ванною. Різконаправлений характер впливу відстані між ярусами на величину B_T встановлений для діапазонів у 9,6 та 12 кал. (рис. 3.11). Так, при 9,6 кал. між ярусами по мірі підйому наконечника фурми над ванною товщина гарнісажного шару на стінах зменшується, а для 12 кал. – збільшується.

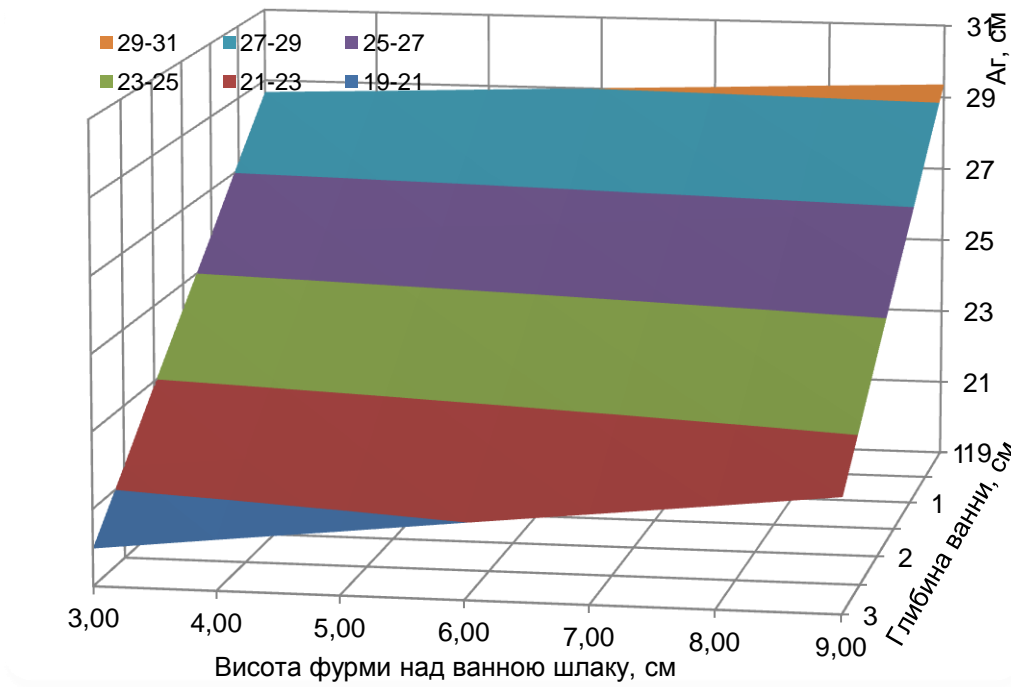
Встановлено існування характерних зон з «піковими» значеннями показників у діапазонах глибини ванни у 1,33-2,0 см при 5 кал. висоти фурми та 9,6 кал. між ярусами та 2,33-3,0 см при 7 кал. висоти та 12 кал. між ярусами відповідно (рис. 3.11).

Встановлено також, що при висоті розташування наконечника фурми у 5,8 кал. та глибині ванни 1,4-2,5 кал. для відстані між ярусами сопел у 9,6 кал. спостерігається стале збільшення величини C_T , а при зменшенні глибини шлакової ванни по ходу її роздування на стіни – значення C_T різко зменшується (рис. 3.12), що відповідає уявленням щодо характеру впливу потоків з бокових сопел на можливість перенаправлення частини газшлакового потоку на визначені зони стін агрегату (рис. 2.1).

При збільшенні відстані між ярусами сопел до 12 кал. вплив висоти розташування наконечника фурми на величину C_T стабілізується (рис. 3.12, б).

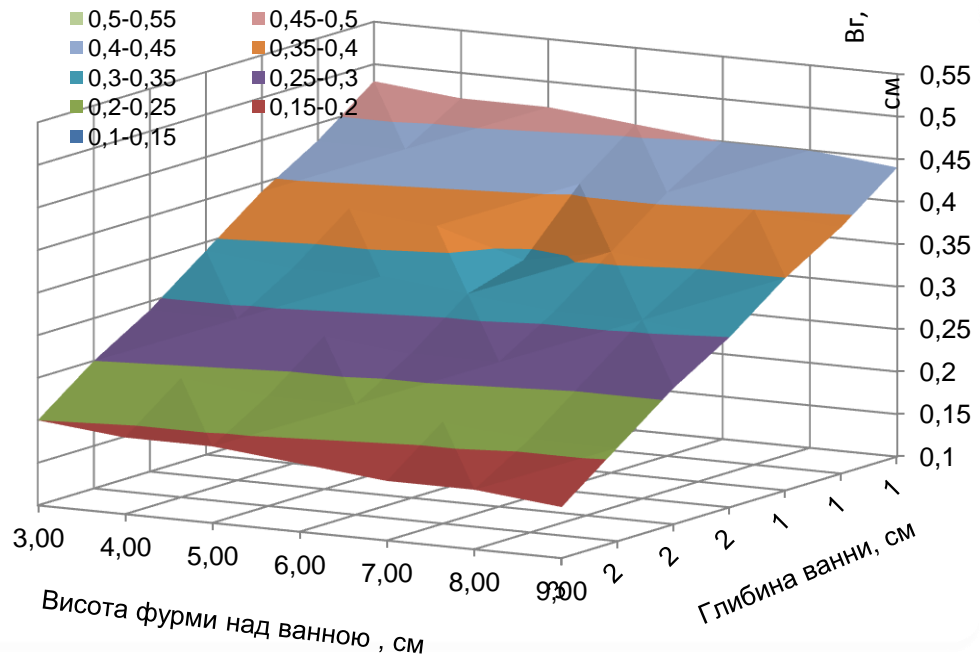


a

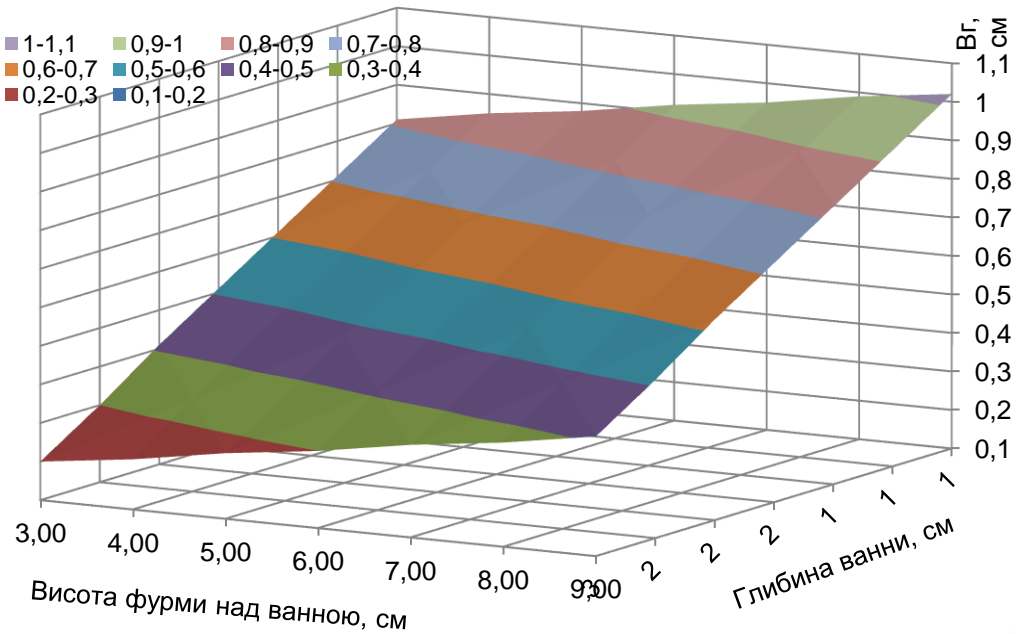


б

Рис. 3.10 - Поверхня відгуку висоти фурми та глибини рідкої ванни на довжину зони «зашлакованості» стовбура двоярусної фурми при відстані між ярусами у 9,6 кал та 12 кал.

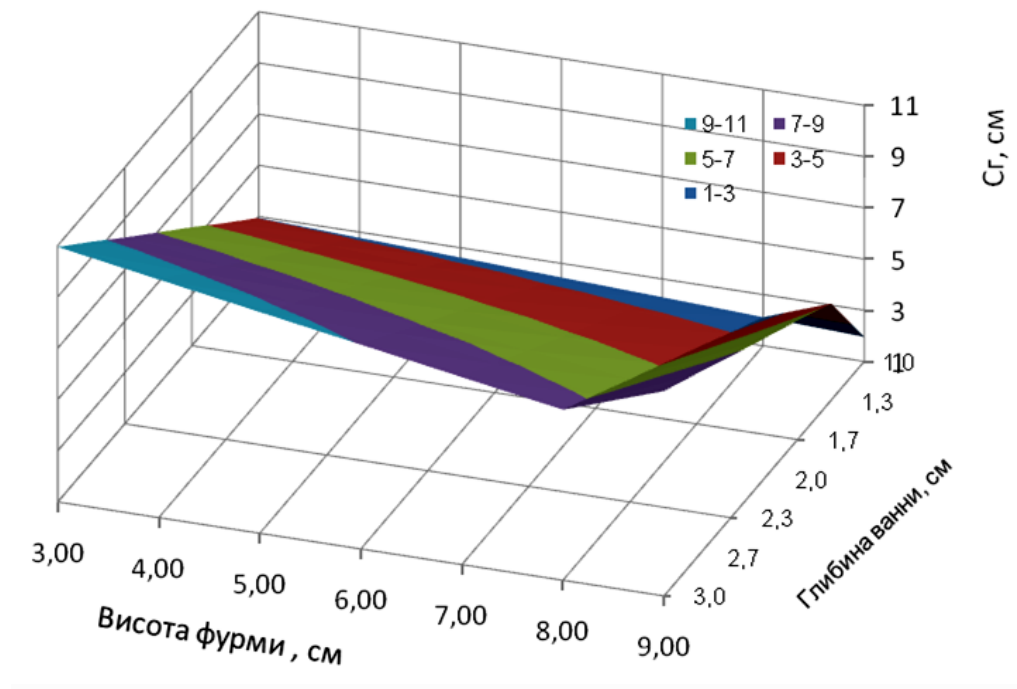


a

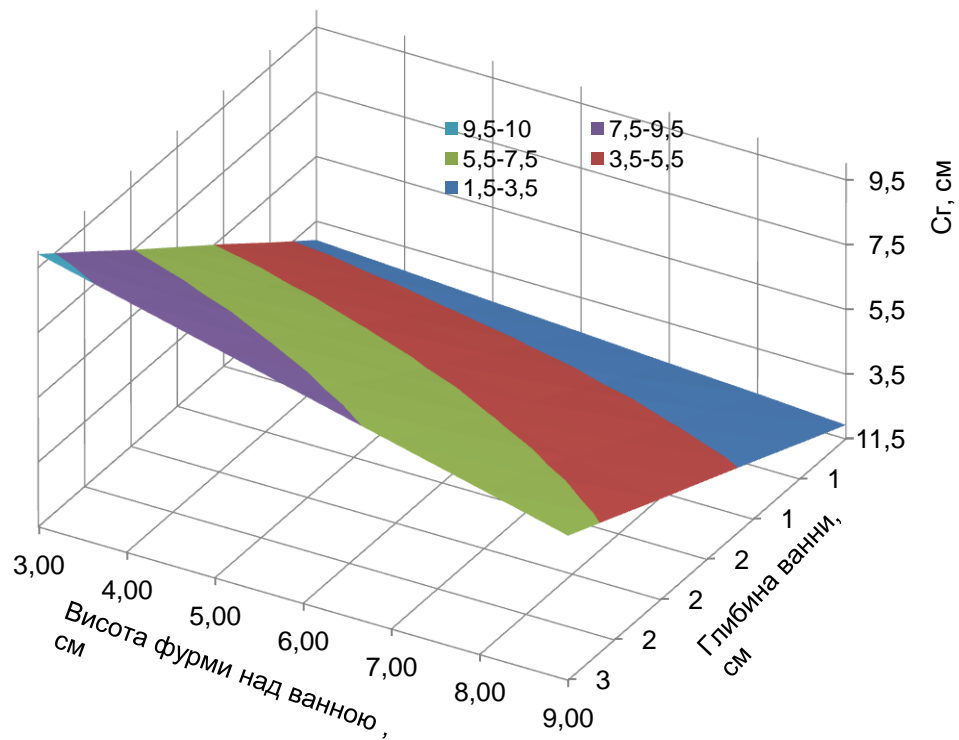


б

Рис. 3.11 - Поверхня відгуку, що відображає залежність товщини шлакового гарнісажу на стінах конвертера від висоти двоярусної фурми та глибини рідкої ванни при відстані між ярусами у 9,6 кал. (а) та 12 кал. (б)



а



б

Рис. 3.12 - Поверхня відгуку, що відображає ширину зони гарнісажного покриття на стінах конвертера, сформовану під впливом струменів з додаткових бокових сопел двоярусної фурми на зворотній газорідинний потік при відстані між ярусами у 9,6 кал. (а) та 12 кал. (б)

З точки зору забезпечення максимальних значень C_r у такому випадку раціональним є підтримання максимального рівня ванни при мінімально можливій висоті наконечника фурми. Найбільш доцільним є розташування наконечника фурми на висоті 2,5-5 кал. у всіх діапазонах глибини шлакової ванни.

Таким чином, за результатами експериментів можна зробити висновок про можливість подальшого удосконалення запропонованої конструкції дво-ярусної фурми (див. розділ 5) [89] у наступних напрямках: заміна шестисоплового наконечника на чотирьохсопловий із згрупованими у напрямках цапфених зон соплами Лаваля збільшеного діаметру; перехід до використання газоохолодження фурми із можливістю оперативної зміни відстані між ярусами по ходу кампанії конвертера по футерівці [77, 90].

3.4 Висновки за розділом 3

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. До основних визначальних режимів віднесені «без пробою» та «з пробоем» ванни.

2. Встановлено, що і за першим, і за другим режимах роздувки переміщення потоком газу, що виходить з донних фурм, шару рідкої ванни від реакційних зон (кратерів) взаємодії з верхніми струменями призводить до зменшення обсягів рідини, що виноситься на стіни зворотнім газорідним пото-

ком. У режимі роздувки «без пробою» ванни вплив потоку газу з донних сопел відображається у вигляді суттєвої дестабілізації кратерів рідкої ванни.

3. Встановлено, що в залежності від висоти розташування фурми над ванною зони зворотних газорідних потоків розташовуються перед, за межами або перетинаються із зонами виходу газу з донних фурм. Переважний вплив на співвідношення обсягів виносу крапель рідини на стіни конвертера та стовбур фурми має висота розташування наконечника фурми відносно донних фурм.

4. Потік газу з донних фурм змінює форму та розміри кратерів (збільшує на 10-15%), у порівнянні з тільки верхнім роздуванням, підвищує висоту гребеню кратерів та обсяги рідини, що викидається у напрямку стін конвертера. Раціональним варіантом комбінованого роздування ванни можна вважати режим «з пробоем» ванни. Запропоновані емпіричні вирази для визначення умов переходу від режиму роздування ванни «без пробою» та «з пробоем», загального діаметру реакційної зони взаємодії газових струменів з ванною та раціональної робочої висоти розташування наконечника фурми.

5. Встановлено, що при збільшенні відстані між ярусами двоярусної фурми з 4-х сопловим наконечником до максимальних (у дослідженому діапазоні) значень та відповідному зменшенні висоти наконечника фурми над ванною кількість рідини, що виноситься за межі конвертера мінімізується у порівнянні з іншими режимами роздування та взаємного розташування ярусів. Збільшення відстані між ярусами для 6-ти соплового наконечника має негативний вплив на утримання винесених крапель рідини в межах робочого простору агрегату.

6. Визначальним параметром запропонованої схеми перенаправлення частини зворотнього газорідного потоку на визначені сектори на стінах конвертера є площа перетину бокових струменів з потоком та діаметр утвореної реакційної зони перетину. Показано, що боковими струменями покривається лише 29,5 % робочої поверхні конвертера, що свідчить про достатню ступінь локалізації у просторі впливу додаткових бокових струменів.

7. З використанням методів планування експерименту досліджені вплив взаємного розташування ярусів сопел та положення двоярусної фурми над ванною по ходу роздування останньої на гідрогазодинамічні закономірності формування гарнісажного покриття та ефективність використання підготовленого шлаку. Отримані математичні моделі для визначення висоти та товщини гарнісажного шару на стінах конвертера і «зашлакованості» фурми в залежності від конструкції наконечника двоярусної фурми та дуттьового режиму роздувки ванни.

8. Мінімізація зони «зашлакованості» стовбура фурми забезпечується при висоті розташування наконечника фурми над ванною у діапазоні від 2,5 до 4,2 кал. та відстані між ярусами сопел у 9,6 кал. Встановлено існування зон з «піковими» значеннями показників товщини гарнісажного покриття на стінах конвертера у діапазонах глибини ванни у 1,33-2,0 см при 5 кал. висоти фурми та 9,6 кал. між ярусами та 2,33-3,0 см при 7 кал. висоти та 12 кал. між ярусами відповідно.

9. Встановлено, що при висоті розташування наконечника фурми у 5,8 кал., глибині ванни 1,4-2,5 кал. і відстані між ярусами сопел у 9,6 кал. спостерігається стале збільшення величини ширини зони гарнісажу (C_T) на стінах, а при зменшенні глибини ванни по ходу її роздувки – значення C_T різко зменшуються. Раціональним є розташування наконечника фурми на висоті 2,5-5 кал. у всіх діапазонах глибини рідкої ванни. Для умов 250-т конвертера з комбінованим продуванням ПАТ «ДМК» робочі висоти розташування наконечника 6-ти соплової гарнісажної фурми повинні складати від 0,40 до 0,55 м, що забезпечить утворення об'єднаної реакційної зони у межах малого кола донних вставок та від 1,50 до 1,65 м.

З матеріалами розділу можна ознайомитись у публікаціях [75, 78, 83, 84, 88, 100].

РОЗДІЛ 4

ЧИСЕЛЬНЕ ТА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ ШЛАКОВОГО ГАРНІСАЖНОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНІ ВОГНЕТРИВІВ

4.1 Чисельне моделювання процесу утворення шлакового гарнісажного покриття на робочому шарі футерівки конвертера по ходу роздування шлакової ванни

З метою визначення раціональних режимів роздування шлакової ванни з метою формування шлакового гарнісажу на футерівці конвертера у дисертаційній роботі було розроблено математичну модель гідрогазодинаміки роздувки шлакової ванни [91]. У моделі враховується вплив кута нахилу сопел Лавалю та положення наконечника фурми на характер розподілу газошлакового потоку в робочому просторі конвертера, форма та розміщення утворених на стінах агрегату шлакових «плям» (рис. 4.1), з врахуванням результатів роботи [92].

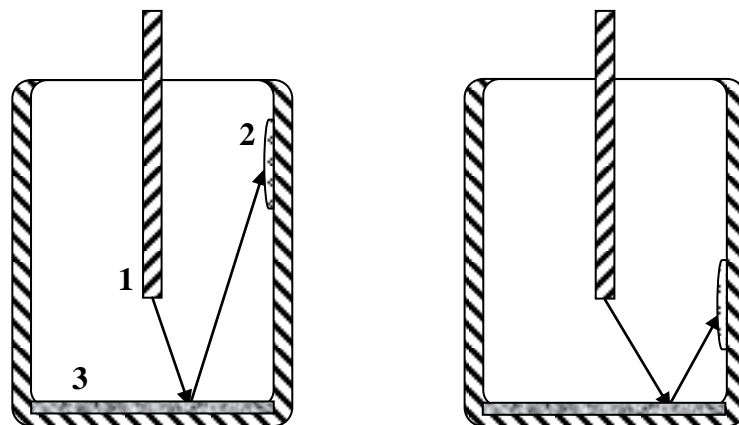


Рис. 4.1 - Залежність розташування шлакової «плями» 2 на стіні конвертера від кута нахилу сопел 1 та зміни розташування наконечника фурми над дном агрегату по ходу роздування шлакової ванни 3

На відміну від [92], у запропонованій моделі [91] враховано, що багатосопловий (4-6-ть сопел Лавалю) наконечник фурми розташований нерухомо відносно її вісі, але задана можливість переміщення його відносно висоти з відповідною зміною місця утворення шлакової «плями» (рис. 4.1).

Розроблена математична модель [91] базується на наступних припущеннях:

1. Під дією газових струменів на поверхні шлакової ванни утворюється кратер з визначеною глибиною та радіусом, з поверхні якого відривається потік крапель шлаку, що має форму конусу і рухається в напрямку до внутрішньої стіни конвертера, утворюючи зворотній газошлаковий потік.

2. Форму поверхні днища конвертера прийнято плоскою та розташованою перпендикулярно до вісі фурми. Перше та друге припущення дозволяють врахувати залежність висоти нанесення шару гарнісажу на стіни конвертера від розташування та куту нахилу сопел фурми.

3. Потік крапель шлаку, який виноситься за межі кратера, є прямо пропорційним до інтенсивності подачі газу на роздувку ванни. Таке припущення дозволяє дослідити вплив імпульсу струменів, які витікають із сопел Лавалю з різними діаметрами [93, 94], на результати роздувки шлакової ванни (форму та площу шлакової «плями» на стінах агрегату).

4. Задачу прийнято циліндрично симетричною відносно вісі газошлакового потоку, зокрема відхиляючою дією сили тяжіння на дисперсну фазу нехтуємо. Таке припущення дозволяє при використанні циліндричної системи координат з віссю, що співпадає з віссю симетрії потоку, звести задачу до циліндрично двовимірної.

5. Сумарний об'ємний вміст шлакових крапель в газовій фазі при втратах, що вивчаються, невеликий, тому вона розглядається як дисперсна фаза.

Таким чином, математична модель, з урахуванням зроблених припущень, має наступний вигляд. Крім газової фази-носія з об'ємною густиною α , враховуються ще й дисперсна фаза: краплі шлаку характерного розміру з

об'ємною густиною η . Рівняння перенесення шлакової фази у газошлаковому потоці записується у вигляді:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\eta \vec{v}_h) = \vec{\nabla} \cdot (D_h \vec{\nabla} \eta) + x \psi \quad (4.1)$$

де \vec{v}_h - швидкість фази η ; D_h - ефективний коефіцієнт дифузії, що враховує турбулентні складові; $x = \rho_g^o / \rho_i^o$ - малий параметр; ψ - об'ємна густина джерела шлакової фази.

Так як $\alpha + \eta = 1$, рівняння переносу газової фази впливає з рівняння (4.1), ніякої додаткової інформації не несе і тут його розглядати не будемо. Швидкості газової фази \vec{v}_g і дисперсної фази \vec{v}_t визначаються з рівнянь, записаних у наближенні малої об'ємної густини дисперсної фази (припущення 5) і нестисливості газової фази:

$$\frac{d_g \vec{v}_g}{dt} = -\vec{\nabla} p' + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}^k v_g^k) - \vec{f}_D + \psi \vec{v}_g, \quad (4.2)$$

$$(\eta) \frac{d_t \vec{v}_t}{dt} = x \vec{f}_D. \quad (4.3)$$

Тут $\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla}$ - субстанціональна похідна i -ї фази (несучої газової при $i = g$, або дисперсної при $i = t$), $p' = p / \rho_g^o$ - тиск, нормований на дійсну густину газу, \vec{v} - тензор ефективної кінематичної в'язкості, що враховує турбулентні ефекти; x - малий параметр і \vec{f}_D - об'ємна густина сили міжфазної взаємодії, яка (у відповідності до припущення, що сила міжфазної взаємодії газу і часток дисперсної фази пропорційна квадрату міжфазної швидкості) визначається виразом:

$$\vec{f}_D = -C_D \frac{|\vec{v}_{tg}|}{d} \vec{v}_{tg}, \quad (4.4)$$

у якому $\vec{v}_{tg} = \vec{v}_t - \vec{v}_g$ - швидкість дисперсної фази відносно газової, c_D - коефіцієнт опору і d - характерний розмір крапель шлаку, які є дисперсною фазою.

Рівняння (4.2) - (4.3) замикаються співвідношенням, що випливає з закону збереження маси, яке у розглянутому наближенні нестисливої газової фази записується у вигляді:

$$\vec{\nabla} [\alpha \vec{v}_g + \eta \vec{v}_t] = -(1-x) \psi . \quad (4.5)$$

При малому x (у нашому випадку воно має порядок 10^{-3}) правую частину рівняння (4.3) можна знехтувати і скрізь, де присутня помітна кількість дисперсної фази ($\eta \neq 0$), замість (4.3) одержуємо $\frac{d_t \vec{v}_t}{dt} = 0$, а замість (4.5) отримаємо вираз

$$\vec{\nabla} [\alpha \vec{v}_g + \eta \vec{v}_t] = -\psi . \quad (4.6)$$

Рівняння моделі доповнюються наступними граничними умовами. Для швидкостей: у вершині газошлакового потоку – швидкості потоку з врахуванням заданого кута розкриття струменя; на твердих поверхнях – умови не протікання; на вісі симетрії – умови симетрії.

Окрім того, на стінах конвертера – умови часткового налипання шлакового шару, а усіх інших границях – вільного ковзання. На η накладені крайові умови $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \eta \big|_S = 0$, де \vec{n} - вектор, який перпендикулярний до границі. Шлакова фаза враховується у об'ємі конвертера за допомогою складової ψ у рівнянні (4.1). Модель (4.1-4.6) реалізована чисельно. Рівняння моделі, які записані у циліндричних координатах, апроксимуються кінцевими різницями на шахматній сітці. Отримані системи алгебраїчних рівнянь вирішуються методом звичайної ітерації.

Подальше вдосконалення описаної математичної моделі полягало в перенесенні її у тривимірний простір з врахуванням геометрії промислового

кисневого конвертера за умов зміни положення наконечника фурми над шлаковою ванною та куту нахилу сопел Лаваля (15^0-17^0) до вісі фурми.

З цією метою, у процесі чисельного моделювання відбувається перенесення інформації про розподіл дисперсної фази в шлаковій «плямі», отриманої в розрахунках за допомогою базової вісесиметричної моделі (4.1-4.6), на поверхню внутрішньої стінки конвертера. Оскільки потік крапель шлаку в реальній системі направлений не під прямим кутом до циліндричної стінки конвертера, то відповідна шлакова «пляма», що утворюється від цього потоку, є перерізом конусу на стіні конвертера. При цьому розподіл дисперсної фази в «плямі» відповідно є нерівномірним за висотою.

Із використанням розробленого у рамках досліджень [91] програмного забезпечення було проведено серію чисельних експериментів. На рис. 4.2-4.3 наведені результати чисельного моделювання досліджених режимів зміни розташування наконечника фурми над днищем конвертера (H_{ϕ}) та співвідношення тривалості подачі газу на роздування шлакової ванни на кожній позиції за відносним часом знаходження наконечника фурми (τ):

I режим: $H_{\phi} = 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ при $\tau = 1:1:1$ відповідно.

II режим: $H_{\phi} = 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ при $\tau = 1:2:3$ відповідно.

III режим: $H_{\phi} = 5 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ при $\tau = 1:1:2$ відповідно.

IV режим: $H_{\phi} = 5 \text{ м}, 4 \text{ м}, 3 \text{ м}, 1 \text{ м}$ при $\tau = 1:1:1:2$ відповідно.

Отриманий розрахунками розподіл по висоті та відносній густині сформованого гарнісажної шлакової «плями», нанесеної по режимах 3 та 4, представлений на рис. 4.2.

Результати моделювання впливу діаметра сопел Лаваля на площу та відносну густину шлакової «плями» для умов використання штатної гарнісажної фурми ПАТ «Дніпровський МК» (рис. 1.12) наведені на рис. 4.3.

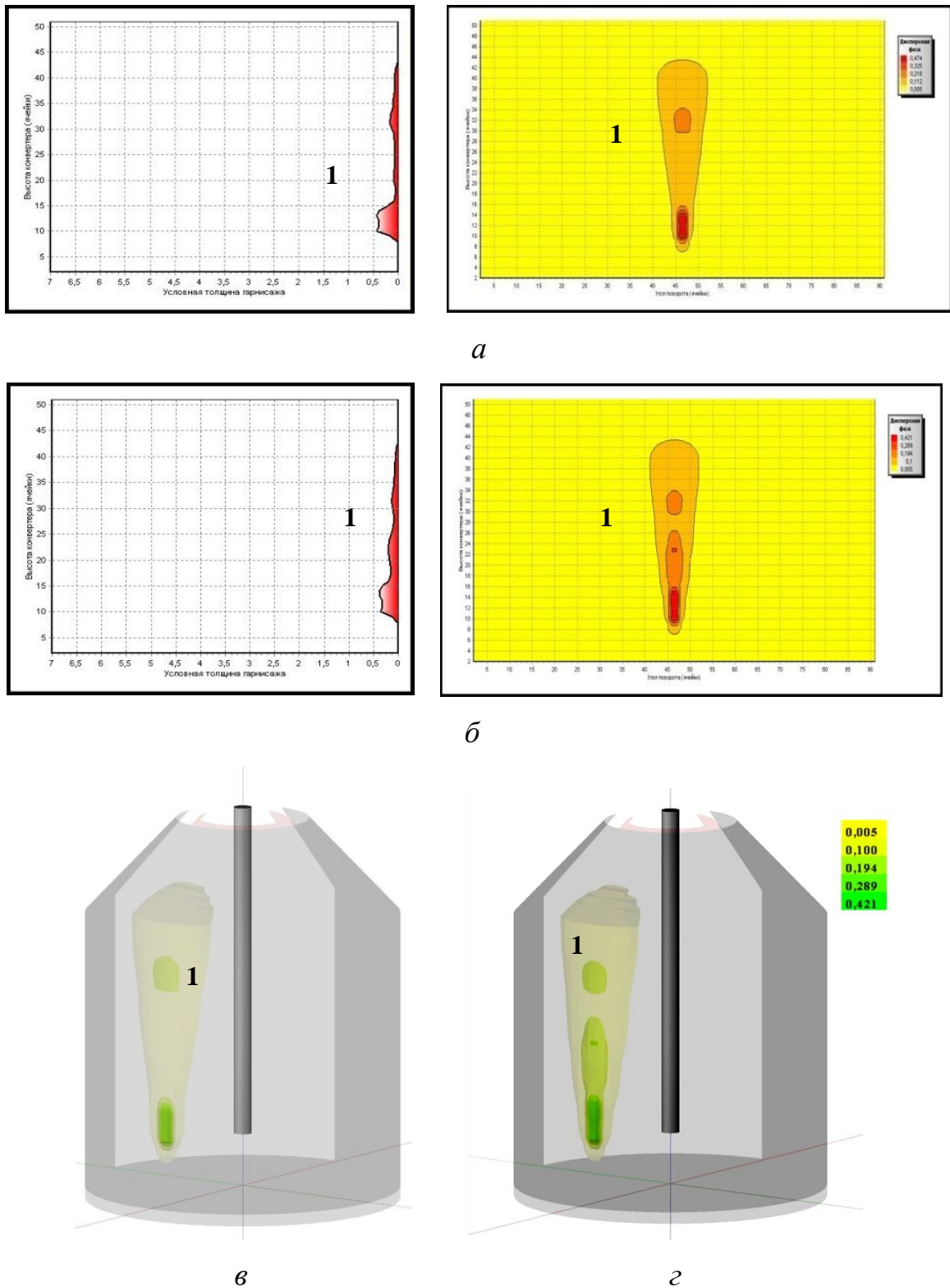


Рис. 4.2 - Перетин та розподіл шару шлакової «плями» (1) за густиною на стіні та конусній частині конвертера для III-го (а, в) та IV-го (б, г) режимів роздування шлакової ванни (для одного сопла Лаваля) [91]

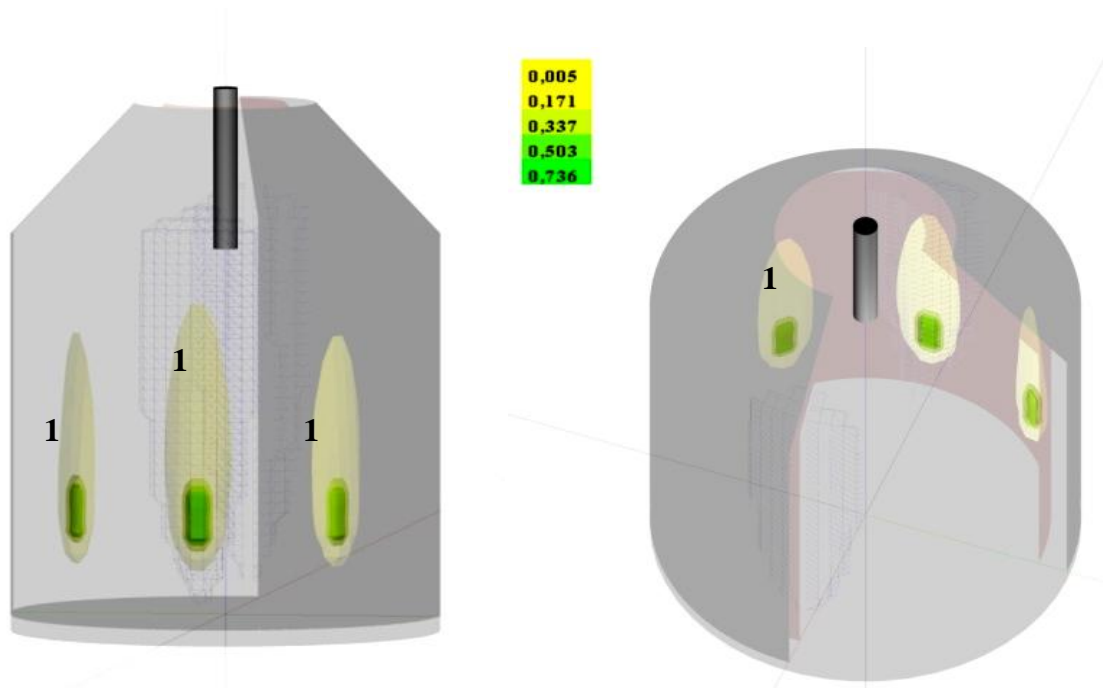


Рис. 4.3 - Залежність площі та густини шлакової «плями» від діаметру сопел (для двох різних критичних діаметрів) штатної гарнісажної фурми конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК»

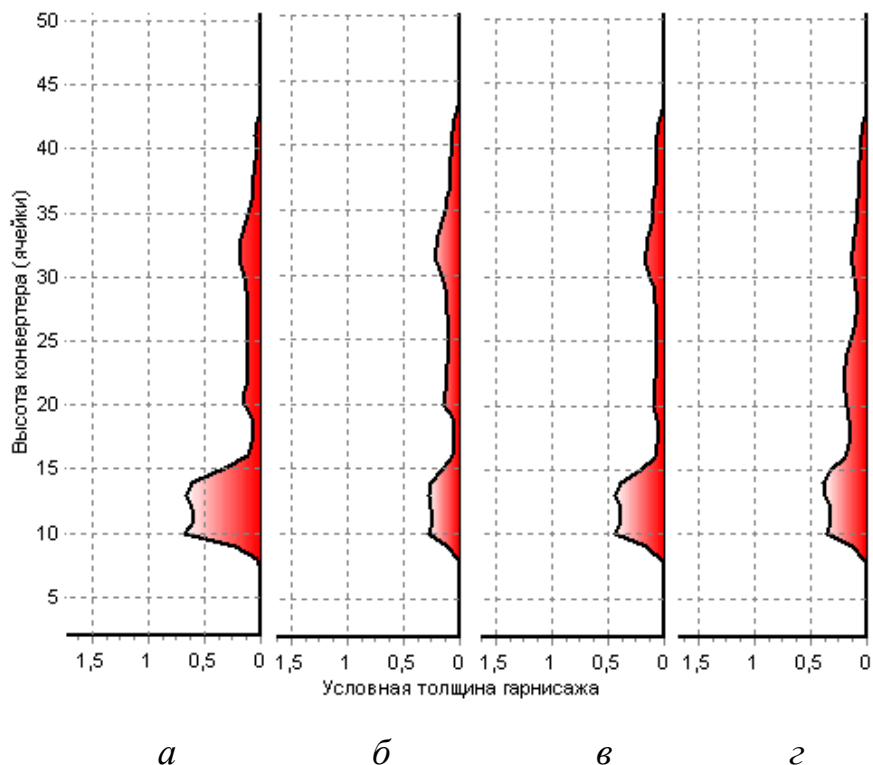


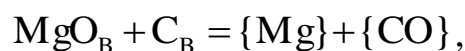
Рис. 4.4 - Перерізи шару утвореної шлакової гарнісажної «плями» на стіні конвертера для різних режимів роздування шлакової ванни: а) H_{ϕ} : 5 м, 3 м, 1 м при $\tau = 1:1:1$ відповідно; б) $H_{\phi} = 5$ м, 3 м, 1 м при $\tau = 1:2:3$ відповідно; в) $H_{\phi} = 5$ м, 3 м, 1 м при $\tau = 1:1:2$ відповідно; г) $H_{\phi} = 5$ м, 4 м, 3 м, 1 м при $\tau = 1:1:1:2$ відповідно

Як видно з рис. 4.3 зменшення критичного діаметру сопел Лавалю у призводить до відповідного послаблення газошлакового потоку та зменшення густини шлакової «плями». Отримані розрахунком перетини нанесеного на стіни шару шлакового гарнісажу (рис. 4.4), в залежності від обраного режиму роздування, дозволяють зробити наступні висновки.

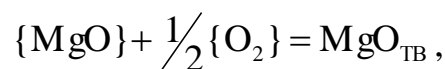
При збільшенні тривалості вдування газу та розміщення наконечника фурми на найменшій висоті (режим IV, рис. 4.4, г) може бути забезпечений відносно рівномірний за товщиною гарнісажний шар. У випадку необхідності нанесення гарнісажного шару збільшеної товщини у визначеній зоні (наприклад, у цапфеній зоні конвертера, у діапазоні дільниць 7-14, наведених на рис. 4.4), доцільним можна вважати використання режиму I.

4.2 Термодинамічна оцінка впливу реакцій на границі шлак-вогнетрив на умови руйнування периклазовуглецевих вогнетривів

На границі «рідкий шлак – MgO_B вогнетрив» окрім реакцій (1.5-1.23) вигодним є протікання реакцій зневуглюцювання останнього та окислення відновленого Mg:



$$\Delta G = -615600 + 1118,23T - RT \ln P_{Mg} - RT \ln P_{CO} \quad (4.7)$$



$$\Delta G = -730000 + 204T + RT \ln \frac{1}{P_{Mg} \cdot P_{O_2}^{1/2}} \quad (4.8)$$

На основі термодинамічної оцінки можливості самовільного протікання реакцій (4.7, 4.8) у діапазоні температур 298-2300K визначено, що при температурі вище 2120 K та тиску 1 атм, лінії, що відображають зміну вільної енергії Гіббса для реакцій (1.20) та (4.7), перетинаються. Це підтверджує можливість відновлення MgO вогнетриву з утворенням {CO} (1.20) у температурних умовах конвертерної плавки.

У наведених вище висновках різних дослідників (див. розділ 1) стосовно стадій та механізму руйнування футерівки не в повній мірі врахований вплив ряду хімічних реакцій (1.5-1.23), які термодинамічно дозволені в умовах взаємодії шлаку з вогнетривом. У тому числі вплив тиску $\{CO\}$, що утворюється у порах-каналах вогнетриву, на глибину проникнення рідкого шлаку; гальмування руху шлаку по каналах в умовах градієнту температур по товщині вогнетриву, на границі контакту шлак-вогнетрив при формуванні гарнісажного шару тощо.

При взаємодії вуглецю вогнетриву з високоокисленим конвертерним шлаком по ходу продувки можливим є також утворення $\{CO\}$ у відповідності з реакцією $\{CO_2\} + C_{\text{ТВ}} = 2\{CO\} - 166,32 \text{ МДж/кг вуглецю}$, що збільшує об'єм газів, і відповідно - число та розмір пор-каналів у тілі вогнетриву.

При високих температурах в шлаковому шарі першого періоду продувки ванни можливим є також відновлення силікатів заліза твердим вуглецем: $(Fe_2SiO_4) + 2C_{\text{ТВ}} = 2[Fe] + (SiO_2) + 2\{CO\} - 352,8 \text{ МДж/кг вуглецю}$.

Насичення зерен перклазу силікатами та їх розчинення у шлаку призводить до руйнування робочого шару вогнетриву. Шлак, який проникає вглиб вогнетриву, у першу чергу взаємодіє із забрудненими домішками зернами периклазу, у той час як чисті зерна практично не руйнуються [26].

Збільшення кількості шлаку та його рідкоплинності, при зростанні вмісту кислотного оксиду SiO_2 , що активно взаємодіє з основними оксидами футерівки, також підвищує інтенсивність зносу. Найбільш важливі ці аспекти при переробці чавуну з підвищеним вмістом кремнію, оскільки у результаті його окислення у шлаку початкового періоду продувки збільшується вміст (SiO_2) з утворенням Fe_2SiO_4 і поряд з цим збільшується кількість шлаку.

В основних шлаках (у присутності вапна у шлаку):
 $(Fe_2SiO_4) + 2(CaO) + 2C_{\text{ТВ}} = 2[Fe] + (CaO \cdot SiO_4) + 2\{CO\} - 197,32 \text{ МДж/кг C (4.9)}$
 тобто присутність вапна зменшує витрату тепла і покращує умови відновлення силікатів.

Швидкість змочування кристалів периклазу високоокисленим шлаком настільки висока, що кут натікання шлаку q наближається до рівноважного вже після закінчення 1-ої секунди їх контакту [17]. Швидкість проникнення шлаку $dL/d\tau$ у пори вогнетриву визначається його поверхневим натягом μ , в'язкістю η та радіусом пори r [17]:

$$\frac{dL}{d\tau} = \frac{r \cdot \mu \cdot \cos q}{4\eta \cdot L} \quad (4.10)$$

В той же час, при властивих конвертерному шлаку значеннях $\mu = 450$ МДж/м² і $\eta = 0,2$ Па його проникнення на глибину 1-2 мм відбувається за 0,9-1,6 сек відповідно, у пори мінімально можливого для просочення діаметру ($d = 2r$) = 5 мкм. При тривалості контакту шлакового розплаву із зневуглецьованою поверхнею зерен MgO, що значно перевищує період проникнення, шлаковий розплав повністю змочує їх поверхню до вуглецевого шару, де проникнення стає термодинамічно неможливим із-за зміни знаку кута змочування $\cos q$ на негативний.

Для з'ясування умов протікання реакції зневуглецювання вуглецевого шару при взаємодії з окисленим шлаком $C_{\text{тв}} + (\text{FeO}) = [\text{Fe}] + \{\text{CO}\}$ доцільним є визначення тиску $\{\text{CO}\}$, який здатен «блокувати» просування рідкого шлаку в пори і у міжзеренний простір. Це можливе у разі, якщо парціальний тиск CO (p_{CO}), що виділяється, більше капілярного тиску. Рівноважні значення p_{CO} можна визначити з рівняння:

$$p_{\text{CO}} = K \cdot a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{C}} / a_{\text{Fe}}$$

де a_{FeO} , a_{C} , a_{Fe} - активності відповідних реагентів; K - константа рівноваги реакції.

Розрахунком значень константи рівноваги K непрямим методом, з використанням відомих даних про константи рівноваги реакцій, можливих в системі «вогнетрив - шлак» [101], визначили значення активності оксиду заліза шлаку від складу шлаку по ходу конвертерної плавки. Використовуючи ряд значень a_{FeO} (у діапазоні 1823-2023 К) визначили можливий парціальний тиск $\{\text{CO}\}$. Для оцінки рівноважного значення p_{CO} приймали активності вуг-

лецю вогнетриву і заліза такими, що дорівнюють 1. Розрахунок вели при коливанні значень a_{FeO} від 0,05 до 0,45. Визначено, що максимальний капілярний тиск шлаку у порах $d=5\text{мкм}$, складе: $p_O = \frac{4 \cdot \mu}{d} = 0,36\text{МПа}$; а для пор діаметром 100 мкм – 0,018МПа.

Згідно з рис. 4.5 у дослідженому інтервалі температур і активностей p_{CO} перевищує капілярний тиск в порах діаметром 5 мкм в дослідженому діапазоні значень температури і a_{FeO} в конвертерному шлаку.

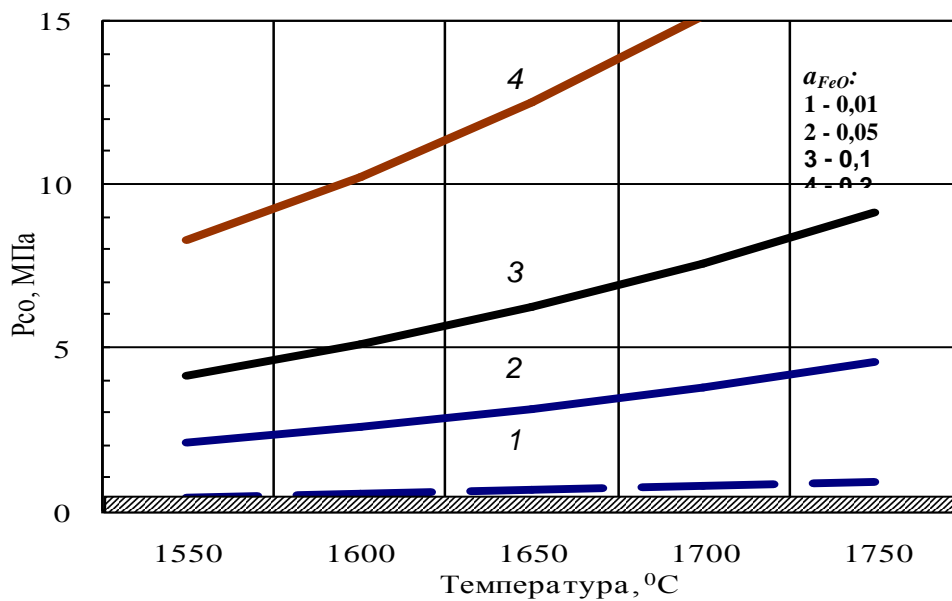


Рис. 4.5 - Рівноважний парціальний тиск {CO} при різних температурах і значеннях $a_{(\text{FeO})}$. Заштриховане поле - діапазон значень капілярного тиску в порах вогнетриву діаметром від 5 до 100 мкм

При $a_{\text{FeO}} > 0,01$, що є характерною для окислених конвертерних шлаків, рівноважний парціальний тиск p_{CO} значно перевищує максимальне капілярне (0,36 МПа) в порах 5мкм. В той же час, із зниженням концентрації (FeO) у робочому шарі вогнетриву пора будь-якого розміру дозволяє зародитися і виділитися {CO}. Для забезпечення замикання {CO}, каналів і уповільнення надходження по ним нових порцій рідкого шлаку вглиб вогнетриву необхідна відсутність у вогнетриві наскрізних (каналних) пор. Таким чином, більшість доступних для проникання шлаку пор вогнетриву мають діаметр $> 5\text{мкм}$, і

капілярний тиск шлаку в них значно менше 3,6 атм.. Таким чином, захисна дія $\{CO\}$, що виділяється при реакціях зневуглицювання вогнетриву, виявляється достатньо вірогідною.

Таким чином, встановлена присутність корольків заліза на границі робочої та незміненої зон вогнетриву [26] може бути наслідком не тільки фільтрації металевого розплаву до ошлакованого об'єму вогнетриву, але й протіканням реакції $[C] + (FeO) = [Fe] + \{CO\}$.

Можливість блокуючої дії фільтрації шлаку у пори вогнетриву за рахунок відмінного значення змочування вуглецю та газоподібних продуктів реакцій взаємодії шлаку з останнім, утворення тугоплавких фаз, як продуктів взаємодії шлаку з вогнетривом, раніше підтверджені у роботах Суворова С.А. [26] та Величко О.Г. зі співавторами [102].

Внаслідок практично абсолютного змочування шлаком поверхні MgO робота його адгезії до зерен периклазу близька до подвоєного поверхневого натягу шлаку і складає близько 495 МДж/м^2 . Таке значення роботи адгезії шлаку до поверхні MgO може викликати вимивання зерен периклазу футерівки рухомим потоком шлакометалевої емульсії при продуванні металу киснем в ході конвертерної плавки.

Таким чином, у початковий період конвертерної плавки найбільш ефективним захистом футерівки конвертера може бути шлаковий гарнісаж, стійкість якого, в основному, залежить від ступеня його адгезії до вогнетриву та вмісту в ньому магнезійовіститів і магнезіоферитів (насиченості MgO).

4.3 Результати високотемпературних експериментів з визначення крайового кута змочування модифікованим шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву

За результатами чисельного моделювання (див. п. 4.1, 4.2) [91, 99] визначено, що по-перше, для попередження інтенсивного переміщення (під впливом гравітації) по вертикальній стіні плівки шлаку, нанесеного розду-

ванням шлакової ванни, необхідним є коригування її фізико-хімічного стану до або по ходу роздування та забезпечення адгезії шлаку.

По-друге, у зв'язку з ускладненнями у формуванні рівномірного за товщиною шару гарнісажного покриття при використанні як штатної кисневої, так і спеціальної гарнісажної фурми (рис. 1.12) [100, 103], навіть в умовах спеціального режиму переміщення наконечника фурми по висоті по ходу роздування, необхідна подальша модернізація конструкції фурми у напрямку забезпечення перенаправлення частини газошлакового потоку на визначені зони на футерівці (див. розділ 5).

Дослідження впливу фізико-хімічного стану шлаку на адгезію останнього до периклазовуглецевого вогнетриву проводили з використанням розробленого експериментального комплексу на базі печі Таммана з графітовим тиглем (див. розділ 2, п. 2.3) (рис. 2.7, 4.9, а). Використані основні положення методики визначення поверхневого натягу методом «краплі, що лежить» [80] згідно табл. 2.4.

З метою коригування хімічного складу у об'єм порошкоподібного кінцевого конвертерного шлаку (з висхідним хімічним складом, %: CaO 45,1; MgO 3,9; SiO₂ 16,5; FeO+Fe₂O₃ 26,3), додавали порошкоподібні чисті CaO, MgO та тверді частки MgO різних фракцій (табл. 4.1), у відповідності до плану експерименту (табл. 4.2).

Загальний вигляд розміщення у печі, результати розтікання крапель модифікованого шлаку різного складу (табл. 4.2) по поверхні вогнетриву по ходу підвищення температури у печі Таммана наведені на рис. 4.6.

Для визначення поверхневих характеристик проводили вимірювання геометричних розмірів краплі шлаку на поверхні вогнетривкої підкладки (табл. 4.3).

Таблиця 4.1

Розрахунковий склад модифікованого добавками оксидів конвертерного шлаку

1.0 Вихідний склад та маса зразку <i>m</i> =100 г	CaO	MgO	SiO ₂	FeO+Fe ₂ O ₃	Осн.
	45,1	3,9	16,5	26,3	2,97
1.1 після додавання 5% CaO та 5% MgO					
<i>m</i> =110 г №№ 1/5	45,5	8,09	15,0	23,9	3,57
1.2 після додавання 20% CaO та 5% MgO					
<i>m</i> =125 г №№ 2/6	52,08	7,12	13,2	21,04	4,48
1.3 після додавання 5% CaO та 10% MgO					
<i>m</i> =115 г №№ 3/7	43,56	12,08	14,34	22,87	3,88
1.4 після додавання 20% CaO та 10% MgO					
<i>m</i> =130 г №№ 4/8	50,07	10,69	12,69	20,23	4,79

Таблиця 4.2

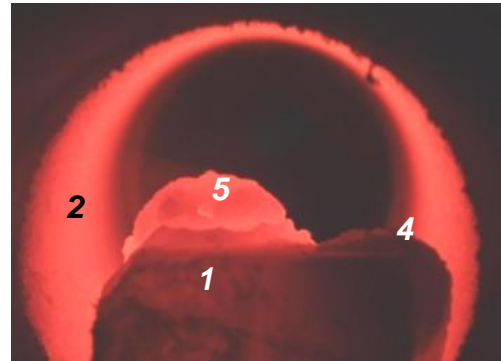
План та результати експериментів з визначення кутів змочування поверхні вогнетриву кінцевим конвертерним шлаком, модифікованим добавками оксидів

№	X ₁ , %		X ₂ , %		X ₃ , мм*		θ _i , град.		θ̄, град.
	к.	нат.	к.	нат.	к.	нат.	θ _{min}	θ _{max}	
1	-	5,0	-	5,0	-	0,8	71,2	84,9	78,05
2	+	20,0	-	5,0	-	0,8	62,9	72,7	67,80
3	-	5,0	+	10,0	-	0,8	68,1	84,8	76,45
4	+	20,0	+	10,0	-	0,8	74,1	83,8	78,95
5	-	5,0	-	5,0	+	3,3	63,4	64,8	64,10
6	+	20,0	-	5,0	+	3,3	68,0	70,9	69,45
7	-	5,0	+	10,0	+	3,3	75,8	79,2	77,50
8	+	20,0	+	10,0	+	3,3	71,8	74,9	73,35

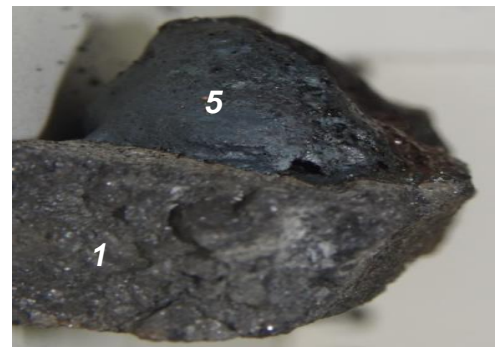
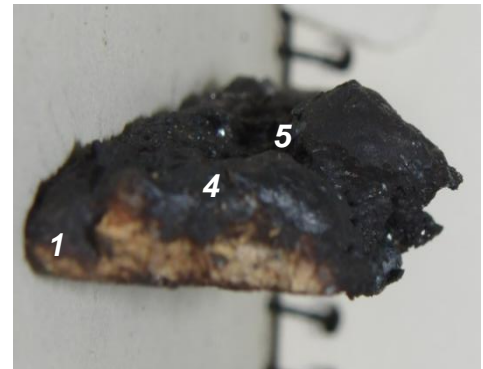
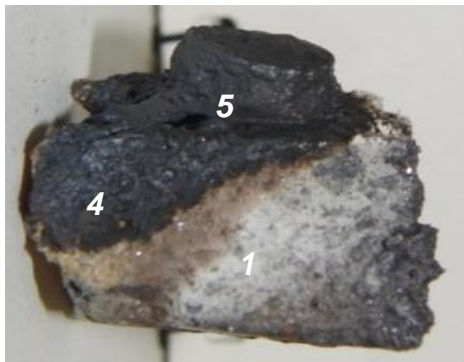
* середній діаметр твердих часток у фракції



а



б



в

Рис. 4.6 - Розміщення у тиглі печі Таммана (а) та початок оплавлення краплі шлаку (б), розтікання шлаку по поверхні вогнетриву (в): 1 – підкладка з периклазовуглецевого вогнетриву; 2 – тигель печі; 3 – зразок шлаку; 4 – шар утвореного шлакового гарнісажу на поверхні вогнетриву; 5 – крапля шлаку

Таблиця 4.3

Розміри отриманих зразків краплі шлаку з твердими частинками фракції 0,63...1,0 мм

№ зразку	довжина краплі шлаку	висота краплі шлаку
1.1.1.4	540,2	64,2
1.1.2.4	386,1	87,6
1.1.3.4	500,8	79,9
1.1.4.4	452,9	84,1

Геометричні параметри та результати визначення крайового кута змочування поверхні вогнетриву для зразку модифікованого шлаку № 1.1 (табл. 4.1) з добавками тугоплавких магнезійальних часток, у дослідженому діапазоні фракцій останніх, наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати визначення крайового кута змочування поверхні вогнетриву модифікованим конвертерним шлаком (№ 1.1, табл. 4.1)

№ фракції	X_3 , мм	θ_i , град.		$\bar{\theta}$, град.
		θ_{min}	θ_{max}	
1	3,0...3,6	84,0	90,0	87,0
2	2,0...3,0	11,0	28,9	19,95
3	1,0...2,0	31,4	41,7	36,55
4	0,63...1,0	20,9	57,1	39,0

Величини значущості коефіцієнтів, визначені за виразом $a_i = |b_i \cdot \Delta\theta_i|$, підтвердили припущення, що для конвертерного шлаку у дослідженому діапазоні хімічного складу, найбільш впливовим на зміну кута змочування фактором є вміст СаО ($a_i = 46,125$). Поступова міграція хімічного складу модифікованого шлаку (табл. 4.1) зі збільшенням вмісту СаО та MgO у області з підвищеною температурою плавлення (рис. 4.7) свідчить на користь запропонованого автором дисертаційного дослідження способу [104] розосередження у часі та просторі введення до шлакової ванни добавок-модифікаторів по ходу роздування з метою попередження швидкому переведенню останньої у малорухомий стан. Макроструктура зони контакту «шлак – вогнетрив» для висхідного конвертерного шлаку (а), та розподіл твердих часток у отриманих краплях шлаку, модифікованого присадками тугоплавких часток MgO фракції 3,0...3,6 мм (б) відповідно, наведена на рисунку 4.8.

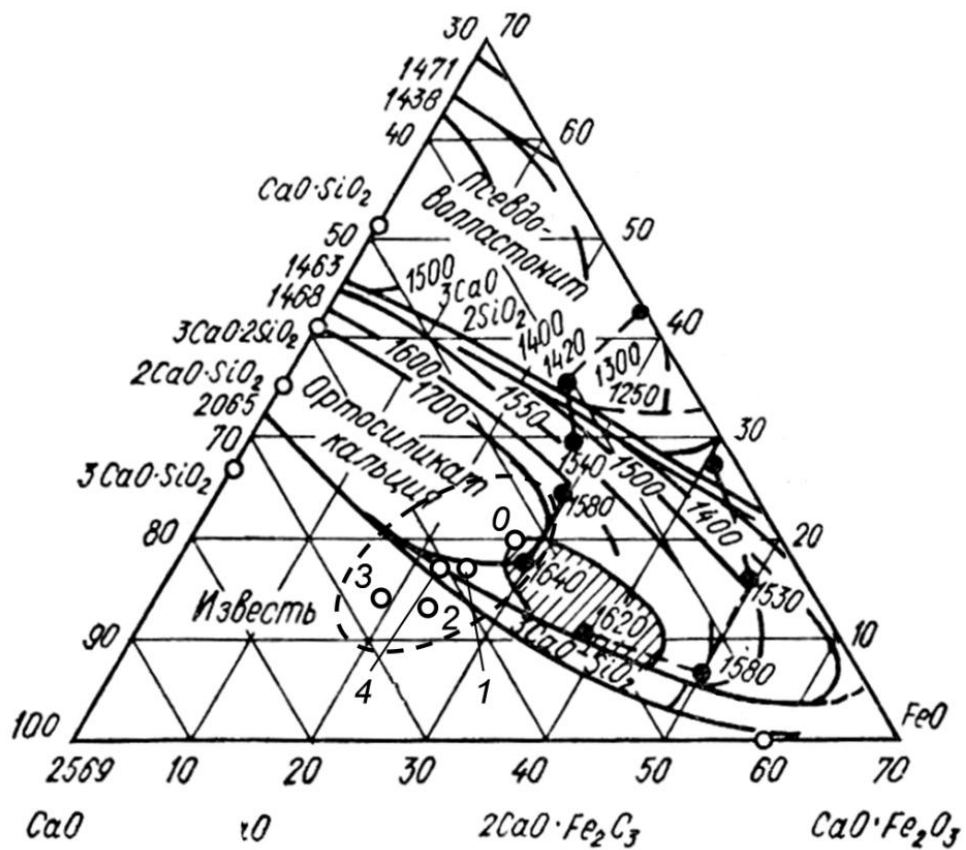
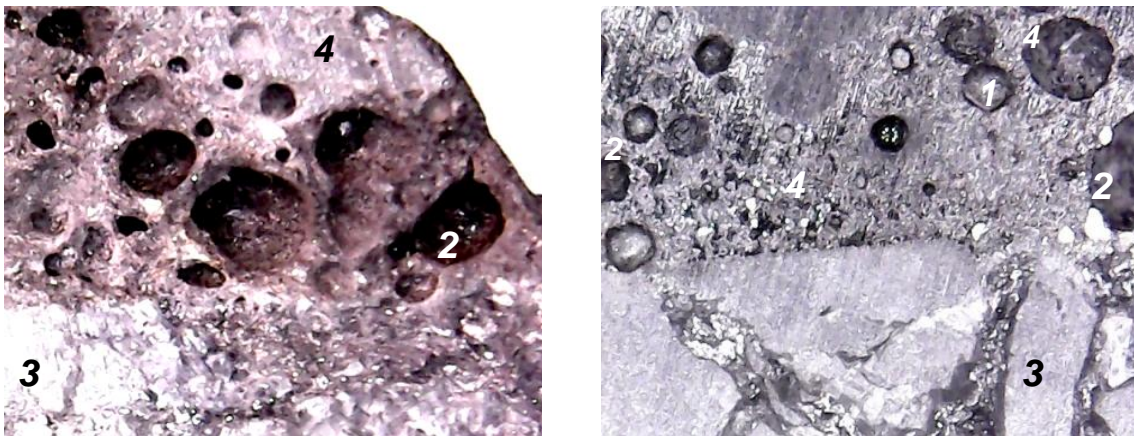


Рис. 4.7 - Зміна хімічного складу конвертерного шлаку при додаванні CaO та MgO у висхідний конвертерний шлак (т. «0» на діаграмі). Цифри у виділених на діаграмі точок (1...4) відповідають номерам експериментального складу модифікованого шлаку (таблиця 4.1)



a

б

Рис. 4.8 - Макроструктура зони контакту зразків висхідного (*a*) (табл. 4.1) та модифікованого добавками (*б*) тугоплавких часток (табл. 4.2) шлаку: 1 – тугоплавкі частки; 2 – пори у шарі шлаку; 3 – зерна MgO у вогнетриві; 4 – шлак

Газового проміжку між конвертерним шлаком модифікованим присадками твердих частинок та робочою поверхнею вогнетриву, на відміну від [5, 42] не виявлено (рис. 4.9). У той же час, на границі «шлак-вогнетрив» висхідного немодифікованого конвертерного шлаку (табл. 4.1) у східних температурних умовах виявили наявність газового проміжку (рис. 4.10).

За результатами обробки експериментальних даних отримана математична модель для опису взаємозв'язку зміни концентрації CaO та MgO у шлаку з крайовим кутом змочування вогнетриву шлаком

$$\theta = 94,008 - 3,69 \cdot \text{CaO} - 2,072 \cdot \text{MgO} + 0,362 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \quad (4.11)$$

та модель для опису впливу розміру твердих тугоплавких часток (табл. 4.4) на зміну крайового кута змочування

$$\begin{aligned} \theta = 101,295 - 2,37 \cdot \text{CaO} - 2,676 \cdot \text{MgO} - 27,68 \cdot D + 0,2686 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} + \\ + 1,674 \cdot \text{CaO} \cdot D + 2,985 \cdot \text{MgO} \cdot D - 0,197 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot D \end{aligned} \quad (4.12)$$

Результати розрахунків за рівнянням (4.8) у вигляді поверхні відгуку, яка відображає вплив зміни вмісту CaO та MgO у шлаку за рахунок додавання відповідної кількості оксидів (табл. 4.1), на величину крайового кута змочування модифікованим шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву, наведені на рис. 4.11.

Поверхні відгуку, отримані з використанням залежності (2), які характеризують комплексний вплив вмісту CaO, MgO та розміру тугоплавких часток у модифікованому шлаку для фракцій 0,63...1,0 мм та 3,0...3,6 мм (табл. 4.1, 4.4) на зміну крайового кута змочування шлаком поверхні вогнетриву, представлені на рис. 4.12 та рис. 4.13 відповідно.

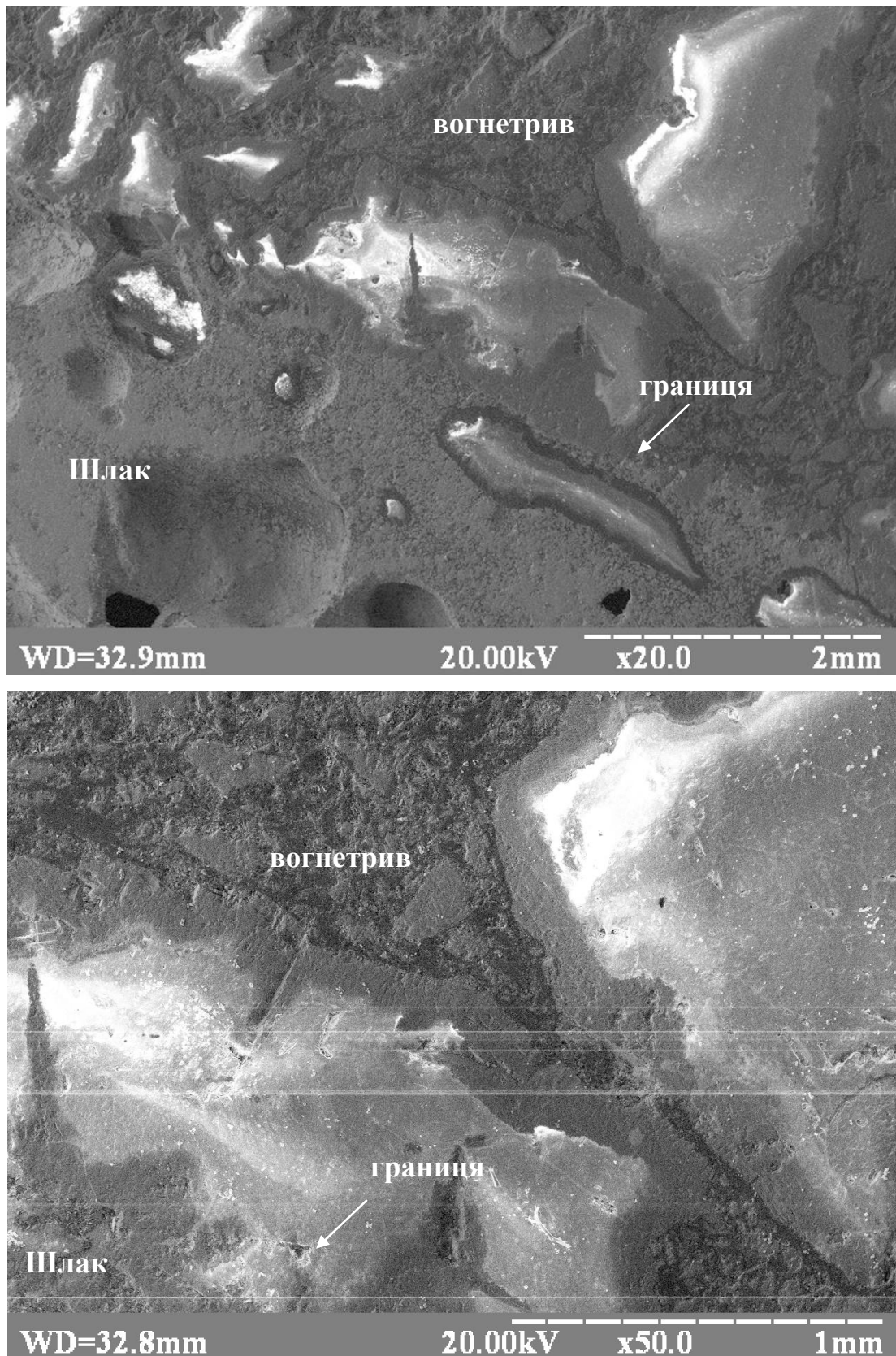


Рис. 4.9 - Мікроструктура модифікованого шлаку з добавками твердих часток фракції 0,63...1,0 мм на границі з вогнетривом

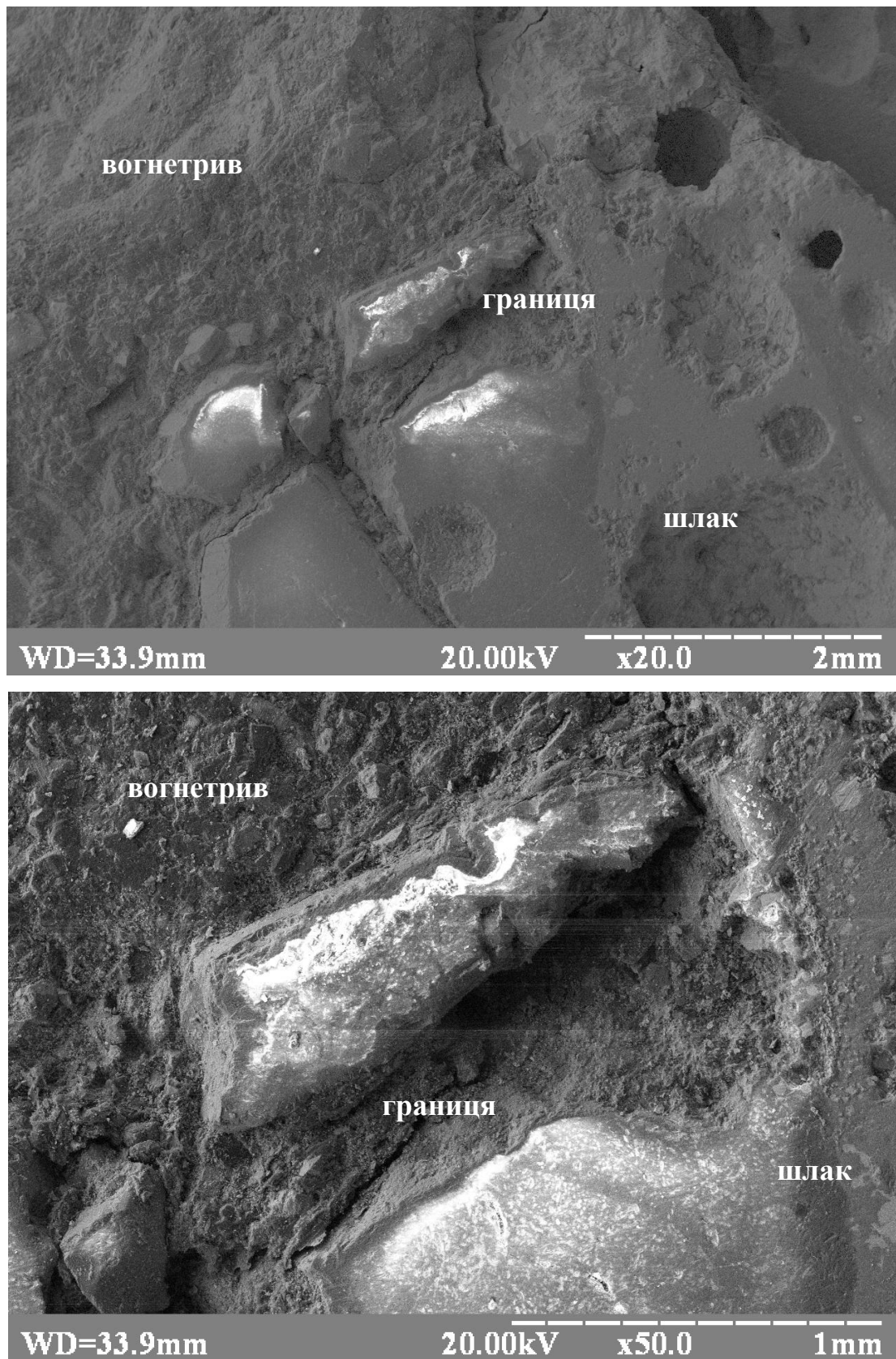


Рис. 4.10 - Микроструктура висхідного конвертерного шлаку на границі з вогнетривом

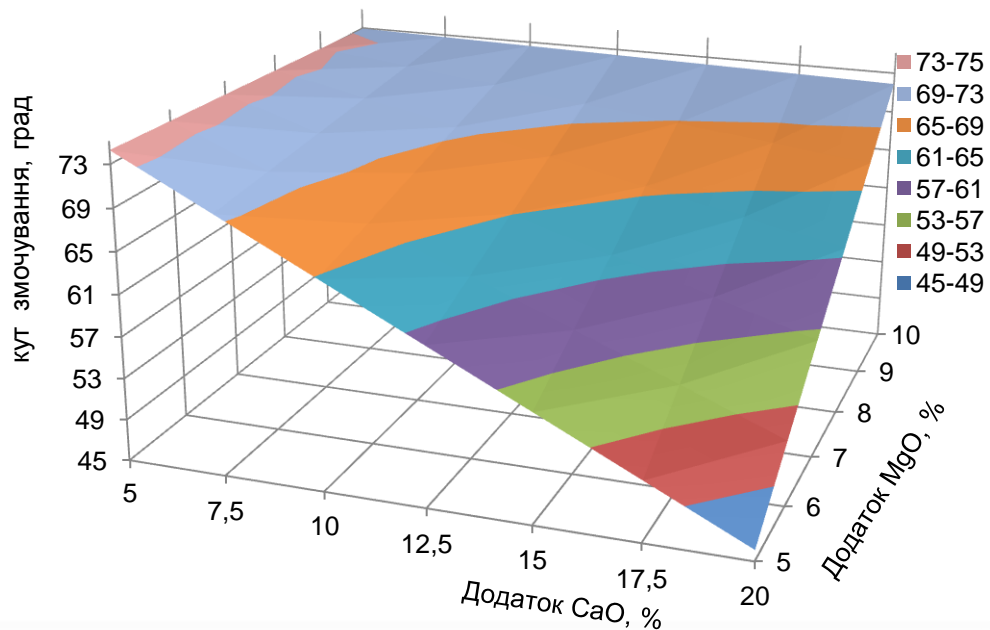


Рис. 4.11 - Поверхня відгуку, яка характеризує вплив добавок CaO та MgO до кінцевого конвертерного шлаку (табл. 4.1) на зміну крайового кута змочування

Обробкою результатів досліджень підтверджено, що вміст CaO, MgO та співвідношення низько- ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) та високотемпературних ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) фаз у модифікованому шлаку суттєво впливає на величину крайового кута змочування шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву. Так, до прикладу, підвищення вмісту MgO у шлаку понад 12 % призводить до збільшення величини крайового кута змочування до 75-80 град., що також не сприяє досягненню щільного рівномірного покриття гарнісажним шаром поверхні вогнетриву.

Встановлено, що введення до складу конвертерного шлаку твердих часток MgO фракції як 0,63...1,0 мм так і 3,0...3,6 мм має суттєвий вплив на в'язкість та динаміку розтікання останнього по поверхні вогнетриву, що, в цілому, корелює з даними роботи [42]. Найбільший вплив на умови змочування шлаком, модифікованим твердими тугоплавкими частками, мають розміри останніх.

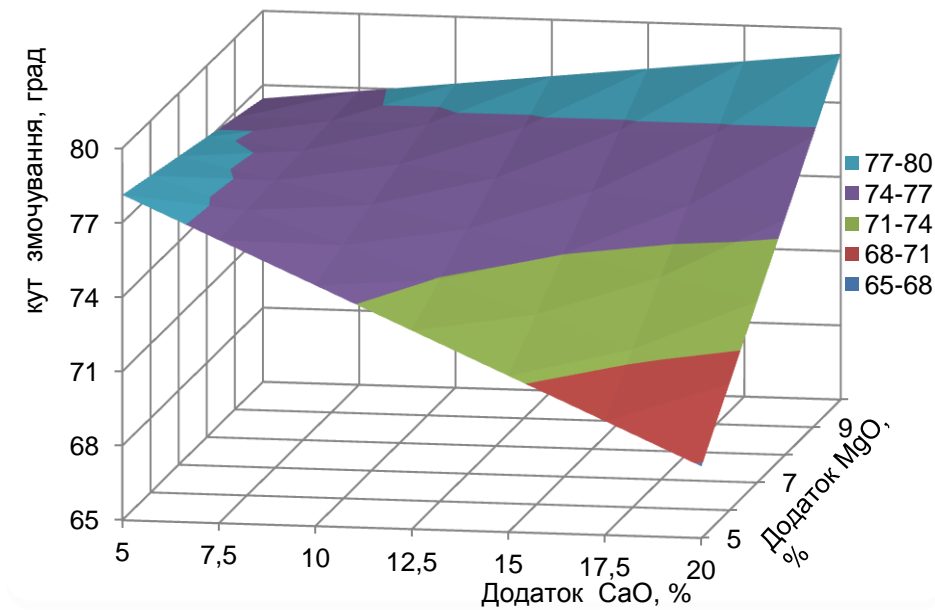


Рис. 4.12 - Поверхня відгуку, яка характеризує вплив твердих часток MgO фракції 0,63...1,0 мм на зміну кута змочування вогнетриву модифікованим кінцевим конвертерним шлаком

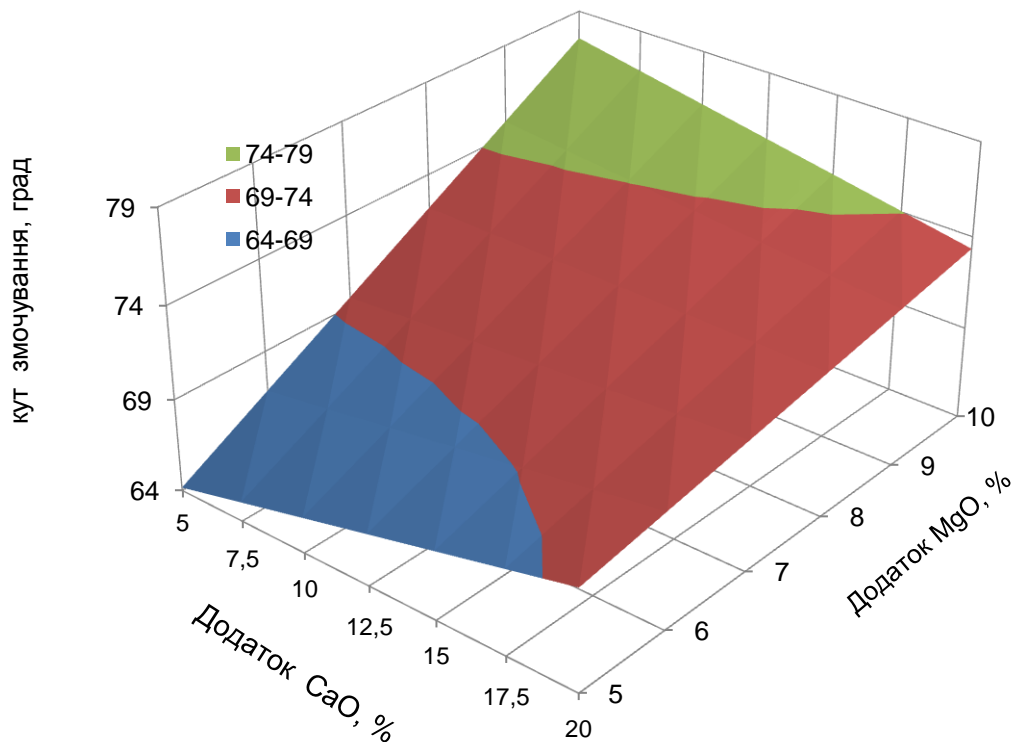


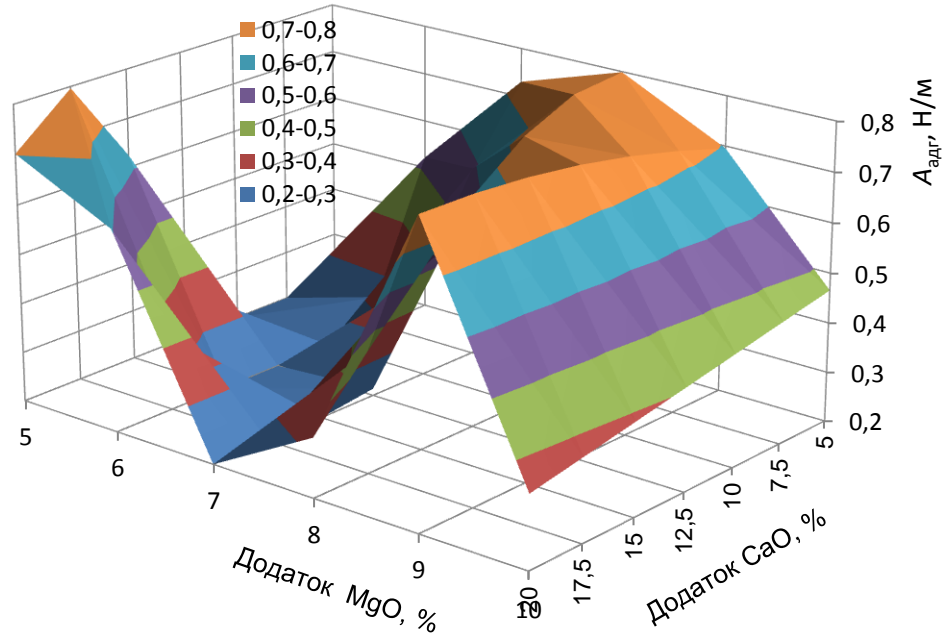
Рис. 4.13 - Поверхня відгуку, що характеризує вплив твердих часток MgO фракції 3,0...3,6 мм на зміну крайового кута змочування вогнетриву шлаком

Введення до об'єму шлаку часток фракції більше 3,0 мм (у діапазоні 3,0...3,6 мм) призводить до перманентного зростання крайового кута змочування останнім вогнетриву та може негативно вплинути на динаміку та площу розтікання рідкого шлаку по його поверхні.

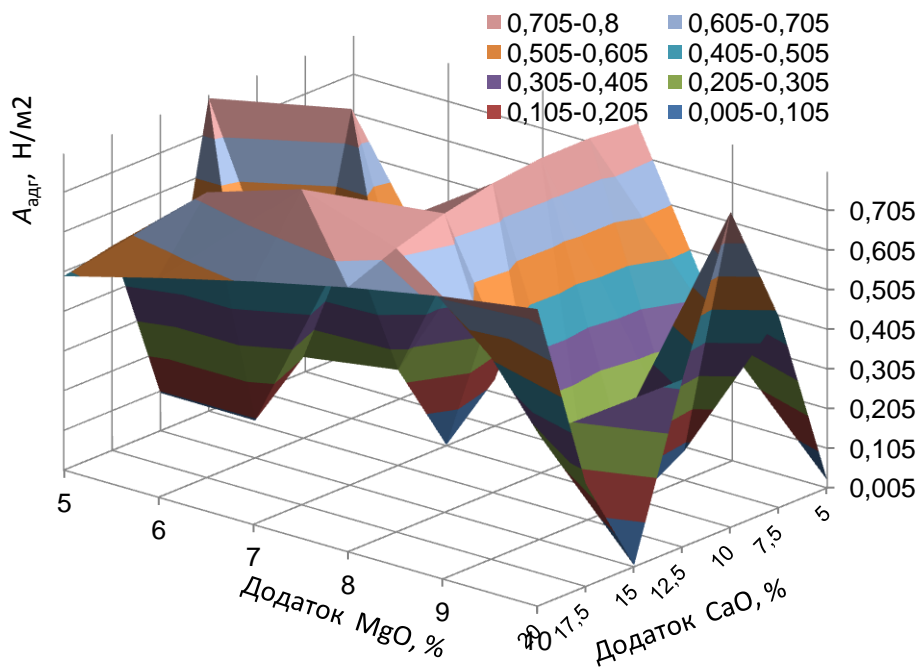
Результати розрахунків величини роботи адгезії ($A_{\text{адг}}$, Н/м) для модифікованого конвертерного шлаку з додаванням тугоплавких часток фракцій 0,63...1,0 мм та 3,0...3,6 мм за виразом (2.4) представлені на рис. 4.14. Встановлено, що використання твердих тугоплавких часток різного фракційного складу у якості присадки до шлаку (табл. 4.4), призводить до коливань величини роботи адгезії від 0,2 до 0,8 Н/м², у залежності від співвідношення вмісту CaO та MgO у шлаку, та, в цілому відображає вплив досліджених факторів (табл. 4.1, 4.2) на умови формування гарнісажного шлакового покриття на футерівці конвертера.

Керувати адгезією, в умовах малого діапазону коливань величини $A_{\text{ког}}$, можливо шляхом зміни величини поверхневої енергії робочого шару вогнетриву. Це забезпечується збільшенням площі контакту між нанесеним шаром шлаку та вогнетривом по ходу вигорання графіту у матриці останнього з утворенням {CO} та підвищенням пористості робочої поверхні, що призводить до збільшення $A_{\text{адг}}$. Отримані залежності у подальшому були використані для розробки рекомендацій відносно раціонального співвідношення різних фракцій у складі модифікатора шлаку з метою досягнення мінімального крайового кута змочування [105]. В той же час, виявлений у ході досліджень різнонаправлений вплив розміру твердих часток MgO на величину крайового кута змочування шлаком вогнетриву потребує проведення комплексу додаткових досліджень.

Отримані у ході досліджень нові достовірні дані стосовно адгезії модифікованого шлаку до вогнетриву та математичні моделі можуть бути використані для забезпечення можливості прецизійного регулювання складу та зміни співвідношення фаз у конвертерному шлаку перед роздуванням останнього на футерівку конвертера.



а



б

Рис. 4.14 - Поверхня відгуку, що відображає вплив вмісту CaO, MgO та твердих часток MgO фракції 0,63...1,0 (а) та 3,0...3,6 мм (б) у модифікованому кінцевому конвертерному шлаку на величину роботи адгезії останнього до периклазовуглецевого вогнетриву

4.4 Висновки за розділом 4

1. Запропоновані і реалізовані математичні моделі гідрогазодинаміки роздування конвертерного шлаку газовими струменями на футерівку конвертера та теплопереносу у системі «шлаковий гарнісаж - футерівка конвертера», які враховують як кут нахилу сопел Лавалля та положення наконечника фурми над ванною, так і зміну товщини футерівки по ходу кампанії. Розрахунками підтверджена можливість керування товщиною гарнісажу у заданих зонах конвертера та доцільність організації примусового локального охолодження футерівки для підвищення ефективності операції ошлакування.

2. Проведена серія високотемпературних досліджень з визначенням можливості підвищення адгезійної здатності конвертерного шлаку до футерівки за рахунок використання тугоплавких твердих часток у якості модифікаторів шлаку. Уперше визначені закономірності впливу вмісту CaO, MgO та твердих тугоплавких часток на зміну крайового кута змочування (Θ) модифікованим шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву. Запропоновані математичні моделі для розрахунку крайового кута змочування шлаком перемінного складу поверхні периклазовуглецевого вогнетриву.

3. Визначена ступінь впливу добавок тугоплавких твердих часток MgO різних фракцій на величину Θ . Встановлено, що найбільший вплив на умови змочування шлаком, модифікованим добавками CaO, MgO та твердих тугоплавких часток мають наступні фактори: розміри твердих тугоплавких часток. Так, введення до шлаку часток фракції 3,0...3,6 мм призводить до перманентного збільшення Θ та може негативно вплинути на динаміку та площу розтікання рідкого шлаку по його поверхні; підвищення вмісту оксиду магнію у шлаку понад 12 % призводить до збільшення Θ до 75-80 град., що також не сприяє досягненню щільного покриття гарнісажним шаром поверхні вогнетриву.

4. Встановлено, що використання твердих тугоплавких часток різного фракційного складу у якості присадки, призводить до коливань величини ро-

боти адгезії шлаку до вогнетриву у діапазоні від 0,2 до 0,8 Н/м², у залежності від співвідношення вмісту СаО та MgO у шлаку. До раціонального розміру, з точки зору максимізації роботи адгезії у досліджених умовах, можна віднести фракцію модифікаторів-часток MgO діаметром 1,0...3,0 мм.

З матеріалами розділу можна ознайомитись у публікаціях [91, 97-99, 104, 105, 108].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ГАРНІСАЖНОЇ ФУ- РМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОФІЛЮ РОБОЧОГО ПРО- СТОРУ КОНВЕРТЕРА ШЛЯХОМ КЕРОВАНОГО РОЗДУВАННЯ ШЛАКОВОЇ ВАННИ НА ФУТЕРІВКУ

5.1 Штатна технологія нанесення шлакового гарнісажу роздуванням шлакової ванни у конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»

У конвертерному відділенні конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» (ПАТ «ДМК») встановлено 2 конвертери ємністю по 250 тонн. В 2005-2006 роках проведений капітальний ремонт конвертерів, з забезпеченням, за необхідністю, донного перемішування ванни азотом та аргонном з використанням 12-ти донних вставок за визначеним дугтьовим режимом (див. розділ 2). Внаслідок особливостей сировинних умов, стану та експлуатації обладнання, технології виплавки сталі та гарячого ремонту футерівки 250-т конвертерів, що застосовують у конвертерному цеху ПАТ «ДМК», мають ряд недоліків, описаних у роботах [107-110].

На теперішній час на конвертерах застосовується одношарова схема кладки, при цьому у циліндричній частини агрегату вогнетриви, зазвичай, укладаються в один шар товщиною 800 мм, у верхній конічній частини - 650 мм. У переважній кількості випадків, вогнетривкі вироби для кладки робочого шару футерівки конвертерів мають наступний склад: у зоні металевого розплаву - з вмістом $MgO \geq 71,0\%$ і вуглецю більше 13,0%; у завантажувальній і зоні випуску розплаву - з вмістом MgO не менше 68% і вуглецю $\geq 15,0\%$; у зоні цапф футерівка робочого шару посилена за рахунок використання виробів з підвищеним вмістом вуглецю $\geq 14,0\%$ та $MgO \geq 71,0\%$ відповідно; у верхній конічній частині вміст $MgO \geq 61,0\%$ і вуглецю не менше 14,0%.

Після випуску залізвуглецевого розплаву на футерівці формують шар шлакового гарнісажу шляхом роздування шлакової ванни струменями азоту, що надходить з сопел Лавалля штатної 5-ти соплової кисневої фурми або спеціальної гарнісажної 6-ти соплової фурми (рис. 1.9). Роздування шлакової ванни проводять за схемою використання ступеневого режиму переміщення фурми за висотою (у діапазоні від 4-х на початковому етапі до 0,5-0,55 м над днищем конвертера), з витратою азоту на роздування 600-800 м³/хв. Тривалість операції, у середньому, 5-8 хвилин.

5.2 Визначення зон випереджаючого зносу футерівки конвертера та розробка методики розрахунку раціональних параметрів роздування шлакової ванни

З метою встановлення ступеня несиметричності, динаміки зміни профілю робочого простору та фактичної товщини сформованого шляхом роздування шлаку 6-ти сопловою фурмою (рис. 1.14) гарнісажного шару на стінах 250-т конвертера ПАТ «ДМК» провели серію досліджень з послідовним скануванням внутрішнього профілю агрегата за методикою, описаною у розділі 2.

Встановлено [82, 89, 96], що ускладнення у формуванні рівномірного за товщиною шару захисного шлакового гарнісажу та, відповідно, у забезпеченні необхідного для нормальної організації продувки ванни ступеня симетричності робочого простору (рис. 5.1, а), виникають внаслідок прискореного зносу футерівки у зонах 1 на циліндричній частині агрегату, розташованих на меридіанах 50, 150, 215, 310 град. (між цапфеними зонами та зонами випуску і завалки) (рис. 5.1, б).

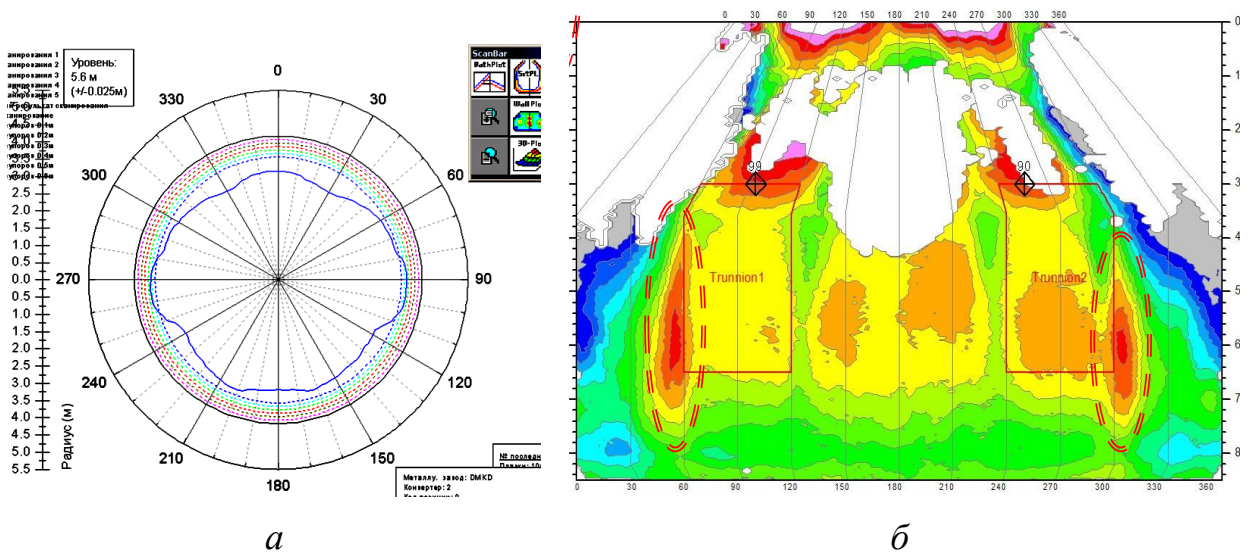


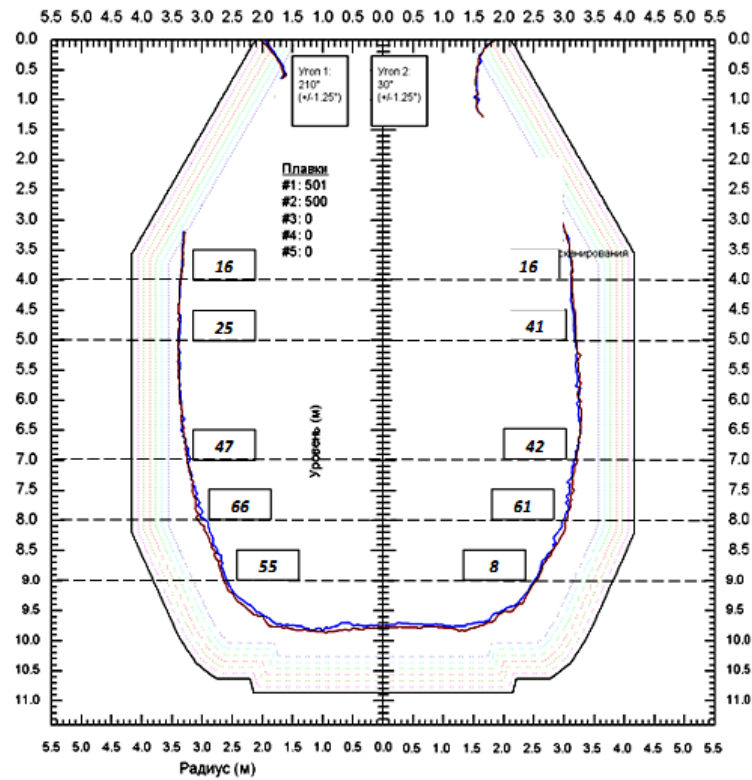
Рис. 5.1 - Нерівномірність зносу футерівки (горизонтальний перетин) (а) та виявлені послідовним скануванням «проблемні» зони підвищеної інтенсивності зносу (I) на розгортці 250-т конвертера ПАТ «ДМК» (б)

Для отримання достовірних даних щодо товщини гарнісажного шару сканування проводили як у перший період (500 та 501 плавка) так і на завершальному етапі кампанії по футерівці (4130 та 4131 плавка). Перед проведенням плавки № 500 і № 4130 (по футерівці) нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздування шлакової ванни на футерівку не здійснювали. Після закінчення продувки ванни, випуску сталі у стальковш і роздування з використанням фурми (рис. 1.12) протягом 5-6 хв. конвертерного шлаку, що містить, %:

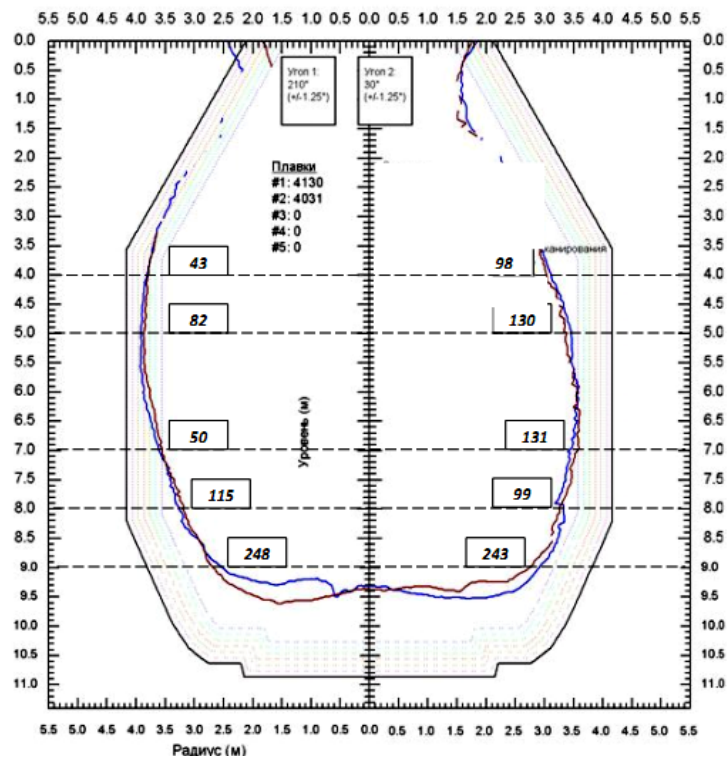
- для плавки №500: 45,3 CaO; 18,7 SiO₂; 6,9 MgO; 10,5 FeO;
- для плавки №4130: 49,1 CaO; 21,1 SiO₂; 7,3 MgO; 15,8 FeO,

здійснювали повторне сканування робочого простору для встановлення фактичної товщини нанесеного гарнісажного шлакового шару.

Результати проведених досліджень свідчать про зміну товщини утвореного гарнісажного шлакового шару з 5...8 мм у районі горловини до 35...200 мм - у нижній частині агрегату (рис. 5.2).



а



б

Рис. 5.2 - Профіль робочого простору та розподіл гарнісажного шлакового шару за товщиною по висоті агрегату (у мм) у перший період кампанії (а) та перед зупинкою (б) конвертера на перефутерування

Отримані прямим вимірюванням (рис. 5.2) товщини гарнісажного шару, в цілому, відповідають результатам розрахунків, що наведені у [111], в той же час характер розподілу шару по висоті агрегату має суттєві відмінності. Так, як встановлено і раніше у ході досліджень [112-114] та підтверджено результатами чисельного моделювання [99, 100], товщина шлакового гарнісажу, у значній мірі, залежить від остаточної товщини футерівки (рис. 5.3).

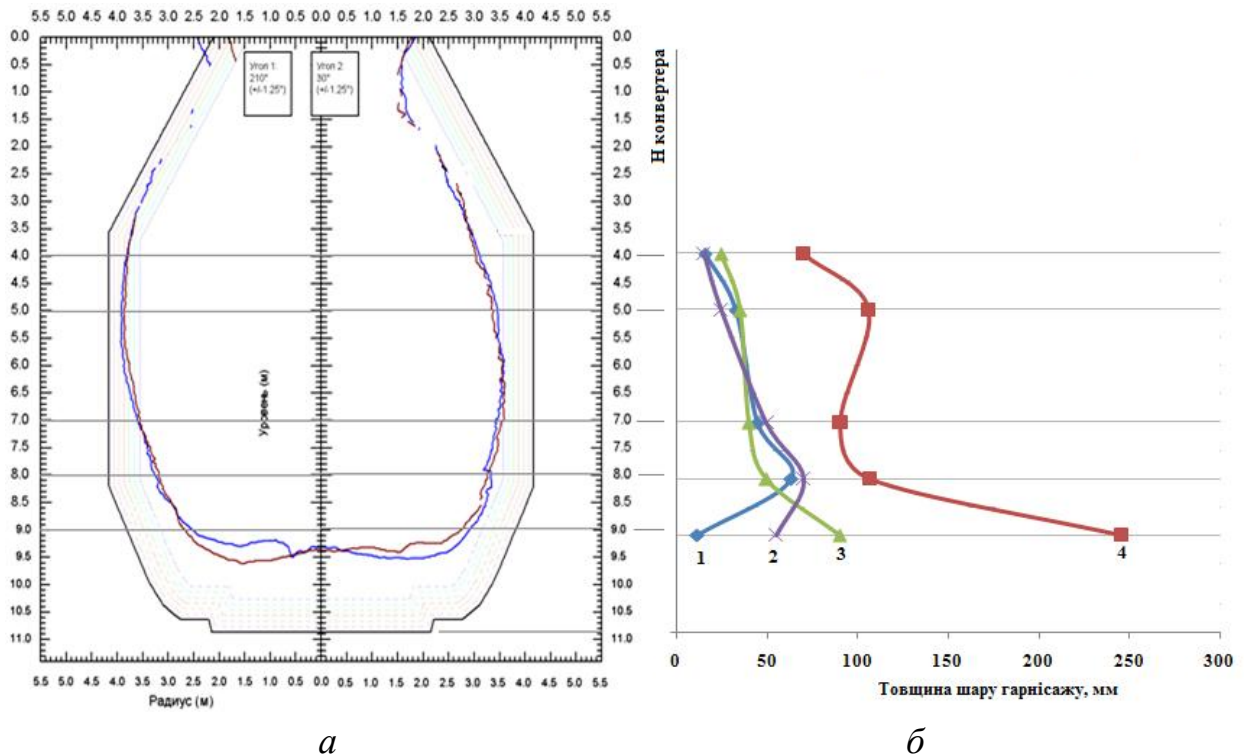


Рис. 5.3 - Ізолінії висхідного профілю робочого простору (А) та після роздування шлаку (Б) (а), товщина гарнісажного шлакового шару (б) по висоті агрегату: 1 - у перший період кампанії конвертера по футерівці; 2 – за результатами моделювання [111]; 3 - за результатами розрахунків, з використанням методики [115]; 4 – у завершальний період кампанії конвертера по футерівці

Таким чином доцільним є удосконалення конструкції гарнісажної фурми у напрямках забезпечення перенаправлення частини газошлакового потоку у задані сектори із створенням рівномірного за товщиною шару шлакового гарнісажу на внутрішній поверхні конвертера (див. розд. 3, 4).

З метою визначення необхідної тривалості роздування шлакової ванни для формування гарнісажного шару заданої товщини, прийнято припущення, що загальний обсяг сформованого шару відповідає сумарному обсягу крапель шлаку, які виносяться з шлакової ванни і досягають поверхні футерівки конвертера радіусом R_k .

Прийнято також, що струмінь газу, який виходить з постійною швидкістю V_0 з сопла Лавалю, утворює в рідкій ванні кратер із осью симетрії та глибиною $h_{кр}$, радіусом підшви $R_{кр}$ і радіусом кривизни поверхні в нижній точці $R_{нх}$. Потоки відхідного газу, що рухаються уздовж поверхні кратера, захоплюють частину шлакової ванни і формують кромку над недеформованою поверхнею, що відповідає режиму роздування «без пробою» ванни (див. розділ 3).

Для встановлення характеру зв'язку між $h_{кр}$ і V_0 різними авторами запропоновано використовувати: енергетичний баланс [116]; рівність тисків газової і рідкої фаз на поверхні їх розділу [117]; баланс сил на поверхні розподілу фаз [118] тощо. Необхідно відмітити, що для прийнятих у чинному дослідженні умов, можливість використання енергетичного балансу вимагає обґрунтування, так як після досягнення сталого режиму роздування, при якому форма поверхні ванни залишається сталою, кінетична енергія струменя вже не переходить у потенційну енергію деформації поверхні.

Можливість використання рівності тисків газової і рідкої фаз на поверхні розділу для ламінарного режиму [117], у разі турбулентних струменів з сопел Лавалю форми також вимагає додаткової оцінки, тому що не узгоджується з теоремою щодо збереження кількості руху. Швидкість V_0 газу при турбулентному режимі течії зменшується по осі струменя пропорційно віддаленню від сопла і зменшення тиску струменя на перешкоду. При цьому, кількість руху в струмені залишається сталим і інтенсивність впливу не повинна змінюватися.

Єдиним підходом, що не суперечить основам теорій газових струменів та гідравліки, у нашому випадку, можна вважати використання балансу сил на поверхні розподілу фаз [118].

У відповідності до отриманих за результатами холодного моделювання даних (див. розділ 3) об'єм рідини, який витискається струменями газу, визначається імпульсом потоку (I_a^0 , кг·м/с²) у точці зустрічі з поверхнею ванни.

Для 6-ти соплового наконечника гарнісажної фурми (рис. 1.12) тиск азоту (P_{N_2}) перед соплами Лавалю ($d_{кр1} = 0,043$ м; $d_{кр2} = 0,037$ м) при його витратах 600 м³/хв. складе 0,99 МПа. Густина азоту перед соплами Лавалю:

$$\rho_{N_2}^{ex} = \rho_{N_2} \frac{T_0 \cdot P_{N_2}}{P_0 \cdot T_{N_2}^{ex}} = 12,59 \text{ кг/м}^3, \quad (5.1)$$

де P_{N_2} – густина азоту за нормальних умов (1,25 кг/м³); P_0 – атмосферний тиск, Па; T_0 – температура азоту перед соплами, К.

Критична швидкість витоку азоту складе

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} R \cdot T_{N_2}^{ex}} = 315,8 \text{ м/с}. \quad (5.2)$$

де R – газова постійна, що дорівнює $\frac{8319}{\mu}$, н·м/кг·К; μ – молекулярна маса га-

зу; $\kappa = 1,4$ – показник адіабати.

Максимальна швидкість потоку азоту з сопел Лавалю, з врахуванням критерію швидкості витоку (1,58) складає

$$W_{вых}^{max} = W_{кр} \cdot \lambda_{max} = 500,3 \text{ м/с} \quad (5.3)$$

а максимальна масова витрата азоту крізь сопла Лавалю $d_{кр} = 0,043$ м та $0,037$ м - 2,739 кг/с та 1,755 кг/с відповідно. Імпульс струменя з сопла $d_{кр} = 0,043$ м дорівнюватиме 1382,57 кг·м/с², а з $d_{кр} = 0,037$ м – 885,86 кг·м/с² відповідно.

Силу тиску газового струменя на поверхню шлакової ванни визначили за виразом:

$$F = K \cdot Q \cdot V^2 \cdot \rho \quad (5.4)$$

де k - коефіцієнт, що залежить від умов зіткнення струменю із рідиною ($k=2$); V_x - швидкість струменю на рівні поверхні зіткнення з рідкою ванною, м/с; ρ - густина струменя, кг/м³; S - площа поперечного перерізу струменю в місці зіткнення з ванною, м².

При впливі струменя газу на рідину енергія головним чином витрачається на утворення нової поверхні; подолання сил в'язкості при зміні форми рідини та втрати, які обумовлені неефективною передачею енергії.

Із використанням розрахунків для умов роботи фурми (рис. 1.14) визначено, що при кінетичній енергії струменя у 38883,18 Дж та 9915,5 Дж (для сопел $d_{кр}=0,043$ м та $d_{кр}=0,037$ м відповідно), витрата енергії на утворення поверхні розподілу «азот-шлак» не перевищує $E = S \cdot \sigma = 1,4179$ Дж. Інша частина енергії витрачається на подрібнення шлакового розплаву та винесення крапель з утворених реакційних зон (кратерів).

Швидкість струменя на рівні зіткнення із поверхнею ванни залежить від висоти розташування наконечника фурми h_ϕ

$$V_x = 8,26 \cdot V_0 / \left(\frac{h_\phi}{2r_0} \right)^{1,137} \quad \text{при} \quad \frac{h_\phi}{2r_0} > 12, \quad (5.5)$$

$$V_x = V_0 \cdot \left[1 - 0,008 \cdot \left(\frac{h_\phi}{2r_0} \right)^{1,67} \right] \quad \text{при} \quad \frac{h_\phi}{2r_0} < 12, \quad (5.6)$$

де r_0 – вихідний радіус сопла Лавалю, м.

Глибина проникнення струменя азоту в шлакову ванну визначається як

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{\rho_2}{g \cdot \rho_{ш}}} \cdot V_x \cdot \sqrt{2r_x}, \quad (5.7)$$

де $r_x = r_0 + h_\phi \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}$, м; α_1 - кут розкриття струменя, град.

Діаметр струменя на рівні зіткнення з поверхнею шлакової ванни визначається за виразом

$$d_1 = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot V_0^2}{\rho_2 \cdot V_x^2}}. \quad (5.8)$$

а діаметр кратера реакційної зони становить

$$D = 4a \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R_0}\right)^2}, \quad (5.9)$$

де $a = d_1 \left(\frac{V_0}{V_x} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{3\rho_0}{2\rho_2}} = 1,43$ м. Тут $R_0 = \frac{1}{2} \left(h - a + \sqrt{(h-a)^2 + 8a^2} \right)$.

Площа поверхні реакційної зони взаємодії шлаку з газовим струменем може бути визначена за виразом $S = 8\pi a^2 \ln \frac{R_0}{a}$.

Отримана розрахунками за виразами (5.7-5.9) залежність сумарної площі реакційних зон для фурми (рис. 1.12) від куту нахилу сопел до вертикальної осі фурми, представлена на рис. 5.4.

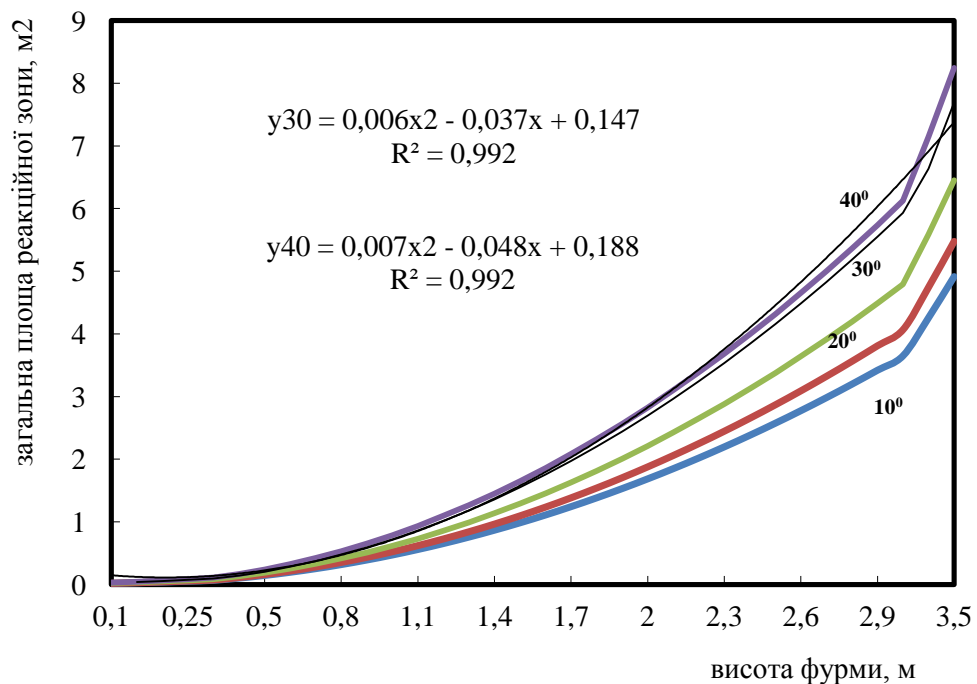


Рис. 5.4 - Залежність сумарної площі реакційних зон взаємодії газових струменів з шлаковою ванною від кутів нахилу сопел Лаваля

З врахуванням площі реакційних зон (рис. 5.4) допустили, що з їх поверхні може здуватися шар шлаку товщиною δ_n від 0,4 до 3 мм [115]. Останній розбивається потоком газу на краплі та переноситься на обмежену сектором S_C поверхню футерівки конвертера. Приймаємо у якості кутів нахилу сопел

Лавалю фурми та відбиття крапель шлаку на периферії потоку $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ без урахування і з урахуванням кута розширення газового струменя відповідно. При цьому S_C визначається кількістю сопел Лавалю наконечника фурми, а висота нанесення крапель шлаку (ΔH) у відповідному секторі - кутом α_1 .

В такому випадку отримали

$$\Delta H = H_{\max}^{всmp} - H_{\min}^{всmp}, \quad \text{де } H_{\max}^{всmp} = (R_k - h_{\phi} \cdot tg\alpha_i) \cdot tg\beta_i \quad (5.10)$$

де β_i - кут відбиття краплі від поверхні реакційної зони.

Ширину діапазону відповідного сектору нанесення шлакових крапель по висоті футерівки агрегату можна визначити за виразом

$$\Delta H = (R_k - h_{\phi} \cdot tg\alpha_i) \cdot tg\beta_i - (R_k - h_{\phi} \cdot tg\alpha_2) \cdot tg\beta_2, \quad (5.11)$$

а S_C , за умов рівномірного розташування сопел по колу наконечника, м², як

$$S_C = \frac{\pi}{2} R_k \left[R_k (tg\beta_1 - tg\beta_2) - h_{\phi} (tg\alpha_1 \cdot tg\beta_1 - tg\alpha_2 \cdot tg\beta_2) \right] \quad (5.12)$$

Після відповідних перетворень вираз для визначення площі ошлакованого одним струменем сектору S_C , представлений у вигляді

$$S_C = \frac{\pi}{2} R_k \cdot A, \quad \text{де } A = R_k (tg\beta_1 - tg\beta_2). \quad (5.13)$$

Товщина шлакової гарнісажної плівки, нанесеної на S_C за час польоту шлакової краплі діаметром $d_{ск}$ від кратера до поверхні футерівки складе

$$\delta_{нач} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_{ск}^2 \cdot \delta_n}{R_k \cdot A}. \quad (5.14)$$

З урахуванням загального обсягу крапель шлаку, що виносяться, товщина гарнісажу, нанесеного на S_C , за період роздування в 1 сек може бути розрахована за виразом, м:

$$\delta_{шл} = \frac{2r_{кр} \left(\sqrt{h_{кр}^2 + r_{кр}^2} \right)}{R_k^2 (tg\beta_1 - tg\beta_2) \cdot (R_k - h_{\phi} tg\alpha_1) \cdot tg\beta_1} \quad (5.15)$$

Так, відповідно з розрахунками за (5.15), при розташуванні наконечника фурми (рис. 1.14) на висоті 4 м (H_{ϕ}), для нанесення на сектор S_C шару гар-

нісажу товщиною у 50 мм тривалість роздування повинна складати 3,3 хв. При розташуванні фурми на висоті 0,5 м вказана товщина покриття досягається роздуванням ванни тривалістю вже 5,9 хв. і визначається розміром крапель шлаку у відхідному газшлаковому потоці, які сформовані при даній висоті наконечника фурми над ванною.

Розрахункова товщина гарнісажного шлакового шару у залежності від висоти розташування наконечника фурми наведена на рис. 5.5.

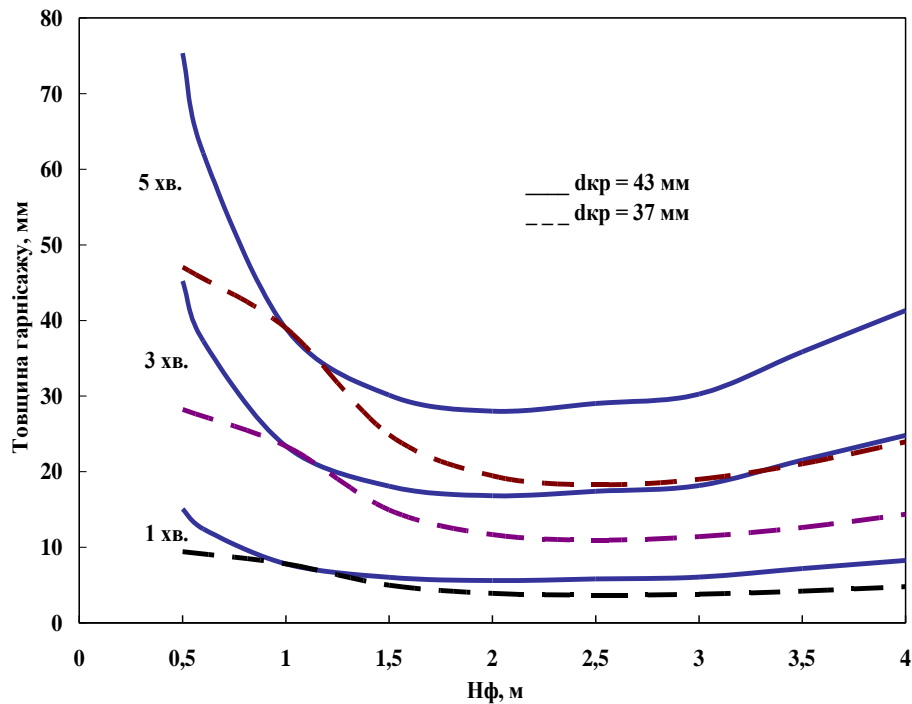


Рис. 5.5 - Залежність товщини гарнісажного шлакового шару у секторі S_C від тривалості роздування шлакової ванни та H_f

Таким чином, підтверджено, що товщина сформованого шару гарнісажу в нижній частині відповідного сектору S_C за один і той же часовий проміжок операції буде більше, ніж у верхній (що корелює з результатами чисельного моделювання, п. 4.1, 4.2 та рис. 5.3).

У загальному випадку для рідини із невеликою в'язкістю перехід від одного режиму взаємодії газового струменю із ванною до іншого визначається, в основному, досягненням критичного значення критерію Вебера (We). Розмір крапель, що утворюються за рахунок аеродинамічного подрібнення,

залежить як від властивостей рідини, так і від швидкості газового потоку, та може бути визначений за виразом

$$d_{ск} = \frac{\sigma We_{кр}}{\left(\frac{V_x}{2}\right)^2 \rho_{г}}, \quad (5.16)$$

де $We_{кр} = 13,5 - 0,442 \ln \frac{d^* \rho^* \sigma}{\mu^2}$; σ – поверхневий натяг шлаку, Н/м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

При діаметрах крапель шлаку, що виносяться з реакційної зони газовим потоком (азотом), від 0,1 до 0,6 мм [93], а за даними [57] – від 0,1 до 3,0 мм, середній густині конвертерного шлаку у 3000 кг/м³, $\sigma = 0,5 - 0,6$ Н/м (при $T = 1400 - 1600^\circ\text{C}$), $\mu = 0,05 - 0,20$ Па·с діапазон зміни величини $We_{кр}$ складатиме від $We_{\min} = 14,08$ до $We_{\max} = 16,80$.

Приймаємо швидкість винесення краплі з реакційної зони $U = \frac{V_x}{2}$, м/с, а масу краплі визначаємо за виразом

$$m_k = \frac{\pi}{6} \rho_{ш} \left(\frac{\sigma We_{кр}}{U^2 \rho_{г}} \right)^3. \quad (5.17)$$

Маса шлакової плівки, яку зриває з поверхні реакційної зони газовий потік, складе:

$$m_{пл} = \frac{\pi d_{ск}^2}{4} \rho_{ш} \delta_{пл} \quad (5.18)$$

Згідно з виконаними розрахунками для 250-т конвертера ПАТ «ДМК» та фурми (рис. 1.14) з соплами Лавалля, що мають кут нахилу 17° , ширина сектору (ΔH) за висотою у відповідному секторі S_C не залежить від розташування наконечника фурми над рівнем ванни, та складає 3,27 м.

Встановлено, що при зміні кута нахилу сопел Лавалля з 10° до 17° , значення S_C також не залежать від висоти розташування фурми і складають 9,84 м² та 4,73 м² відповідно (рис. 5.6).

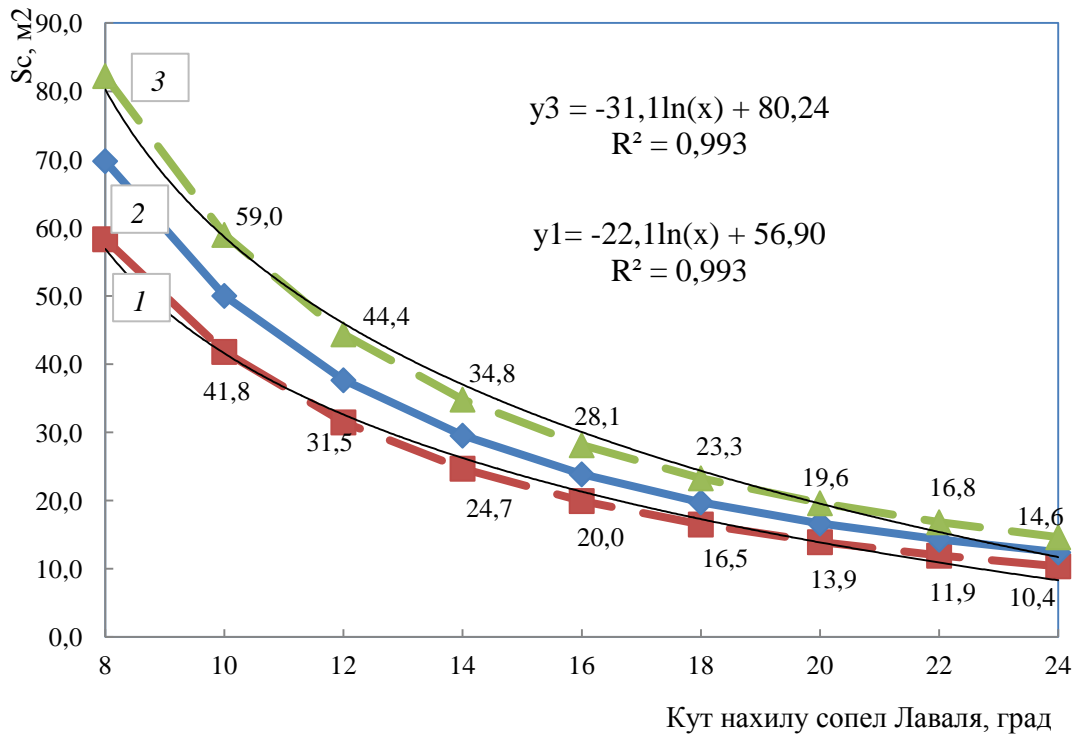


Рис. 5.6 - Залежність площі гарнісажної плями S_c на поверхні футерівки в залежності від кута нахилу сопла Лавалю до вісі фурми та періоду кампанії конвертера по футерівці: 1 - початковий період кампанії; 2 - після 2000 плавок; 3 - після 3500 плавок

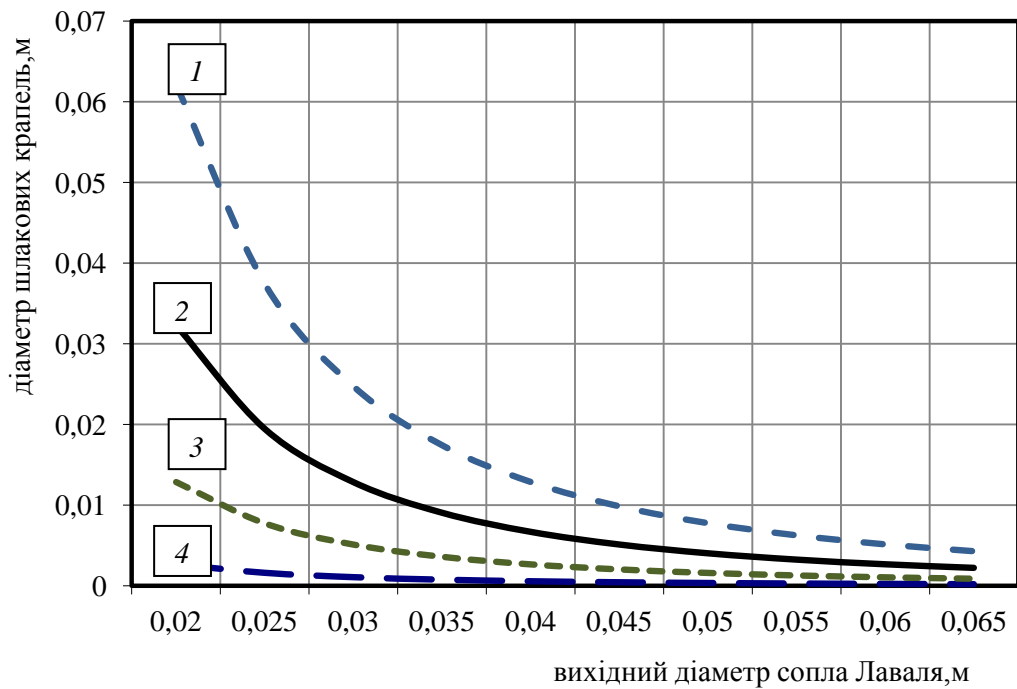


Рис. 5.7 - Залежність діаметру шлакових крапель від вихідного діаметру сопел Лавалю при зміні висоти фурми над днищем конвертера (від 0,5 до 2,0 м): 1 – 0,5 м; 2 – 1,0 м; 3 – 1,5 м; 4 – 2,0 м

При цьому, по мірі зносу футерівки по ходу кампанії і зміни внутрішнього діаметру робочого простору площа сектору S_C пропорційно збільшується. Вплив вихідного діаметру сопел Лавалю на діаметр шлакових крапель, що виносяться з реакційних зон на поверхню футерівки представлено на рис. 5.7.

Розроблена методика розрахунку необхідної для досягнення заданої товщини шлакової плівки на футерівці тривалості роздування шлакової ванни у подальшому була використана для удосконалення режимів зміни положення фурми за висотою по ходу операції.

5.3 Удосконалення конструкції гарнісажної фурми та технології роздування шлаку на футерівку 250-т конвертера

Необхідно відмітити, що при проведенні подальших досліджень, застосування удосконаленого режиму переміщення 6-ти соплової гарнісажної фурми, не дозволило у повній мірі вирішити завдання з належного «ошлакування» виявлених (рис. 5.2) «проблемних» зон. Вирішення вказаної проблеми було ускладненим також внаслідок відсутності в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК» спеціального обладнання для локального торкретування футерівки.

Штатна гарнісажна фурма (рис. 1.14) з згрупованими по три соплами Лавалю, не придатна для коригування напрямку руху шлакових крапель, що виносяться з шлакової ванни зворотнім потоком та перенаправлення їх у визначені розрахунками (див. п. 5.2) сектори S_C на футерівці.

Для досягнення заданої товщини гарнісажного шару у «проблемних» зонах (рис. 5.2), доцільним представлялося застосування методів примусового впливу на зворотній газошлаковий потік. Метою перенаправлення відхідного газошлакового потоку вважали необхідність забезпечення заданої товщини гарнісажного шару за час, що не перевищує тривалість роздування

шлакової ванни, та відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату.

З урахуванням наведеного вище, конструкцію штатної 6-ти соплової гарнісажної фурми (рис. 1.14) було модернізовано шляхом розміщення на її стовбурі другого ярусу сопел, розташованих на відстані 2,5 м (l_y) від торця наконечника [89, 90, 103,119]. З врахуванням запропонованої схеми роздування ванни (див. розділ 2) у запропонованому варіанті другий ярус фурми (рис. 1.12) містить чотири циліндричних сопла ($d=20$ мм), які виготовлені з жаростійкої сталі та розташовані під кутом 115^0 до поверхні ванни (рис. 5.8, 5.9). При співвідношенні витрат азоту між боковими та основними соплами 10-ти соплової двоярусної фурми (рис. 5.9) у 17% та 83% від загальних витрат азоту ($600\dots 800$ м³/хв.) на роздування ванни, тиск газового потоку з бокового сопла фурми на газошлаковий потік може бути розрахований з використанням виразу (5.4).

З урахуванням величини тиску струменів з бокових сопел ($d=20$ мм) на газошлаковий потік визначили, що відстань, на яку струмінь здатний перемістити краплі шлаку, одного порядку з розмірами робочого простору конвертера. Встановлено, що краплями шлаку, переміщеного газовими потоками ($100-130$ м³/хв.) з циліндричних сопел другого ярусу фурми у напрямку до стін, в залежності від кута їх нахилу, можливим є перекриття від 29,5 до 46,98% робочої поверхні футерівки.

Модернізована фурма (рис. 5.9) була використана у ході промислової кампанії 250-т конвертера ПАТ «ДМК» для Коригування профілю робочого простору [88, 89] з врахуванням розроблених пропозицій щодо режиму роздування шлакової ванни. У проведеній кампанії тривалість операції нанесення шлакового покриття складала 4...7 хв. Ускладнень у проведенні ошлакування футерівки конвертера при використанні дослідної двоярусної фурми не виявлено. Умови та результати проведення операцій нанесення гарнісажу у ході дослідної та порівняльної кампаній конвертера наведені в таблиці 5.1.

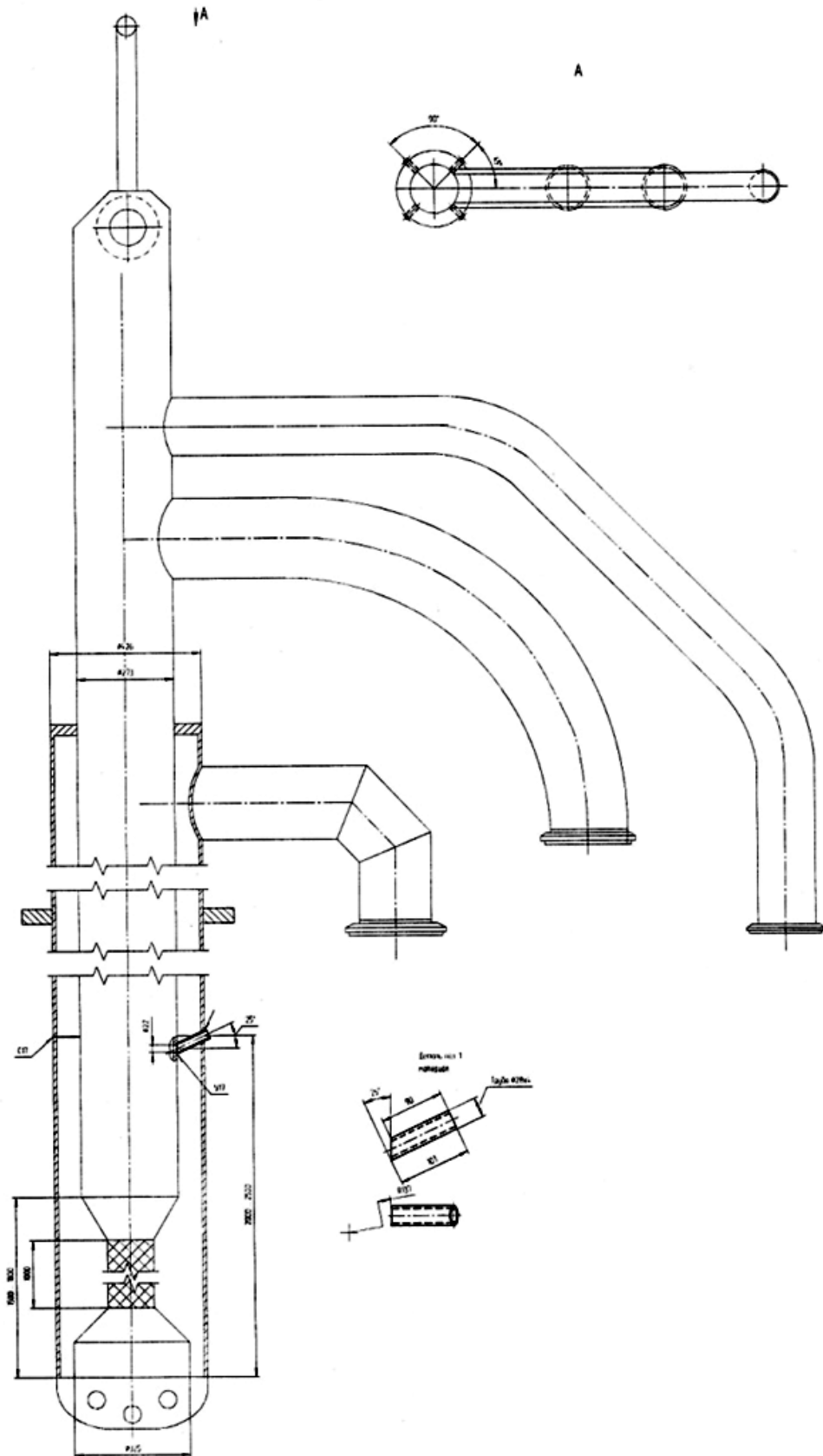


Рис. 5.8 - Схема конструкції спроектованої двоярусної гарнісажної фу-
рми для 250-т конвертера конвертерного цеху ПАТ «ДМК»

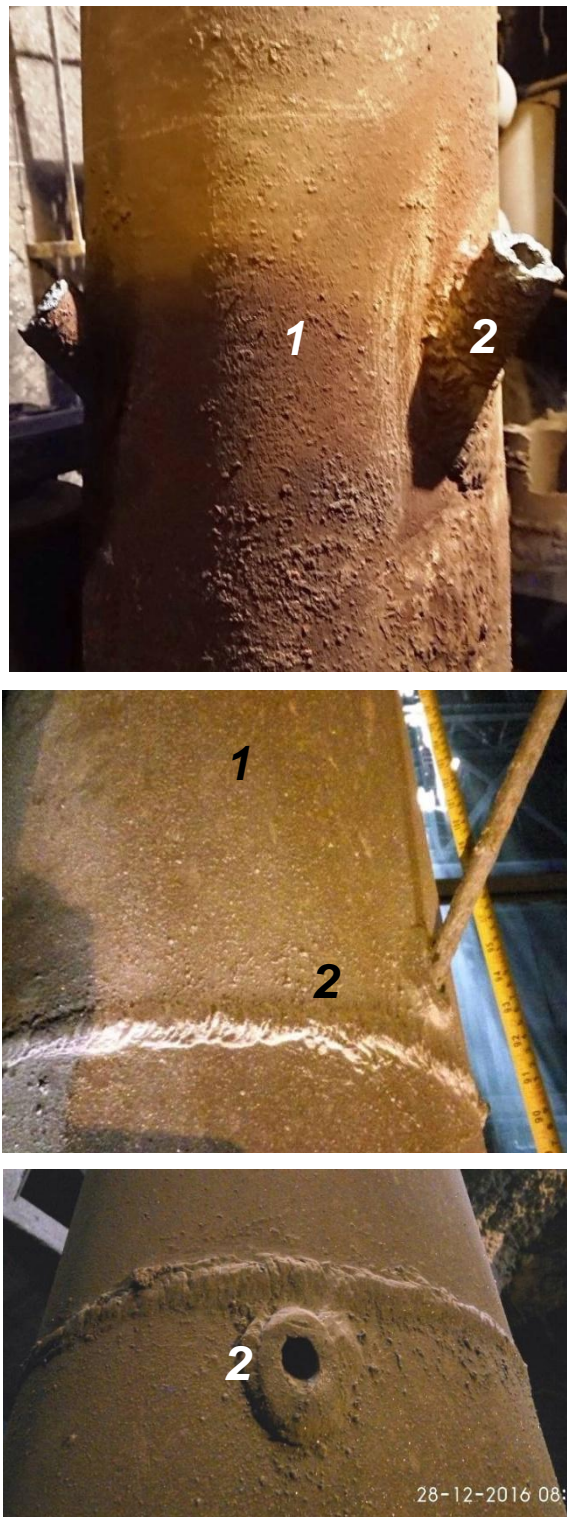


Рис. 5.9 - Вигляд додаткових бокових циліндричних сопел на другому ярусі гарнісажної 6-ти соплової фурми (рис. 1.14): 1 – стовбур фурми; 2 – шлакова ванна; 3 – циліндричні сопла

Таблиця 5.1

Результати дослідної та порівняльної кампанії 250-т конвертера
по футерівці [89]

№	Показник	Порівняльна кампанія	Дослідна кампанія	Відхилення
1	Товщина футерівки (арматурний та робочий шар), мм	1210	1080	- 130
2	Стійкість футерівки, плавок, у т.ч.: - робочого шару - арматурного шару	3408 2480 928	3731 2235 1496	+323 - 245 + 568
3	Інтенсивність роботи конвертера, пл. / добу	14,2	11,4	- 2,8
4	Тривалість простоїв конвертера, год.	384	749	+ 365
5	% плавок з нанесенням гарнісажу шляхом роздування шлаку	77,6	80,9	+ 3,3
6	Інтенсивність зносу футерівки, мм/пл., у т.ч.: - у початковий період кампанії по футерівці (до 800 плавки) - у основний період кампанії - арматурного шару	0,60 0,30 0,24	0,39 0,29 0,16	- 0,21 -0,01 - 0,08
7	Характеристика кінцевого шлаку перед роздуванням: - середній вміст (FeO), %, у т.ч.: - з (FeO) > 20 % - з (FeO) < 8 % - середній вміст (MgO), %, у т.ч.: з (MgO) < 8 %	15,9 11,8 0,7 6,5 85,6	15,2 2,8 0,9 6,8 27,8	- 0,7 - 9,0 + 0,2 + 0,3 - 57,8
8	Основність кінцевого шлаку, од.	2,3	2,4	+ 0,1
9	Кількість плавок, з температурою випуску сталі більш ніж 1700 ⁰ C, %	4,4	6,3	+ 1,9
10	Питомі витрати, кг/т: - доломітизованого вапна - магнезійних гранул	65,3 0,564	66,8 0	+ 1,5 - 0,564
11	Питомі витрати вогнетривів, кг/т	0,829	0,705	- 0,124
12	Питомі витрати на вогнетривкі матеріали для ремонту футерівки, %	100	93,99	- 6,01

Необхідно особливо відмітити, що у період дослідної кампанії відмовились від використання коштовних магнезійних модифікаторів (табл. 5.1). Окрім того, висхідна товщина футерівки конвертера, у період проведення дослідної кампанії, була зменшена на 130 мм.

Використання модернізованої гарнісажної фурми (рис. 5.9) та запропонованої схеми роздування шлакової ванни, дозволило наносити на визначені зони на футерівці шар гарнісажного покриття заданої товщини і зменшити винесення крапель шлаку за горловину конвертера.

Використання шару футерівки зменшеної початкової товщини та розрахункового алгоритму переміщення фурми по ходу роздування шлаку сприяло забезпеченню відновлення симетричності робочого простору конвертера по футерівці (рис. 5.10, а, б) по ходу кампанії. Після завершення дослідної кампанії на 250-т конвертері №1 виготовлений другий зразок двоярусної фурми був встановлений також на 250-т конвертер №2 (в період після 2382 плавки по футерівці).

На рис. 5.11, б представлений отриманий контрольним скануванням профіль робочого простору конвертера (вертикальний розріз) на 2383 (1) та 2469 (2) плавках. У цьому випадку ошлакування з застосуванням розробленої конструкції фурми сприяло відновленню профілю робочого простору після аварійного зменшення товщини футерівки (рис. 5.11, а).

Необхідно відмітити, що в умовах використання для роздування шлаку штатної гарнісажної фурми (рис. 1.14) аварійного зменшення товщини робочого шару футерівки було допущено вже на плавці №2382 (по футерівці). Після встановлення двоярусної фурми (рис. 5.9) виконання гарячого ремонту футерівки дозволило вже до 2469 плавки, у значній мірі, відновити раціональний профіль футерівки конвертера. За результатами промислового використання двоярусної гарнісажної фурми ознак розмивання нанесеного гарнісажного шлакового шару, у секторах перетину газових потоків з бокових сопел та стін конвертера, не виявлено.

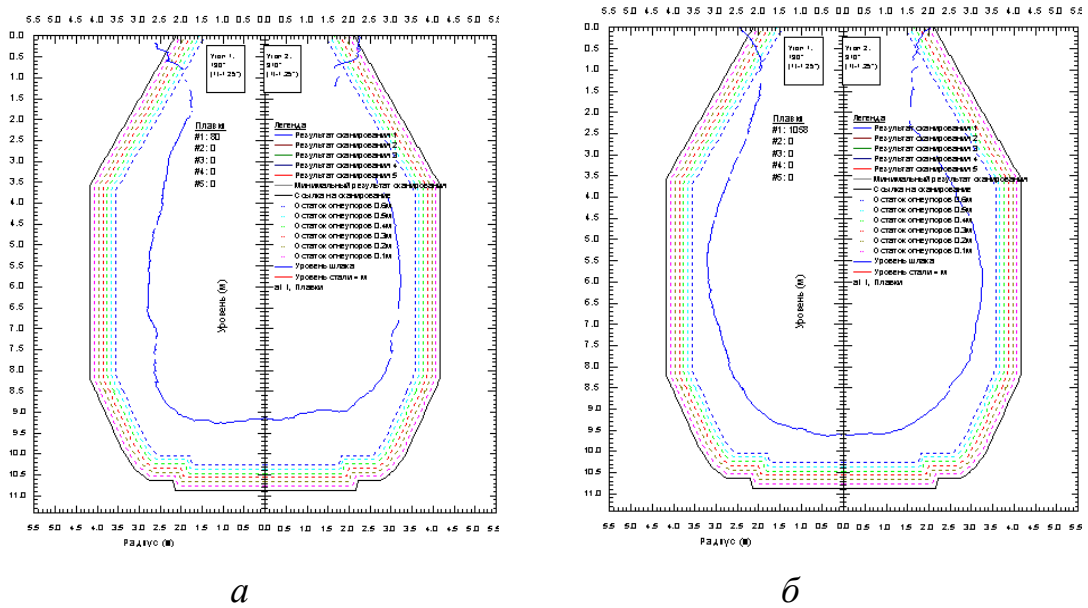


Рис. 5.10 - Профіль робочого простору 250-т конвертера до початку використання двоярусної гарнісажної фурми (на 80-й плавці по футерівці) (а) та у період її використання для роздування шлаку (на 1058 плавці) (б). Розріз $130^0 - 310^0$

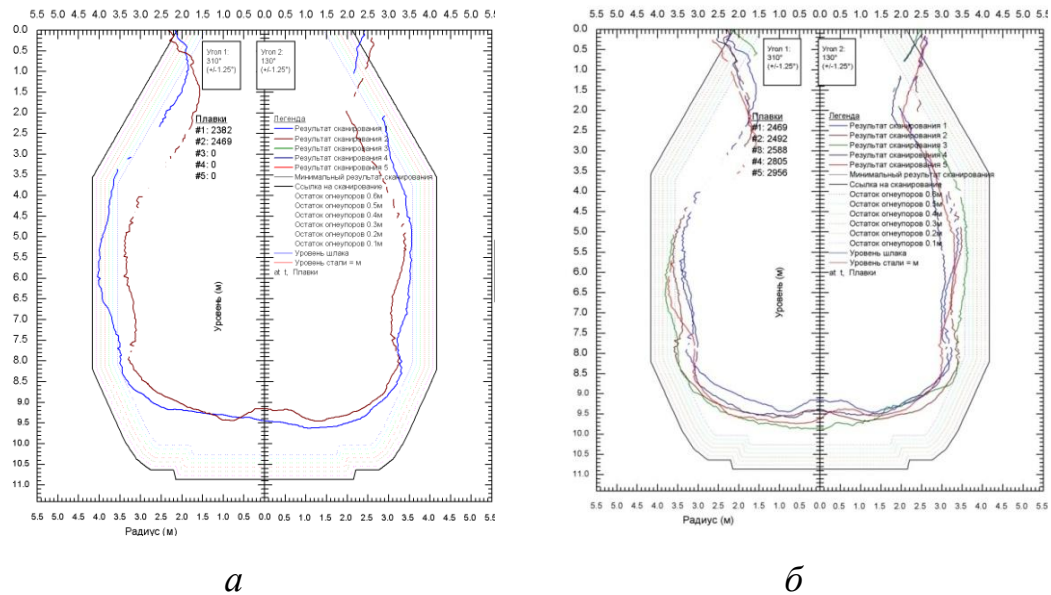


Рис. 5.11 - Відновлення профілю робочого простору після аварійного зменшення шару футерівки (а) та формування профілю робочого простору протягом наступних плавок (б). 1 – зона аварійного зменшення товщини робочого шару на плавці 2382; 2 – гарнісажний шар на футерівці, нарощений у період з 2382 по 2469 плавку. Розріз $130^0 - 310^0$

5.4 Напрямки подальшого удосконалення конструкції двоярусної гарнісажної фурми

З врахуванням позитивного досвіду [53, 70, 87, 89] до напрямків подальшої модернізації випробуваної конструкції гарнісажної фурми (рис. 5.13) за умов експлуатації фурми (рис. 5.9) у конвертерному цеху ПАТ «ДМК» віднесли наступні:

- перехід до газового охолодження стовбура та наконечника гарнісажної двоярусної фурми потоком азоту, який подають на роздування;
- виготовлення наконечника фурми з рядової вуглецевої марки сталі з виключенням необхідності використання міді [78, 96].

У такому варіанті конструкція газоохолоджуваної гарнісажної фурми має стовбур, виконаний тільки з однієї труби для підведення азоту. Торцевий наконечник виконаний у вигляді тарілки, в якій закріплені шляхом зварювання корпуси сопел Лавалю (рис. 5.12), що виступають за торець тарілки і розташовані похило. При цьому два сопла Лавалю з більшим діаметром ($d_{кр}=43$ мм) можуть бути розташовані симетрично під кутом у 17° і використані для роздування шлаку у область цапфових зон, а чотири сопла Лавалю з меншим діаметром ($d_{кр}=37$ мм), відповідно під кутом від 14° до 17° – для переважного ошлакування верхнього сектору циліндрової частини, що у комплексі з впливом струменів з бокових сопел на стовбурі фурми (рис. 5.9) дозволить наносити шлаковий гарнісаж у визначені «проблемні» зони на футерівці.

Подальшим розвитком запропонованого технічного рішення може бути перехід до використання газоохолоджуваної двоярусної гарнісажної фурми із можливістю зміни відстані між ярусами та напрямку бокових азотних струменів (рис. 5.13) при виявленні нових зон інтенсивного зносу футерівки [78, 88]. У такому варіанті конструкції фурми нижній 2 і верхній 4 яруси сопел з'єднані за допомогою різьбового з'єднання б, при цьому нижній ярус 1 може

вкручуватися у різьбу верхнього ярусу (рис. 5.13, а) або накручуватися на різьбу верхнього ярусу (рис. 5.13, б).

З метою герметизації зазору різьбове з'єднання має ущільнювальну температуростійку прокладку 7.

Керування зворотнім газошлаковим потоком здійснюється шляхом зміни положення сопел верхнього ярусу відносно сопел Лавалля наконечника фурми як у вертикальній так і у горизонтальній площинах.

Основні характеристики газоохолоджуваної двоярусної гарнісажної фурми для роздування шлаку в умовах КЦ ПАТ «Дніпровський МК» наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Порівняльні характеристики штатної фурми (рис. 5.1) та запропонованого варіанту газоохолоджуваної фурми (рис. 5.13)

№	Показник	Конструкція фурми	
		штатна 6-ти соплова (рис. 1.14)	газоохолоджувана 10-ти соплова (рис. 5.13)
1	Матеріал наконечника	мідь	сталь
2	Робочий тиск води, МПа Витрата води на охолодження наконечника, м ³ /год.	0,7 300	0 0
3	Витрата магнезійних модифі- каторів на підготовку шлаку до роздування, кг/т сталі	0,80...1,4	3,0...3,6*
4	Витрати азоту на роздування шлаку та охолодження фурми, м ³ /хв.	600...800	600...800
5	Область нанесення шлакового гарнісажу на футе- рівку	переважно цапфові зони	циліндрична частина, «проблемні» та зони цапф
6	Стійкість ^{**} нанесеного шлако- вого гарнісажу, пл.	1,0	1,2
7	Загальна стійкість футерівки, пл.	4100	4450**

* вдування у шлакову ванну тугоплавких порошкоподібних часток

** розрахункові показники

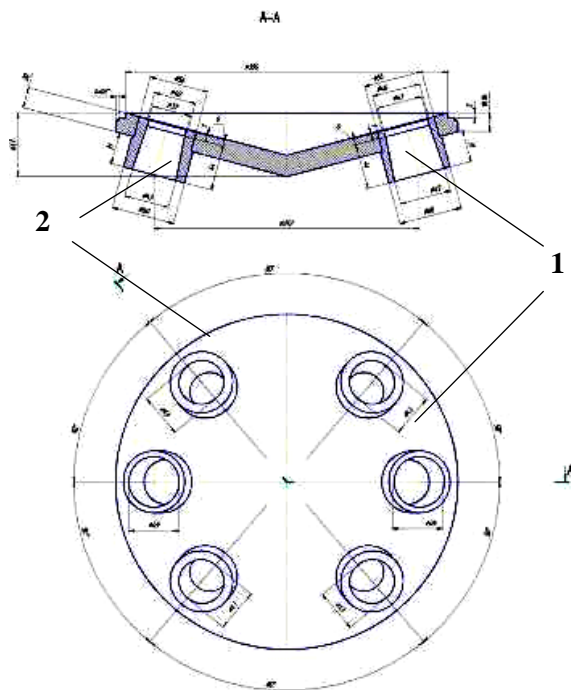


Рис. 5.12 - Запропонована конструкція наконечника газохолоджуємої гарнісажної фурми для 250-т конвертера: 1 – сопло Лаваля $d_{кр}=43$ мм; 2 – сопло Лаваля $d_{кр}=37$ мм

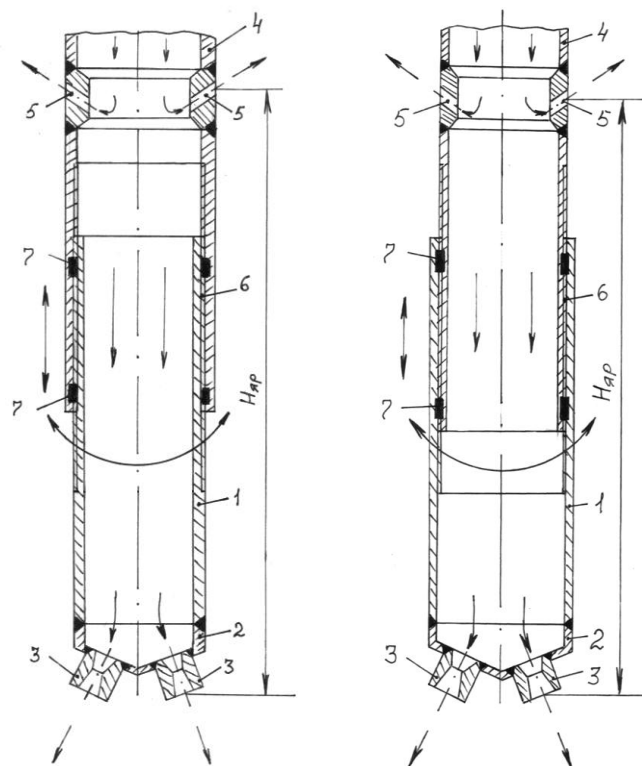


Рис. 5.13 - Схема конструкції газохолоджуваної двоярусної гарнісажної фурми [78] із можливістю зміни відстані між ярусами за двома варіантами виконання різьбового з'єднання: 1 – стовбур; 2 – наконечник з соплами Лавалю; 3 – сопла Лавалю; 4 – верхній ярус; 5 – бокові циліндричні сопла; 6 – різьбове з'єднання; 7 - прокладка

З врахуванням особливостей роздування шлакової ванни у 250-т конвертері з комбінованим продуванням ванни та даних, отриманих за результатами холодного (див. розділ 3) та високотемпературного моделювання (див. розділ 4) автором чинного дослідження запропонований спосіб роздування шлакової ванни [104] з розосередженням у часі вводом суміші порошкоподібних тугоплавких часток на основі MgO до гарнісажного шлаку по ходу операції.

Коригування фізико-хімічного стану кінцевого конвертерного шлаку згідно пропозицій [104] здійснюється за рахунок розосередженого вдування порошкоподібних модифікаторів шлаку крізь донні фурми (вогнетривкі вставки). По ходу роздування, у потоці дуття, до об'єму шлакової ванни подається суміш порошкоподібних MgO-вмісних матеріалів, при цьому витрата цієї суміші поступово зменшується по ходу роздування, та завершується після спливання 70-100 % загального часу роздування ванни. При цьому, у разі необхідності розрідження шлакової ванни, верхнє та донне дуття можуть містити 5-10 % кисню від загальних витрат дуття.

Подача у шлакову ванну у потоці донного дуття суміші MgO-вмісних матеріалів (з визначенням, згідно з результатами досліджень (див. розділ 4), співвідношенням по фракційному складу) призначена для попередження стікання по стіні конвертера нанесеного шляхом набризкування шару шлаку. Введення тугоплавких часток поряд із забезпеченням раціонального вмісту компонентів у шлаку дозволяє розширити можливості регулювання в'язкості шлаку та сприяє підвищенню його адгезійних властивостей.

У випадку, якщо залишки конвертерного шлаку після операції роздування не залишають у конвертері, а зливають у шлакову чашу, то подрібнений модифікований шлак, охолоджений за способом, розробленим автором дисертаційної роботи [122], може бути використаний у якості модифікатора шлаку - магнезіально-вміщуючої добавки.

Використання запропонованих способів нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття та охолодження залишків

шлаку із наступним його використанням дозволить збільшити термін служби футерівки конвертерних агрегатів за рахунок утворення на робочій поверхні футерівки гарнісажного шару підвищеної товщини та зменшити необхідність застосування коштовних магнезіальних флюсів для попередньої підготовки шлакової ванни.

5.5 Розрахунок ресурсо- та енергозберігаючої ефективності запропонованого способу відновлення профілю робочого простору конвертера

Розроблені в рамках даного дослідження технологічні рекомендації по проведенню конвертерної плавки та операції роздування шлакової ванни на футерівку 250-т конвертера ПАТ «ДМК» складаються з наступних положень:

- з метою зменшення кількості флюсів для забезпечення шлакового режиму при продуванні конвертерної ванни переробний чавун рафінують по сірці на установці десульфурації чавуну з досягненням 0,008-0,012 %S. Очікуване зменшення витрат вапна на конвертерну плавку - 21-28 кг/т сталі;

- по ходу продування конвертерної ванни забезпечується формування з початку операції рідкорухомого високоосновного шлаку з вмістом MgO (5-8 %MgO) та підвищеною фосфор- та сіркопоглинальною здатністю;

- продування конвертерної ванни завершують на вмісті вуглецю 0,06-0,08 %C зі збільшенням виходу годного на 0,3-0,8 %.

- після випуску залізовуглецевого розплаву до стальковшу проводять операцію нанесення гарнісажного шлакового шару шляхом роздування шлакової ванни з застосуванням водо- або газоохолоджуваних двоярусних гарнісажних фурм (рис. 5.9, рис. 5.13).

Розрахунки матеріально-енергетичного балансу (табл. 5.3) запропонованого способу роздування шлаку виконані з врахуванням сировинних умов роботи конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК».

Таблиця 5.3

Техніко-енергетичні показники операції роздування шлакової ванни на футерівку 250-т конвертера ПАТ «Дніпровський МК» із застосуванням штатної (Ш) (рис. 1.14) та запропонованих конструкцій гарнісажних фурм з водяним (ВО) (рис. 5.13) і газовим (ГО) (рис. 5.19) охолодженням

№	Показник	Тип гарнісажної фурми			
		Ш 6-ти соп- лова	ВО 10-ти соп- лова	ВО 10-ти соп- лова	ГО 10-ти сопло- ва
1	Загальні витрати модифікаторів, кг/т сталі: - магнезійний флюс - необпалений доломит - тугоплавкі добавки MgO	3,8 - -	- 8,6 -	- - 6,4	- - 6,4
2	Втрати модифікаторів з газами, що відходять, кг/т сталі	1,3	0,96	0,38	0,38
3	Зміна вмісту (MgO) у шлаку, %	+0,86	+0,53	+1,9	+1,9
4	Витрата азоту на роздування шлаку, м ³ /т сталі	17,0	15,8	15,2	15,2
5	Витрата води на охолодження, м ³ /т	10	10	10	0
6	Тривалість операції роздування шлаку, хв.	<u>4,0-6,0</u> 5,0	<u>3,5-5,0</u> 4,25	<u>3,2-4,8</u> 4,0	<u>3,2-4,8</u> 4,0
7	Зміна стійкості футерівки, пл.	0	+150*	+350*	+350*
8	Інтенсивність зносу футерівки, мм/пл.	0,29	0,27	0,21	0,21
9	Зміна енерговитрат, МДж/т сталі: - модифікатори шлаку - азот - охолоджуюча вода	17,2 119,6 20,16	3,2 119,2 20,16	9,8 110,7 20,16	9,8 110,7 0
10	Усього енерговитрати на роздування шлаку, МДж/т сталі	156,96	142,56	140,66	120,5

* розрахункові значення

Найменш енерговитратним (120,5 МДж/т сталі) є використання газоохолоджуваної двоярусної фурми (рис. 5.13) та Коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни шляхом вдування порошкоподібних тугоплавких добавок визначеного фракційного складу крізь донні вставки (фурми) [105].

Очікуваний енергозберігаючий ефект (від 14,4 до 36,46 МДж/т сталі) забезпечується за рахунок скорочення питомих витрат азоту на роздування шлакової ванни та вогнетривких матеріалів, підвищення стійкості футерівки та продуктивності конвертерів та, у разі переходу до газового охолодження фурми - виключенням витрат води на охолодження фурми, заміною міді для виготовлення наконечника рядовими марками сталі (табл. 5.4).

Для оцінки економічної ефективності використання розробок обрані 2 кампанії експлуатації футерівок на 250-т конвертері №1 ПАТ «Дніпровський МК»: базова з 10.03.2015 р. до 06.12.2015 р. та порівняльна з 27.01.2016 р. до 05.12.2016 р. (період промислового використання розробок, запропонованих у даній дисертаційній роботі). При впровадженні розроблених технологічних режимів та розробленої конструкції гарнісажної фурми (рис. 5.9) було досягнуто ресурсо- та енергозберігаючих ефектів (додатки А, Б) за рахунок:

- підвищення продуктивності конвертерів внаслідок зменшення тривалості поточних простоїв на гарячий ремонт футерівки конвертерів на 1,35 %;
- підвищення стійкості футерівки конвертерів на 9,5 %;
- зменшення витрат вогнетривких матеріалів, які використовуються для гарячого ремонту футерівки конвертерів на 6,01 %.

Впровадження розроблених у дисертаційній роботі конструкції двоярусної гарнісажної фурми та технологічних рекомендацій по нанесенню шлакового гарнісажу на футерівку 250-т конвертера дозволило в умовах роботи конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський МК» отримати сумарний економічний ефект за 2016 рік у розмірі 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі).

5.6 Висновки за розділом 5

1. За результатами аналізу сканограм робочого профілю 250-т конвертерів ПАТ «Дніпровський меткомбінат» встановлено, що ускладнення у формуванні рівномірного за товщиною шару захисного шлакового гарнісажу та, відповідно, у забезпеченні сталої симетричності робочого простору, виникають внаслідок прискореного зносу футерівки у локальних («проблемних») зонах на циліндровій частини агрегату. Виявлені «проблемні» зони розташовані на меридіанах 50, 150, 215, 310 град. та, у зв'язку з відсутністю у цеху спеціального обладнання для локального торкретування і недоліками у конструкції штатної гарнісажної фурми, не досяжні для захисту гарнісажем.

2. Уперше, з застосуванням авторської методики встановлений фактичний розподіл за товщиною утвореного на футерівці гарнісажного шлакового шару як за висотою, так і за радіусом агрегату. Останній складає від 5...8 мм у районі горловини до 35...200 мм у нижній частині агрегату.

3. Розроблена методика визначення необхідної тривалості роздування шлакової ванни та висоти розташування фурми для отримання заданої товщини шлакового шару у кожному визначеному секторі S_C на стіні конвертера. Доведено, що при роздуванні шлаку у 250-т конвертері із застосуванням гарнісажної фурми з соплами Лавалю, що мають кут нахилу 17° , ширина сектору шлакової плями за висотою у відповідному секторі S_C не залежить від розташування фурми над рівнем ванни, та складає 3,27 м.

4. Теоретично обгрунтована та підтверджена промисловими випробуваннями можливість перенаправлення частини шлакових крапель зі зворотнього газшлакового потоку на визначені зони на стінах агрегату. Це дозволяє Коригувати профіль робочого простору конвертера шляхом створення гарнісажного шару заданої товщини у визначених секторах. Встановлений комплексний характер впливу кута нахилу сопел Лавалю до вісі фурми і пері-

оду кампанії конвертера по футерівці на площу утвореної гарнісажної «плями» на поверхні футерівки.

5. Спроектвана, виготовлена та введена у промислову експлуатацію в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» конструкція двоярусної гарнісажної фурми. Фурма містить додаткові бокові циліндричні сопла ($d=20$ мм) розташовані на стовбурі на відстані 2,5 м від торця наконечника під кутом 115° до поверхні ванни.

6. За результатами аналізу даних дослідно-промислової кампанії запропонована та захищена патентом інноваційна конструкція газоохолоджуваної двоярусної гарнісажної фурми із можливістю оперативної зміни відстані між ярусами та напрямку бокових азотних струменів при виявленні «проблемних» зон випереджаючого зносу футерівки.

7. Розроблений та захищений патентом спосіб роздування шлакової ванни з забезпеченням модифікування складу шлаку та Коригуванням його фізико-хімічного стану по ходу операції за рахунок подавання у шлак у потоці донного дуття порошкоподібних магнезійних матеріалів. Частки магнезійних матеріалів сприяють розширенню можливостей регулювання в'язкості шлаку та підвищенню його адгезійних властивостей до футерівки.

8. Очікуваний енергозберігаючий ефект (до 36,46 МДж/т сталі) при впровадженні у промислове використання запропонованої конструкції газоохолоджуваної фурми може бути забезпечений за рахунок скорочення питомих витрат вогнетривких матеріалів, виключенням витрат води на охолодження фурми, заміною міді для виготовлення наконечника рядовими марками сталі, підвищення стійкості футерівки та продуктивності конвертерів.

9. За рахунок впровадження розроблених обладнання та технології в умовах роботи конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» отриманий сумарний економічний ефект за 2016 рік у розмірі 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі). Ресурсо- та енергозберігаючого ефектів досягнуто за рахунок підвищення продуктивності конвертерів внаслідок зменшення тривалості поточних простоїв на гарячий ремонт футерівки конвертерів на 1,35 %; під-

вищення стійкості футерівки конвертерів на 9,5 %; зменшення витрат вогнетривких матеріалів, які використовуються для гарячого ремонту футерівки конвертерів на 6,01%.

З матеріалами розділу можна ознайомитись у публікаціях [78, 88, 89, 90, 94, 96, 103, 104, 108, 119, 122].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне завдання щодо удосконалення технології нанесення захисного шлакового гарнісажу підвищеної стійкості на футерівку конвертера за рахунок використання методів комплексного впливу на фізико-хімічні властивості шлакової ванни та шляхом коригування напрямку винесення шлакових крапель з ванни на футерівку, що базується на розвитку наукових уявлень та фізико-хімічної схеми роздування шлаку і отриманих експериментальних даних про закономірності формування гарнісажного шару на вогнетриві.

Найбільш важливі висновки та рекомендації дисертаційної роботи:

1. Із застосуванням відомих моделей взаємодії надзвукових газових струменів із рідиною та дозвукових струменів з відхідним газорідним потоком, положень теорії подібності виконано інженерне обґрунтування визначальних параметрів дуттьового режиму нанесення шлакового гарнісажу на футерівку шляхом багатоструменевого роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням. Уперше встановлені особливості комбінованого роздування шлакової ванни. Доведено, що зсув струменями газу, що витікає з донних продувних вставок, шлаку від реакційних зон взаємодії верхніх струменів зі шлаком призводить до зменшення інтенсивності формування та зміни напрямку відхідних газошлакових потоків. Встановлений переважний вплив висоти розташування наконечника фурми h_{ϕ} відносно діаметра d_{ϕ} донних вставок. Доведено, що у при відношенні h_{ϕ} / d_{ϕ} від 0,28 до 0,44 забезпечується зменшення «зашлаковування» стовбура фурми з одночасним збільшенням обсягу шлаку, що спрямований на стіни конвертера.

2. Показано, що потік газу з донних фурм дещо змінює форму та розміри кратерів (збільшення на 10-15%), у порівнянні з тільки верхнім роздуванням, підвищує висоту гребеню ванни та обсяги рідини, що викидається у напрямку стін конвертера. Встановлено, що раціональний варіант комбінованого роздування ванни - режим «з пробоем» ванни. Запропоновані емпіричні

вирази для визначення умов переходу від режиму роздування ванни «без пробою» та «з пробоєм», загального діаметру реакційної зони взаємодії газових струменів з ванною та раціональної робочої висоти розташування наконечника фурми.

3. Теоретично обґрунтований та підтверджений випробуваннями новий спосіб перенаправлення шлакових крапель на визначені зони футерівки. Визначені закономірності впливу відстані між ярусами двоярусної фурми та її положення над ванною на динаміку формування шару гарнісажного покриття на футерівці. Отримані математичні моделі для визначення товщини та площі покриття вогнетриву гарнісажем. Встановлено, що площа перекриття боковими струменями робочої поверхні конвертера складає 29,5...46,98%. Встановлені раціональні параметри операції роздування шлакової ванни з використанням двоярусної фурми за схемою перенаправлення частини зворотнього газшлакового потоку у визначені «проблемні» зони на стінах конвертера. Для умов 250-т конвертера КЦ ПАТ «ДМК» висота розташування наконечника двоярусної фурми повинна бути у діапазоні від 0,40 до 0,55 м у основний та від 1,50 до 1,65 м - у перший період роздування шлакової ванни відповідно.

4. З використанням розробленої математичної моделі гідрогазодинаміки у робочому просторі конвертера визначені раціональні параметри роздування ванни для отримання шару шлакового гарнісажу заданої товщини у «проблемних» зонах на стінах агрегата.

5. Теоретично обґрунтовано спосіб коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни з управлінням внутрішнім тертям у шлаковому шарі на футерівці. Уперше визначені зміни величини роботи адгезії та ступінь впливу вмісту CaO, MgO у шлаку та внесених тугоплавких часток на зміну крайового кута змочування. З використанням отриманих математичних моделей доведено, що визначальний вплив на умови змочування мають розміри внесених до шлаку тугоплавких часток, раціональними визнані діаметри від 1,0 до 3,0 мм. Доведено, що використання від 6 до 8% тугоплавких часток призво-

дить до коливань величини роботи адгезії шлаку до вогнетриву у діапазоні від 0,2 до 0,8 Н/м², у залежності від співвідношення вмісту СаО та MgO у шлаку.

6. Розроблено методику та алгоритм розрахунку для визначення необхідної тривалості роздування шлакової ванни та положення над ванною двоярусної фурми для відновлення раціонального профілю робочого простору конвертера. Показано, що при роздуванні шлакової ванни у 250-т конвертері ПАТ «ДМК» із застосуванням двоярусної фурми з соплами Лаваля, що мають кут нахилу 17° та соплами верхнього блоку з дозвуківими соплами з кутом нахилу 115° до ванни, ширина сектору нанесеної шлакової «плями» не залежить від розташування наконечника фурми, та складає 3,27 м, що визначає умови коригування профілю робочого простору конвертера по ходу кампанії. Уперше встановлений фактичний розподіл за товщиною утвореного на футерівці гарнісажного шлакового шару як за висотою, так і за радіусом агрегату. Останній складає від 5 до 8 мм у районі горловини до 35 до 200 мм у нижній частині агрегату.

7. Спроектвана, виготовлена та впроваджена у промислову експлуатацію у КЦ ПАТ «ДМК» двоярусная гарнісажна фурма, що містить 6-ти сопловий наконечник із згрупованими по три у напрямках цапфених зон соплами Лаваля двох різних діаметрів та розміщений на відстані 2,5 м від торця наконечника верхній блок з 4-ма циліндричними соплами. При впровадженні результатів дисертаційної роботи досягнуто ефекту з підвищенням продуктивності конвертерів за рахунок 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 за 2016 рік склав 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі). Очікуваний економічний ефект при реалізації запропонованої технології для умов КЦ ПАТ «ДМК» складає 4311789 грн. на рік (2 грн./т сталі).

8. Очікуваний енергозберігаючий ефект (до 36,46 МДж/т сталі) при впровадженні у промислове використання запропонованої конструкції газоо-

холоджуваної фурми може бути забезпечений за рахунок скорочення питомих витрат вогнетривких матеріалів, виключенням витрат води на охолодження фурми, заміною міді для виготовлення наконечника рядовими марками сталі, підвищення стійкості футерівки та продуктивності конвертерів.

9. Новизна і промислова корисність технічних рішень підтверджуються отриманими патентами «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. Розроблені в дисертаційній роботі установки та методики використовуються на кафедрі металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету в навчальному процесі при читанні дисциплін «Техніка високотемпературного експерименту», «Технології ресурсозбереження в металургії», а також при виконанні здобувачами вищої освіти випускних кваліфікаційних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Освоение технологии комбинированной продувки в 160-т конвертерах / Л. А. Смирнов, А. А. Бабенко, Ю. А. Данилин [и др.] // Сталь. – 2010. – №5. – С. 43–45.
2. Ярошенко А.В. Оптимизация комбинированной продувки в конвертере с применением нового технического обеспечения / А.В. Ярошенко, Ю.Ф. Суханов, Ю.Н. Долгих // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 19–21.
3. Система комбинированной продувки жидкой конвертерной ванны на Нижнетагильском металлургическом комбинате / Ю. А. Данилин, С. В. Виноградов, Н. В. Мухранов [и др.] // ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2008. – №6. – С.51–53.
4. Турчин М.Ю. Футеровка конвертера и комплекс мер ухода за ней в процессе работы / М.Ю. Турчин // новые огнеупоры. – 2013. - № 3. – С. 24-25.
5. Sian C. Slag splashing for BAOSTEEL's 300 metric ton BOF and crystallographic structure of its slag / C. Sian, Y. Wenyuan, Z. Conglie // Iron and Steelmaker. – 2000. – №7. – P. 39–41.
6. Messina C.J. Slag splashing in the BOF – World wide status, practices and results // Iron and Steel Engineer. - 1996. - № 5. - P. 17-19.
7. Kitamura M., Hoh S. LD-converter way of combined blowing // Kobe Steel Eng. Repts. – 1982. – Vol. 32, № 4. – P. 85–87.
8. Оптимизация показателей стойкости и снижение затрат на футеровку конвертера / А.Н. Смирнов, К.Е. Писмарев, А.А.Сердюков [и др.] // Металл и литье Украины. - 2011. - №11(222) - С. 45-52.
9. Кольман Т. Сравнительный анализ кислородных конвертеров. Оценка технического обслуживания и технологического процесса / Т. Кольман, Х. Яндл // Черные металлы. – Май, 2014. - С. 43—49
10. Повышение стойкости футеровки и совершенствование методов обслуживания современных большегрузных конвертеров / А.Н. Смирнов, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, К.Н. Шарандин // ОАО Бюллетень «Черная металлургия». – 2012. - № 6. - С. 26-30.
11. Юнгер Г.Й. Анализ схем технического обслуживания футеровки кислородных конвертеров / Г.Й. Юнгер, К. Яндл, Й. Капель // Сталь. – 2009. - № 3. - С. 18-24.
12. Гудман Н. Вспенивание шлака в кислородных конвертерах / Н. Гудман // Steel Times International. – 1996. – №4. – С.3–4.
13. Совершенствование способов ремонта футеровки 160-т конвертеров с применением нейтральных газов / Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, В.В. Соколов [и др.] // Сталь. – 1999. – №5. – С. 39–42.

14. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, А.Н. Смирнов // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 9-10. – С. 4-7.
15. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г.С. Ходаков // *Российский химический журнал*. – 2003, Т. 47. – С. 33-44.
16. Соколов В.В. Анализ оптимальных параметров дутьевого режима операции нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров / В.В. Соколов, Е.В. Протопопов, К.Н. Шакиров // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2004. - № 6. – С. 18-21.
17. Бойченко Б.М. Разработка теоретических основ, создание и внедрение ресурсо- и энергосберегающей технологии кислородно-конвертерного производства стали / Дисс. на соискание учёной степени доктора техн. наук. - Днепропетровск.: - 1989. - 516 с.
18. Two challenges to system of periclase quality evaluation / L.M. Akselrod, I.G. Maryasev, A.A. Platonov, D.R. Melnikova // *METEC & ESTAD 2015*, Dusseldorf, Germany, June 2015.
19. Аксельрод Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твёрдое тело-жидкость). - Л.: Химия. - 1974. - 256с.
20. Обст К.-Х. О растворимости окиси магния в кислородно-конвертерных шлаках / К.-Х. Обст, Э. Шюрман, Г. Ман, Д. Нолле // *Чёрные металлы*. – 1980. – № 20. – С. 23-28.
21. О механизме износа периклазоуглеродистых огнеупоров в конвертере / В.И. Пищида, Б.М. Бойченко, А.Г. Величко, М.С. Тарнавский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2003. - №8. - С.98-101.
22. Камелли С., Лабадие М. Анализ механизма износа MgO-C-кирпича шлакового пояса сталеразливочных ковшей // *Огнеупоры и техническая керамика*. - 2007. - №3 - С. 22-26.
23. О возможности повышения стойкости футеровки сталеплавильных агрегатов / А.Н. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев, Е.В. Синегин // *Матеріали конференції «Металургія. 2019»*. - С. 322-323.
24. Сотников А.И. Строение границы металл-оксидный расплав и особенности электрохимических методов в металлургических системах / А.И. Сотников. – В кн.: *Физико-химические исследования металлургических процессов*. Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1974.
25. Характеристика окислительных процессов в углеродсодержащих огнеупорных материалах для металлургии / Окке С., Андре С., Эраув Ж.-П. и др. // *Огнеупоры и техническая керамика*. - 2008. - №1.- С. 55-59.

26. Суворов С.А. Взаимодействие периклазовых карбонированных огнеупоров с конвертерными шлаками / С.А. Суворов, В.В. Козлов, В.А. Мусевич // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. - №10. - С. 7-11.
27. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. – М.: Металлургия, 1994. – 440с.
28. Касьян Г.И. Возможность повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей при использовании магнезиальных шлакообразующих добавок / Г.И. Касьян, А.Я. Минц // Металл и литье Украины. – 2009. - №1-2. – С. 23-29.
29. Турчин М.Ю. Практика применения высокомагнезиальных флюсов для модификации конвертерного шлака 160-т конвертеров ОАО НТМК / М.Ю. Турчин, В.В. Левчук, С.А. Ремиго // Бюллетень «Черная металлургия». – 2013. - № 6. – С. 27-31.
30. Тахаутдинов Р.С. Производство стали в кислородно-конвертерном цехе Магнитогорского металлургического комбината. – Магнитогорск, 2001. – 148 с.
31. Янсен Х. Износ огнеупоров посредством коррозии и окисления при производстве стали / Х. Янсен // Черные металлы. – 2006. - № 1. – С. 32-37.
32. Современные технологии выплавки стали в кислородных конвертерах с использованием высокомагнезиальных флюсов / А.Н. Калиногорский, Е.В. Протопопов // Сб. трудов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая» (18-21 апреля 2017 г.). – 2017. – С. 36-39.
33. Ким В.А. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав-вязкость / В.А. Ким, А.А. Акбердин, И.С. Куликов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. - № 9. – С. 167.
34. Касьян Г.И. Возможность повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей при использовании магнезиальных шлакообразующих добавок / Г.И. Касьян, А.Я. Минц // Новые огнеупоры. – 2008. - № 10. – С. 13-16.
35. Hideaki Suito, Ryo Inoue, Minoru Takada. Phosphorus distribution between liquid iron and MgO saturated slags of the system CaO-MgO-FeO_x-SiO₂ // Trans. of Iron and Steel inst. Japan. - 1981. - V.21, №4. - p.250-259.
36. Дидковский В.К., Третьяков Е.В. Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров. – М.: 1985 (Обзорная информация / ин-т «Черметинформация», сер. «Сталеплавильное производство», вып. 4, 23 с.
37. Старов Р.В. Влияние технологических особенностей конвертерной плавки на износ футеровки / Р.В. Старов, Ю.М. Нечкин, В.И. Явойский // Производ-

- ство стали в кислородно-конвертерных и мартеновских цехах. – М.: Металлургия, 1978. - С. 25-28.
38. Оценка растворимости оксида магния в шлаке по ходу продувки конвертерной плавки / К.Н. Демидов, А.В. Климов, Т.В. Борисова // Труды VII конгресса сталеплавильщиков / г. Магнитогорск, 15-17 октября 2002 г. М. : ОАО «Черметинформация». - 2003. - С. 169-180.
39. Новиков В.К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов / В.К. Новиков // Расплавы. - 1987. - Т.1. №6. - С.21-33.
40. Практика применения магниезальных модификаторов шлака в электросталеплавильных печах и сталеразливочных ковшах / М.Б. Оржих, Л.М. Аксельрод, М.Б. Турчин [и др.] // Новые огнеупоры. – 2011. - № 6. – С. 56-58.
41. Использование высокомагнезиальных шлаков в конвертерной плавке / К.Н. Демидов, А.М. Ламухин, О. Ф. Шатилов [и др.] // Труды VII конгресса сталеплавильщиков / г. Магнитогорск, 15-17 октября 2002 г. М. : ОАО «Черметинформация». - 2003. - С. 186-193.
42. Wettability between molten slag and MgO-C refractories for slag splashing process / Yuan Z., Wu Y., Zhao H., Matsuura H., Tsukihashi F. // ISIJ International, Vol. 53 (2013), № 4, pp.598-602.
43. Корченко В.П. Влияние содержания углерода и алюминия на свойства периклазоуглеродистых огнеупоров для футеровки кислородных конвертеров / В.П. Корченко, Г.М. Дроздов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. - № 7. - С. 222-225.
44. Бабенко А.А. Анализ влияния температуры металла, основности и окисленности магниезальных шлаков на предел насыщения MgO и рафинирующие свойства / А.А. Бабенко, С.М. Челпан, Л.Ю. Кривых [и др.] // Новые технологии и материалы в металлургии: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С. 170-178.
45. Суворов Д.А. Экспериментальное измерение растворимости MgO в металлургических шлаках для управления шлаковой коррозией периклазоуглеродистого огнеупора / Д.А. Суворов, В.В. Козлов // Новые огнеупоры. – 2014. - № 3. – С. 127-129.
46. Работа кислородных конвертеров на магниезальных шлаках / Н.И. Ярошенко, Р.В. Старов, Е.В. Третьяков [и др.] // Сталь. - 1971. - № 9. - С. 793-796.
47. Увеличение кампании конвертера путем оптимизации условий эксплуатации // Новости черной металлургии за рубежом. – 2008. – №5. – С. 23–26.
48. Конвертерное производство стали на Украине / Б. М. Бойченко, А. Г. Величко, В. С. Харахулах, В. В. Лесовой // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 7. – С. 2–10.

49. Rymarchyk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations / N. Rymarchyk // *Steelmaking Conference Proceedings*. – 1998. – P. 445–449.
50. Технологии производства новых доломитовых флюсов на Докучаевском ФДК ОАО «Видис» и их использования в конвертерной плавке на ОАО «МК»Азовсталь» / В. В. Пономарев, В. И. Ганошенко, И. Г. Цапи [и др.] / *Новости науки Приднепровья*. – 2008. – № 1. – С. 75–77.
51. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и экология: [учеб.] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
52. Бигеев А.М., Бигеев В.А. *Металлургия стали*. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. - 542 с.
53. New system for Applying a slag Coating to the converter lining / A.G. Chernyatevich, E.N. Sigarev, I.V. Chernyatevich [a. o.] // *Steel in Translation*. – 2017. - Vol. 47, № 6. - pp. 394-398.
54. Патент України № 97754, С21С 5/44. Спосіб ремонту футерівки конвертера та торкрет-фурма для його здійснення / А.Г. Чернятевич, Є.М. Сігарьов, К.І. Чубін, О.А. Чубіна // *Опубл. Бюл. №5, 2012 р.*
55. Раздув шлака в кислородном конвертере емкостью 300 т на фирме BaoSteel и кристаллографическая структура шлака // *Новости черной металлургии за рубежом*. – 2001. – № 2. – С. 48–49.
56. Совершенствование способов ремонта футеровки 160-т конвертеров с применением нейтральных газов / Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, В.В. Соколов [и др.] // *Сталь*. – 1999. - № 5. – С. 39-42.
57. Суворов С.А., Козлов В.В. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футерівки конвертера и ресурс эксплуатации / С.А. Суворов, В.В. Козлов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2009. - №7-8. - С. 3-6.
58. Кожухов А.А. Исследование влияния вязкости и температуры плавления конвертерного шлака на его вспенивание / А.А. Кожухов // *Сталь*. – 2014. - № 2. – С. 15-18.
59. Grasjean J.C., Riboud P.V. Consistance des laitiers de convertisseurs et tartinage // *Revue de Metallurgie*. - 1983. - V. 80, № 7. - P. 571-584.
60. Хорошавин Л.Б. *Магнезиальные огнеупоры: справ. изд.* / Л.Б. Хорошавин, В.А. Перепелицын, В.А. Кононов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 576 с.
61. Шлаковая коррозия периклазоуглеродистого огнеупора в футеровке кислородного конвертера / С.А. Суворов, В.В. Козлов // *Новые огнеупоры*. – 2013. - № 3. – С. 89-96.

62. Процессы теплообмена в условиях нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки конвертеров. Математическая модель / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, В.В. Соколов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – №10. – С.8-13.
63. Динамика теплового состояния футеровки и шлакового гарнисажа при раздувке конечного шлака в кислородном конвертере / Р.В. Лисняк, И.С. Долгополов, Е.Н. Сигарев [и др.] // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Випуск 4. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2012. – С. 156-165.
64. Численное исследование гидродинамических процессов в полости конвертера при продувке шлакового расплава азотом через фурму с двухрядным расположением сопел / Е.В. Протопопов, В.В. Соколов, А.Г. Чернятевич [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 12. – С. 15–19.
65. Influence of the Slag Density on the Splashing Process in a Steelmaking Converter / Miguel A., Dulce Y., Hilerio I., Plascencia G. // ISRN Metallurgy. – 2014, V.1. Article 525706, 6 pages.
66. Патент № 96392 Україна. Верхня фурма для роздувки шлака і спосіб відновлення футерівки конвертера з її застосуванням / Пантейков С.П., Учитель Л.М., Махлай Ю.П., Моцний В.В. – Заявка а201012620. Дата подан. 25.10.2010. – опубл. 25.10.2011, бюл. №20.
67. Патент РФ 2111262 С21С5/44 Способ восстановления футеровки конвертера в горячем состоянии и устройство для его осуществления / Шатохин И.М., Кузьмин А.Л. Заявл. 25.11.1997, опубл. 20.05.1998.
68. Освоение комплекса технологических приемов повышения стойкости футеровки конвертеров при переделе углеродистого полупродукта в сталь / А.А. Бабенко, Л.Ю. Кривых, В.В. Левчук [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. - № 2. – С. 37-41.
69. Комбинированная фурма для восстановления футеровки конвертера /А. Н. Лаврик, Е. В. Протопопов, В. В. Соколов [и др.] // Металлургия России на рубеже XXI века: Сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции, СибГИУ.– Новокузнецк, 2005.–Т.2.– С. 291–295.
70. Разработка и внедрение инновационной технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / А. Г. Чернятевич, В. А. Шеремет, Е. Н. Сигарев [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2009. – №3. – С. 64–71.
71. Разработка конструкций фурменных устройств для горячего ремонта футерівки конвертеров / А. Г. Чернятевич, Е. В. Протопопов, Е. Н. Сигарев [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2010. – №1–2. – С. 68–73.

72. Патент України № 74235, С21С 5/48 . Фурма для нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера / Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Чубін К.І., Мальцев В.Г. // опубл. бюл. №20, 2012 р.
73. Патент України № 103410. Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера та фурма для його здійснення / Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Чубін К.І., Чубіна О.А., заявл. 19.03.2012, опубл. 10.10.2013, Бюл. №19.
74. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии.- М.: Металлургия, 1984.- 119 с.
75. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Недбайло Н.Н. Особенности гидрогазодинамики раздувки двухъярусной фурмой / Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Недбайло Н.Н. // Сб. трудов ДГТУ (технические науки). – 2013. – № 3(23). - С. 13-21.
76. Сігарьов Є.М. Моделювання ошлакування футерівки конвертера із комбінованим продуванням // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки) - Дніпродзержинськ: ДДТУ, вип. 1 (18). - 2012. – С. 15-20.
77. Патент України №130174. Гарнісажна фурма із змінним розташуванням ярусів / Сігарьов Є.М., Пантейков С.П., Недбайло М.М., Байдуж Ю.В., Чубін К.І. Дата подання 05.06.2018, дата, з якої чинні права 26.11.2018, публ. відом. 26.11.2018, Бюл. № 22.
78. Двухъярусная гарнисажная фурма для конвертера ПАО «ДМКД» / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, Д.А. Семенова [и др.] // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету (технічні науки) - Дніпродзержинськ: ДДТУ – 2014, вип. 2(25). – С. 9-16.
79. До розрахунку параметрів роздування шлаку на футерівку / Є.М. Сигарев, Ю.В. Байдуж, І.В. Чернятевич [та ін.] // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки) - Дніпродзержинськ: ДДТУ — 2016, вип.1 (28). – С. 3-10.
80. Кошевник А.Ю. Измерение поверхностного натяжения по размерам лежащей капли / А.Ю. Кошевник, М.М. Кусанов, Н.М. Лубман // Журнал физической химии. – 1953. – Т. XXVII, вып. 12. – С. 1887-1890.
81. Топографирование поверхности футеровки конвертера / Е.Н. Сигарев, Н.К. Сигарев, Д.А. Семенова, Ю.В. Байдуж // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки) - Дніпродзержинськ: ДДТУ – 2015, вип. 1(26). – С. 19-24.
82. Оценка состояния футеровки 160-т конвертеров с применением лазерной системы контроля / Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, И.В. Чернятевич [и др.] // Теория и практика металлургии - 2014. - № 1,2. – С. 27-32.

83. Гидрогазодинамические закономерности нанесения шлакового гарнисажа в конвертере с комбинированной продувкой / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, В.С. Сотниченко // Международная научно-техническая конференция "Университетская наука-2014". Сб. тезисов докладов в 4-х т. - Мариуполь: ПГТУ, 2014. - 228 с. - Т. II. – С. 56.
84. Експериментальне та чисельне моделювання роздувки шлаку з застосуванням двоярусної фурми / М.М. Недбайло, Є.М. Сігарьов, Ю.В. Байдуж // Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки) – Кам'янське: ДДТУ – 2018, вип. 1(32). – С. 15-20.
85. Чернятевич А.Г. Гидрогазодинамические закономерности нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, Е.А. Чубина // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3–4. – С. 45–47.
86. Моделювання гідрогазодинамічних та теплофізичних параметрів нанесення шлакового гарнісажу і торкрет-покриття на футерівку конвертера / А.Г. Чернятевич, С.Є. Самохвалов, Є.М. Сігарьов [та ін.] // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1–2 (74–75). – С. 82–89.
87. Сигарев Е.Н. Совершенствование способа формирования защитного гарнисажа на футеровке конвертера / Е. Н. Сигарев // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки) – Вип. 1(14). – 2010.– С. 15–20.
88. Недбайло М.М. Коригування робочого профілю конвертера / М.М. Недбайло, Є.М. Сігарьов // Университетская наука – 2018: Междунар. научно-техн. конф. : тез. докл. : в 3 т. Т. 1 : факультеты: металлургический, энергетический / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь : ПГТУ, 2018. – 319 с. – С. 47-48.
89. Совершенствование конструкции гарнисажной фурмы и технологии восстановления профиля рабочего пространства конвертера / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, М.А. Кашеев, Ю.В. Байдуж // Металл и литье Украины. – 2018. - № 9-10.– С. 21-28.
90. Багатоярусна гарнісажна фурма з розділеним потоком / М.М. Недбайло, Є.М. Сігарьов, Ю.В. Байдуж // Международный научный журнал International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus - Special number. (XIII International Conference «Stategy of Quality in Industry and Education», June 5 – 8, 2017), Varna, Bulgaria. - 2017.– P. 167-172.
91. Сигарев Е.Н. Компьютерное моделирование нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера при изменении положения фурмы / Е.Н. Сигарев, А.Н. Сокол, Н.Н. Недбайло // Математичне моделювання. - 2015. - №1(32). - С.56-58.

92. Математична модель гідродинаміки процесу продувки шлакової ванни у порожнині конвертера / А.Г. Чернятевич, О.С. Самохвалов, Є.М. Сігарьов, О.А. Чубіна // Математичне моделювання. – 2005. - №1(13). - С. 76-78.
93. Лисняк Р. В. Физико-технологические процессы взаимодействия газовых и газопорошковых струй со шлаковой ванной во время нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородного конвертера / Р.В. Лисняк, И.С. Долгополов, Е.Н. Сигарев // Теория и практика металлургии. - 2012. - № 5/6. - С. 41-45.
94. Определение параметров раздувки шлаковой ванны на футеровку конвертера / Е.Н. Сигарев, К.Г. Низяев, Н.К. Сигарев, Н.Н. Недбайло, Ю.В. Байдуж // Металлургическая и горнорудная промышленность. — №3. — 2016.— С. 31—36.
95. Соколов В.В. Теоретическое обоснование технологии нанесения шлакового гарнисажа на поверхность футеровки кислородного конвертера. / В.В. Соколов, Е.В. Протопопов, К.Н. Шакиров // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. - № 6. – С. 15-18.
96. Сигарев Е.Н. Модернизация гарнисажной фурмы для ошлакования футеровки / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, Р.В. Борщевский // Сборник трудов ДГТУ (технические науки), вып. 1(24). – 2014. - С. 7-13.
97. Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж – футеровка» с учетом неравномерности её толщины / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, А.Н. Сокол, Н.Н. Недбайло // Математичне моделювання. — 2016. - №2 (35). – С. 70—73.
98. Сігарьов Є.М. Моделювання нанесення шлакового гарнісажу з метою оптимізації процесів гарячого ремонту футерівки конвертера / Є.М. Сігарьов, А.Г. Чернятевич, А.М. Сокол // Математичне моделювання – 2011. - № 2 (25). - С.116-119.
99. Сигарев Е.Н. Численное исследование раздувки шлаковой ванны газовыми и газопорошковыми струями / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, Д.А. Семенова // Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво. Міжнародна конференція (28-29 квітня 2015 р.), Дніпропетровськ, Україна: матеріали [уклад: В.П. Іващенко, Ю.О. Ступак]. - Дніпропетровськ: Герда, 2015. – С. 107 -113.
100. Сигарев Е.Н. Моделирование динамики формирования гарнисажного слоя / Е.Н. Сигарев, А.Н. Сокол, Н.Н. Недбайло, Д.А. Семенова // Международный научный журнал International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2015. - Special number. (XI International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», June 1-5, 2015). - Varna, Bulgaria. – P.148-150.

101. Владимирова Л.П. Термодинамические расчёты равновесия металлургических реакций / М.: изд-во «Металлургия», 1970. - 528 с.
102. Вимоги до периклазовуглецевих вогнетривів для футеровки конвертерів й особливості сталеплавильної технології за їх використання / О.Г. Величко, Б.М. Бойченко, М.М. Мазов [та ін.] // Теорія і практика металургії. – 2018. - № 6. - С. 22-33.
103. Двухъярусная гарнисажная фурма для конвертера ПАО «ДМКД» / Е.Н. Сигарев, Н.Н. Недбайло, Д.А. Семенова, И.В. Чернятевич // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки) - Дніпродзержинськ: ДДТУ, вип. 2(25). - 2014. – С. 9-16.
104. Патент України №129813. Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертерів комбінованого дуття / Сігарьов Є.М., Пантейков С.П., Недбайло М.М., Байдуж Ю.В., Чубіна О.А. // Дніпровський державний технічний університет. – Дата подання 29.05.2018, дата, з якої чинні права 12.11.2018, публ. відом. 12.11.2018, Бюл. №21.
105. 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. – С. 1-8.
106. Kishimoto Y. Development and prospect of combined blowing converter in Japan / Y. Kishimoto, N. Saito // Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan». – 2014. – V. 100. – № 4. – P. 445-455.
107. Повышение стойкости футеровки конвертеров путем ее ошлакования / Р.В. Старов, Г.Ф. Боровиков, Г.А. Шаповал [и др.] // Труды первого конгресса сталеплавильщиков. – М. : Черметинформация, 1992. – С. 99-100.
108. 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) - Дніпродзержинськ: ДДТУ, вип. 1(26). - 2015. – С. 3-10.
109. Чернятевич А. Г. Вопросы совершенствования технологического маршрута производства кислородно-конвертерной стали / А. Г. Чернятевич // ОАО «Черметинформация»: Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – № 4. – С. 56-61.
110. Энергосберегающая технология нанесения шлакового гарнисажа и выплавки конвертерной стали / П.И. Югов, В.В. Соколов, А.Б. Юрьев [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2002. – № 12. – С. 24-27.
111. Охотский В.Б. Гидродинамика набрызгивания шлака на футеровку конвертера / В.Б. Охотский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. - №7. – С.89-91.
112. Совершенствование методов контроля за эксплуатацией футеровки

- конвертера / О.Б. Воронина, В.Г. Овсянников, Э.В. Дюльдина // Известия Челябинского научного центра. – 2003, вып. 1(18). - С. 32-38.
113. Методы исследования характера износа огнеупорных футеровок конвертеров / Х.В. Гуденау, Х. Нефе, Р. Хёффкен [и др.] // Черные металлы. - 1997. - № 5. - С. 23-29.
114. Ламм Р., Винтъенс П. Использование технологии трехразмерного лазерного сканирования в качестве технологического инструмента в конвертерном цехе // Труды восьмого конгресса сталеплавателей (г. Нижний Тагил, 18-22 октября 2004 г.). - М: ОАО «Черметинформация». – 2005. - С. 97-102.
115. Технологии ошлакования футеровки конвертеров / Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, А.Г. Чернятевич // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1997. - № 4. – С. 14-17.
116. Гребенникова Н.М., Мордасов М.М. // Вестник ТГТУ. - 2005. - Т.11. - №1А. - С. 81–87.
117. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1979. - 536 с.
118. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Изд. 4-е, перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1982. - 672 с.
119. Недбайло М.М. Напрямки удосконалення конструкції гарнісажної футерівки / М.М. Недбайло, Є.М. Сігарьов, О.А. Чубіна // Металургія. 2018 : Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (22-24 травня 2018 р., м. Запоріжжя) [Під заг. ред. д.т.н., проф. О.І. Пономаренко]. – Запоріжжя : ФОП Систерова Н.О. - 2018. – 328 с. – С. 281-283.
120. Новые технологические режимы нанесения шлакового гарнисажа на футерівку конвертера / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, И.В. Чернятевич [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2011. - № 5-6. Ч.II (83-83).- С.19-27.
121. Application of slag coating to the converter lining by means of moving gas-powder jets / A.G. Chernyatevich, E.N. Sigarev, E.V. Protopopov [a. o.] // Steel in Translation. – 2011. - Vol. 41, № 2. - pp. 94-98.

ДОДАТОК А



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор технічний

ПАТ «Дніпровський меткомбінат»

Волошин Ю.А.

2018 р.

АКТ

про впровадження на ПАТ «Дніпровський меткомбінат» результатів
дисертаційної роботи Недбайло Миколи Миколайовича
**«Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення
шлакового гарнісажу на футеровку конвертера»**

Цим актом підтверджуємо впровадження в умовах роботи 250-т конвертерів ПАТ «Дніпровський меткомбінат» розробленої у дисертаційній роботі Недбайло М.М. технології нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертерних агрегатів, що передбачає нанесення на периклазовуглецеву футеровку конвертера шлакового гарнісажу із застосуванням удосконаленої конструкції гарнісажної фурми, яка забезпечує роздування кінцевого шлаку азотом:

- скрізь 6-ть торцевих сопел Лаваля із витратою 600-800 м³/хвил.;
- скрізь 4-ри циліндрових сопла другого ярусу, які розміщені на відстані 2000-2500 мм від зрізу торця фурми під кутом 115° до поверхні ванни, з витратою азоту 100-130 м³/хвил.

Отримані у дисертаційній роботі наукові результати використані для розробки:

- конструкції гарнісажної 6-ти соплової фурми із додаванням другого ярусу з 4-х циліндрових сопел, які розміщені на відстані 2000-2500 мм від зрізу торця фурми та орієнтовані під кутом 115° до поверхні ванни;

– нової технології нанесення шлакового гарнісажу на футеровку із можливістю коригування профілю робочого простору агрегату по ходу кампанії з застосуванням гарнісажної фурми з двоярусним розміщенням сопел.

При впровадженні наведених вище розробок досягнуто ресурсо- та енергозберігаючого ефектів за рахунок:

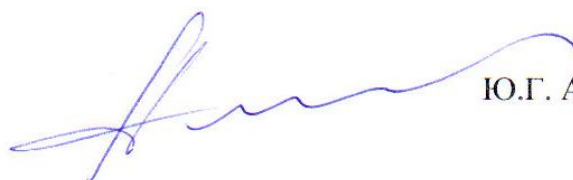
– підвищення продуктивності конвертерів внаслідок зменшення тривалості поточних простоїв на гарячий ремонт футеровки конвертерів на 1,35%;

– підвищення стійкості футеровки конвертерів на 9,5%;

– зменшення витрат вогнетривких матеріалів, які використовуються для гарячого ремонту футеровки конвертерів на 6,01%.

Впровадження розроблених у дисертаційній роботі конструкції двоярусної гарнісажної фурми та технологічних рекомендацій по нанесенню шлакового гарнісажу на футеровку конвертера дозволило в умовах роботи конвертерного цеху отримати сумарний економічний ефект за 2016 рік у розмірі 1694223,44 грн. (1,96 грн./т сталі) у тому числі, із долевою часткою автора дисертації 35 % або 592978,2 грн. (0,69 грн./т сталі).

Начальник
технічного управління



Ю.Г. Антонов

Т.в.о. начальника
конвертерного цеху



Д.В. Єськов



ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор технічний

ПАТ «Дніпровський меткомбінат»

Волошин Ю.А.

« » 2018 р.

Розрахунок економічної ефективності
 від використання результатів дисертаційної роботи
 Недбайло Миколи Миколайовича
«Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення
шлакового гарнісажу на футеровку конвертера»
 у промислових умовах

Для оцінки економічної ефективності обрані 2 кампанії експлуатації футеровок на конвертері №1: базова з 10.03.2015 р. до 06.12.2015 р. та порівняльна з 27.01.2016 р. до 05.12.2016 р. (період використання розробок дисертаційної роботи Недбайло М.М.)

Розрахунок економічної ефективності промислового використання розробленої у дисертаційній роботі Недбайло М.М. двоярусної гарнісажної фурми та технології нанесення шлакового гарнісажу на футеровку агрегату виконаний з врахуванням зміни питомих витрат на футеровку.

Питомі витрати на футеровку конвертера
у базовий період склали – 1,054 \$/т.

Питомі витрати на футеровку конвертера
у порівняльний період склали – 0,978 \$/т.

Економічний ефект від використання двоярусної гарнісажної фурми та розробленої технології нанесення шлакового гарнісажу склав:

$(1,054 - 0,978) \cdot 862209,0 \cdot 25,855 = 1694223,44$ грн. або 1,96 грн/т,
де 862209,0 – виробництво сталі на конвертері №1 у 2016 р., т;
25,855 – фактичний курс 1\$ США у квітні 2018 р., грн.

Фінансових обов'язків за даним актом ПАТ «Дніпровський меткомбінат» не несе.

Начальник
технічного управління

Ю.Г. Антонов

Т.в.о. начальника
конвертерного цеху

Д.В. Єськов

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор
Дніпровського державного
технічного університету
докт. техн. наук, професор

 В.М. Гуляєв
« 17 » 06 2020 р.

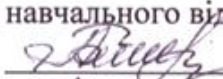
АКТ


впровадження основних результатів дисертаційної роботи здобувача Недбайла Миколи Миколайовича на тему «Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертера» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» у навчальний процес та науково-дослідницьку діяльність кафедри металургії чорних металів ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету

Ми, що підписалися, завідувач кафедри металургії чорних металів ім. професора В.І. Логінова, д.т.н., професор Сігарьов Є.М. та начальник навчального відділу університету Добрик Л.О. склали цей акт про те, що окремі положення дисертаційної роботи Недбайла М.М. на тему «Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертера» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» використано:

1. *У навчальному процесі:* результати дослідження гідрогазодинамічних закономірностей роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням, методи коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни й розподілу газшлакових потоків у робочому просторі агрегату та нові технологічні рішення, які захищені патентами України, використовуються в курсах лекцій, на практичних заняттях з дисциплін «Технології ресурсозбереження в металургії», «Техніка високотемпературного експерименту» та при виконанні здобувачами вищої освіти рівня «бакалавр» випускних кваліфікаційних робіт за напрямом підготовки 136 – «Металургія» та випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 136.1 – «Металургія чорних металів».

2. У науково-дослідницькій діяльності: дисертація Недбайла М.М. пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт «Розробка нової ресурсо- та енергоефективної технології продувки конвертерної ванни і ошлакування футерівки агрегату в сировинних умовах України (№ держ. реєстрації 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» (договір № 19-0282-02 від 20.03.2019 р.).

Начальник
навчального відділу
 Л.О. Добрик
«14» 06 2020 р.

Завідувач кафедри металургії
чорних металів, д.т.н., професор
 Є.М. Сігарьов
«17» 06 2020 р.

СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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. (**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. Кашеев, Ю.В. Байдуж // *Металл и литье Украины*. - 2018. - № 9-10. - С. 21-28. (**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. (**Academic Resource Index Research Bib, Google Scholar**).

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Сигарев Е.Н. Особенности гидродинамики 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 на корисні моделі:

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. Сигарев Е.Н. 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.Камянське). - 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 І. – 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. **Недбайло М.М.**, Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С. Коригування крайового кута змочування поверхні вогнетриву первинним конвертерним шлаком // Monografia pokonferencyjna “SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. №34” (Paris), 29.09.2020 - 30.09.2020).– Warszawa: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2020.– Str. 22-24.