

Б. В. Корнілов, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023

О. Л. Чайка, к.т.н., с.н.с., зав. лаб., ORCID 0000-0003-1678-2580

В. В. Лебідь, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-3938-3785

Є. І. Шумельчик, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5350-6425

А. О. Москалина, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ГОРНУ ТА ПОДУ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ УКРАЇНИ РІЗНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Анотація. Метою роботи є дослідження сучасних шляхів підвищення експлуатаційної надійності горна та поду доменних печей, які значною мірою визначають тривалість кампанії доменної печі. В статті виконано аналіз способів підвищення стійкості горну і поду, наведено результати аналізу теплової роботи та розпалу футерівки металоприймачів доменних печей різної конструкції. Визначено сучасні напрямки конструювання металоприймача доменних печей. Показано, що сучасна методологія конструювання горнів доменних печей розробляє два основних напрямки: використання узгодженої комбінації вогнетривких матеріалів із системою охолодження; використання комбінації зносостійких матеріалів на основі вуглецю та кераміки. Однак, навіть вдосконалення конструкції та системи охолодження металоприймача не дозволяє повною мірою забезпечити збільшення тривалості кампанії. Для оцінки ресурсу роботи печі необхідним є забезпечення регулярного автоматизованого контролю розпалу футерівки горну та поду.

В Україні при відновлювальних ремонтах доменних печей було віддано перевагу конструкції металоприймачів із застосуванням «керамічного стакану». На сьогоднішній день системи моніторингу теплової роботи та розпалу горна впроваджено на 10 доменних печах з використанням розробленої ІЧМ НАНУ системи автоматичного контролю «Горн». Реалізація безперервного контролю над розпалом горну на доменних печах дозволила оцінити ефект застосування керамічного стакану. Оцінено величину теплових втрат горну та витрати коксу на їх компенсацію. Розроблено методику і моделі визначення теплового стану та зносу футерівки металоприймача на базі комбінування калориметричного та термометричного методів контролю. Зіставлення теплових втрат металоприймача в системі охолодження доменних печей дозволяє кількісно оцінювати теплову роботу контрольованих зон та печі в цілому. Показано, що питома величина теплових втрат металоприймача на одиницю об'єму доменної печі може слугувати інтегральним параметром. Встановлено, що величина питомих теплових втрат на одиницю об'єму доменної печі з керамічним стаканом складає $\sim 0,4-0,7$ кВт/м³, що значно менше, ніж доменних печах без нього ($\sim 0,9-1,1$ кВт/м³). Керамічний стакан дає економію коксу близько 1 кг/т чавуну.

Ключові слова: металоприймач, моніторинг, теплові втрати, «керамічний стакан», витрата коксу.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35

«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

Посилання для цитування: Корнілов Б. В., Чайка О. Л., Лебідь В. В., Шумельчик С. І., Москалина А. О. Аналіз теплової роботи горну та поду доменних печей України різної конструкції. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 55-68. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-55-68

Сучасний стан проблеми. Металоприймач є зоною доменної печі, футерування якого зазнає хімічного, механічного впливу внаслідок відновлення заліза та формування кінцевого шлаку, високих температур та руху розплавів. Саме стан горна та поду значною мірою визначає тривалість кампанії доменної печі. Збільшення стійкості та експлуатаційної надійності горна та поду сучасних доменних печей є актуальним завданням. Питання підвищення експлуатаційної надійності горна та продовження кампанії доменних печей вирішуються шляхом [1-5]:

- удосконаленням конструкцій горна та поду доменних печей, застосуванням нових вогнетривких матеріалів, що забезпечують надійність роботи доменної печі;

- вибором надійної системи чи вдосконаленням існуючої системи охолодження металоприймача;

- використання сучасних АСУ ТП, що мають у своєму складі підсистему контролю розпалу футерівки горна та поду.

Сучасний напрямок у конструюванні металоприймача доменних печей базується в основному на наступному [3, 6]:

- збільшення висоти горна;

- збільшення висоти мертвого шару (глибини зумпфа);

- зменшення товщини поду;

- зменшення товщини стін горна;

- використання для футерування горна і ляща нових поколінь вогнетривких матеріалів.

У сучасній методології конструкції горнів доменних печей розробляються два основних напрямки (рис. 1) [7, 8]:

- «термічний» підхід - спроба ув'язати комбінацію вогнетривких матеріалів із системою охолодження, використання матеріалів з високими теплопровідними властивостями на основі графіту, напівграфіту та вуглецю;

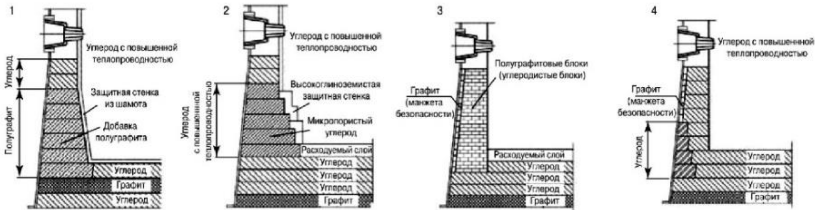
- «Вогнетривкий» підхід - використання комбінації зносостійких матеріалів на основі вуглецю та кераміки («керамічний стакан»).

В Україні при відновлювальних ремонтах доменних печей було віддано перевагу конструкції металоприймачів із застосуванням «керамічного стакану».

Примеры «термической» футеровки

Схемы конструктивных решений «термической» футеровки

Конструктивные схемы термической футеровки с манжетой безопасности



Примеры «керамической» футеровки

Схемы конструктивных решений «керамической» футеровки

Конструктивные схемы футеровки с керамическими манжетами

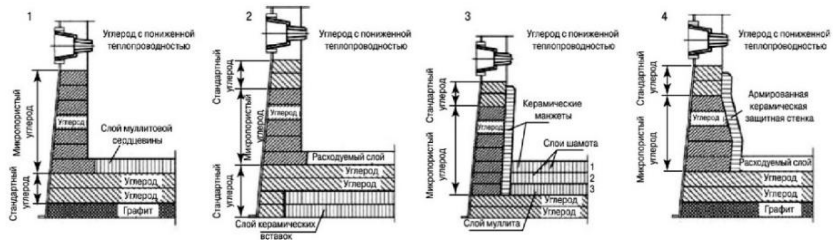


Рисунок 1 – Приклады різних варіантів «термічної» та «керамічної» футерівки [8].

Вперше доменна піч з таким дизайном горну була виконана у 2008 р. на ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» на ДП №8 та успішно функціонувала до видування в 2019 році. Через 11 років експлуатації «керамічний стакан», реалізований компанією «Saint-Gobain», зберігся в поді (рис. 2). Надалі конструкція металоприймача з керамічним стаканом успішно застосовувалась на ДП №3 ПрАТ «Єнакіївський металургійний завод», ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь», ДП №3 та ДП №4 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ».

Однак, навіть вдосконалення конструкції та системи охолодження металоприймача не дозволяє повною мірою забезпечити збільшення тривалості кампанії без забезпечення регулярного, а переважно – автоматизованого контролю розпалу футерівки горну та поду для оцінки ресурсу роботи печі. На даний момент у світовій практиці використовуються такі основні методи контролю залишкової товщини футерівки [9-15]:

1. буріння кернів;
2. калориметричний (визначення теплових навантажень системи охолодження металоприймача);

3. термометричний (визначення температури кладки металопріймача);
4. ультразвуковий (визначення часу проходження та відображення ультразвукових коливань від внутрішньої поверхні кладки металопріймача).



Рисунок 2 – Фотокадр залишків керамічного стакану «Saint-Gobain» на рівні 8-го ряду вуглецевих блоків ДП №8 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг».

Інші методи, такі як метод радіоактивних ізотопів, електротехнічний метод, заснований на розриві електроланцюжка при розпалі футерівки, електромагнітний метод та інші, не отримали істотного розвитку в доменному виробництві через небезпеки пов'язані з підвищеною радіоактивністю (ізотопний метод), і з труднощами в технічному виконанні та достовірністю отриманих результатів [11]. Кожен із зазначених методів має відмінні переваги та недоліки (табл. 1).

Таблиця 1 – Переваги та недоліки різних методів контролю за станом металопріймача.

Метод контролю	Переваги	Недоліки
Буріння кернів	Дозволяє отримати найбільш точну інформацію про стан та залишкову товщину футеровки та товщину гарнісажу.	1. Порушення цілісності броні, футерівки та захисного шару гарнісажу; 2. можливість проводити дослідження лише на тривалих зупинках печей, відповідно, маючи велику періодичність вимірів; 3. відсутність можливості оперативного впливу на процес руйнування футерівки та утворення гарнісажу.

Продовження табл. 1

Метод контролю	Переваги	Недоліки
Калориметричний	1. Вимірюваний тепловий потік дає теплові втрати з поверхні холодильника або групи холодильників; 2. контроль за кожним холодильником системи охолодження дозволяє повністю контролювати тепловий стан горна та поду; - забезпечується визначення локальних ділянок з підвищеними тепловими навантаженнями, а також ступеня заростання або засмічення трубок холодильників.	1. Розрахунок залишкової товщини футерування за тепловими навантаженнями дає усереднену товщину кладки по всій поверхні холодильника; 2. дискретність та трудомісткість визначення теплових навантажень вимірюваних вручну, у разі відсутності автоматизованого контролю перепадів температур та витрат охолоджувача.
Термометричний	Можливість визначення в автоматичному режимі температури кладки, її зміни за висотою, периметром та товщиною стінок металопримача доменної печі.	Складність визначення ділянок локального зносу футерівки металопримача, не контрольованих термопарами.
Ультразвуковий	1. Можливість проведення експрес-аналізу діагностики стану горна та поду з будь-якого доступного місця робочого майданчика металопримача; 2. достатню точність вимірів; 3. можливість визначення фізико-механічних параметрів футерівки (наявність і параметри тріщин, тріщинуватість (кількість тріщин на одиницю площі).	1. Висока вартість устаткування; 2. високі вимоги до якості установки; 3. необхідність проведення великої кількості вимірів; 4. складність в організації та здійсненні вимірювань в автоматичному режимі.

Основні результати дослідження. Проведений короткий аналіз показує, що на сьогоднішній день не існує універсального методу, що дозволяє однозначно визначати характер розпалу та утворення гарнісажу в металопримачі доменної печі [15].

В напрямку автоматизованого контролю залишкової товщини кладки та гарнісажу горна та поду доменної печі ІЧМ НАНУ веде постійні розробки. На сьогоднішній день системи моніторингу теплової роботи та розпалу горна впроваджено на 10 доменних печах (САК «Горн») [16-18].

Відеокадри САК «Горн» реалізованої на ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь» наведено рис. 3.

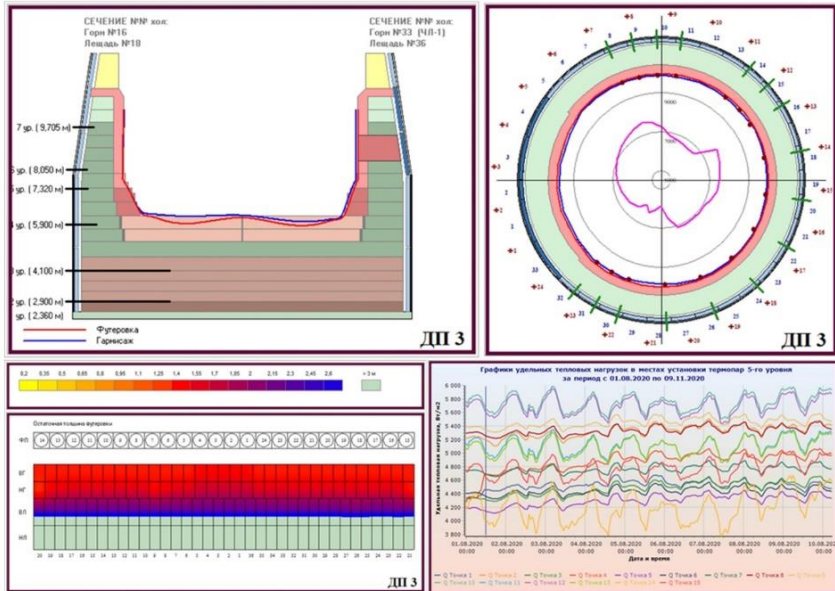


Рисунок 3 – Відеокадри системи контролю розпаду футерівки та утворення гарнісажу в горні та поді на ДП №3 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ» реалізованої в 2019-2020 рр.

В моделі здійснено підхід, за розробленою в ІЧМ методикою визначення теплового стану та зносу футерівки металоприймача на базі комбінування калориметричного та термометричного методів контролю. Це дозволяє більш якісно визначати стан футерівки та утворення гарнісажу в металоприймачі, що дозволяє технологам не тільки контролювати в автоматизованому режимі стан системи охолодження, але й впливати на процес зносу футерівки та гарнісажутворення.

Для оцінки впливу конструкційних рішень на стан футерівки (швидкість її зносу та теплові навантаження) виконано аналіз теплової роботи п'яти доменних печей України різної конструкції металоприймача за інформацією САК «Горн»:

1) ДП №8 ПАТ «Арселор Мітал Кривий Ріг» об'ємом 2700 м³ – керамічний стакан Saint-Gobain, система охолодження – технічна вода (ДП-8 АМКР);

2) ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь» об'ємом 1800 м³ – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – хімічно очищена вода (ДП-3 АЗС);

3) ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – технічна вода (ДП-3 ЗпСт);

4) ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – без керамічного стакану; система охолодження – технічна вода (ДП-4 АЗСт);

5) ДП №2 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м³ – без керамічного стакану, система охолодження – технічна вода (ДП-2 ЗпСт).

Встановлено, що великі теплові навантаження спостерігаються на ДП №8 ПАТ «Арселор Міталл Кривий Ріг», що, ймовірно, пов'язано з великим об'ємом печі, і, як наслідок, – великим виробництвом та периметром охолодження металоприймача. У той же час на ДП №8 мав місце найменше зношування футеровки у всіх зонах металоприймача, крім верхнього горна (рис. 4).

Оскільки теплові втрати є інтегральним параметром, що дозволяє якісно та кількісно оцінювати теплову роботу контрольованих зон та печі в цілому, то виконано зіставлення теплових втрат металоприймача в системі охолодження доменних печей, що розглядаються (рис. 5) [19].

Встановлено, що великі теплові втрати ~1,4-1,8 МВт на ДП №8 ПАТ «АМКР», ДП №2 та ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь», менші – ~0,9-1,3 МВт – на ДП №3 «Запоріжсталь» та ДП №3 «МК «Азовсталь».

Однак звичайне зіставлення теплових втрат не дозволяє оцінити вплив конструкції печі на теплову роботу горну та поду через різний об'єм доменних печей і, як наслідок, різного об'єму виробленого чавуну. Тому виконано оцінку питомої величини теплових втрат металоприймача на одиницю об'єму доменної печі (рис. 6).

Величина питомих теплових втрат на одиницю об'єму печі на доменних печах з керамічним стаканом (~0,4-0,7 кВт/м³) значно менше, ніж доменних печах без нього (~0,9-1,1 кВт/м³). Така відмінність між питомими тепловими втратами еквівалентна меншій витраті коксу на компенсацію теплових втрат горна та поду на 0,5-1,1 кг/т на доменних печах з керамічним стаканом (рис. 6).

Таким чином, встановлено, що узагальнюючим параметром порівняння теплової роботи металоприймачів на доменних печах є питомі теплові втрати на одиницю корисного об'єму печі.

Висновки

1. Одним з основних моментів безпеки та забезпечення тривалості кампанії доменної печі є автоматизований контроль у режимі реального часу за тепловим станом системи периферійного охолодження та охолодження поду, контроль температури кладки металоприймача.

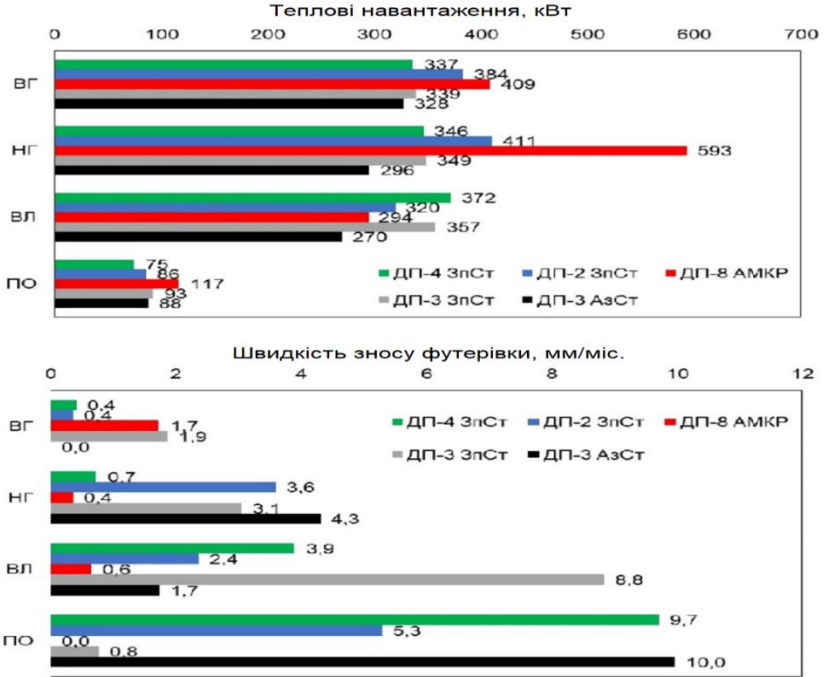


Рисунок 4 – Теплові навантаження та швидкість зносу футерівки на доменних печах України різної конструкції за два роки від задувки.

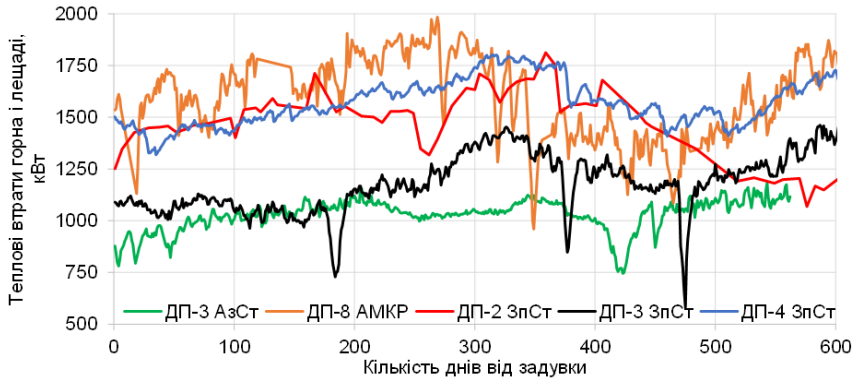


Рисунок 5 – Динаміка теплових втрат горну та поду доменних печей України.

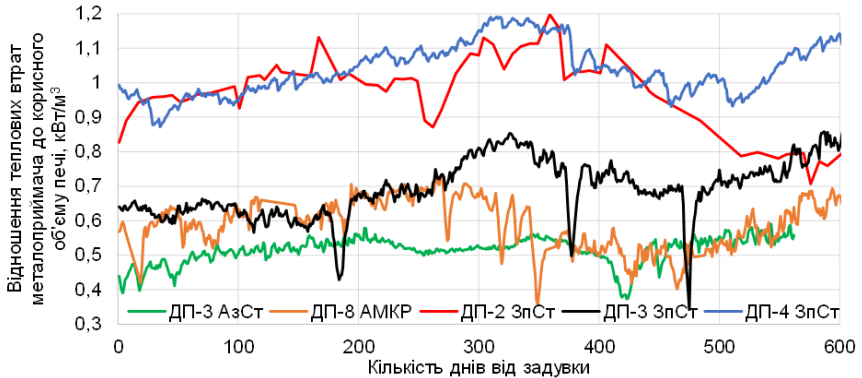


Рисунок 6 – Динаміка питомих теплових втрат горну та поду на одиницю об'єму доменної печі.

2. Метод контролю теплової роботи та розпалу футерівки металоприймача на базі комбінування калориметричного та термометричного методів контролю, запропонований в ІЧМ, ліг в основу системи моніторингу теплової роботи та розпалу футерівки горну та поду – математичної моделі «Горн», яка встановлена більш, ніж на 1 доменних печах.

3. Встановлено, що узагальнюючим параметром порівняння теплової роботи металоприймачів на доменних печах є питомі теплові втрати на одиницю корисного об'єму печі.

4. Реалізація безперервного контролю над розпалом футерівки горну на доменних печах дозволила оцінити ефект застосування керамічного склянки з погляду величини теплових втрат горну. Величина питомих теплових втрат на одиницю об'єму печі на доменних печах з керамічною склянкою ($\sim 0,4-0,7$ кВт/м³) значно менше, ніж доменних печах без нього ($\sim 0,9-1,1$ кВт/м³). Така відмінність між питомими тепловими втратами еквівалентно меншій витраті коксу на компенсацію теплових втрат горну та поду на $0,5-1,1$ кг/т на доменних печах з керамічним стаканом.

Перелік посилань

1. Миттад Й. Прогресс в области огнеупорной футеровки горнов доменных печей. *Сталь*. 2005. № 11. С. 20-22.
2. Петке Ю., Штисович Т., Силвен П. Новая концепция футеровки горна и лещади доменной печи комбината Зальцгиттер Флахшталь. *Сталь*. 2005. № 7. С. 27-31.
3. Ковальски В., Люнген Х. Б., Штриккер К. П. Стойкость доменных печей: современный уровень, развитие и мероприятия по продлению кампании.

- Черные металлы*. 1999. № 9. С. 26-35.
4. Вильмс Э., Янг Й., Люнген Г. Б., Петерс М., Шмеле П. Удлинение кампании доменной печи – факторы, влияющие на стойкость футеровки горна. *Черные металлы*. 1993. № 6. С. 35-48.
 5. Noort N., Ruoff I., Schmidt K., Stolwijk C., Stralen J. V. Modernization and Reline of Hoogovens № 7 Blast Furnace. *Iron and Steel Engineer*. 1994. Vol. 71. № 10. p. 29-34.
 6. Новые концепции в конструкции футеровки и систем охлаждения доменных печей. *Новости черной металлургии за рубежом*. 1997. № 1. С. 19-26.
 7. Stewart H., Titterington B., James E. T. Blast Furnace Hearth Design and Operation for Long Campaign Life. *Proceedings of 3rd Eurp. Iron. Congress, Belgium*. 1996. p.p. 248-256.
 8. Хебель Р., Хилле Ф. Футеровка горна доменной печи и концепция охлаждения. *Черные металлы*. 2008. № 7. С. 39-45.
 9. Большаков В. И., Бородулин А. В., Листопадов В. С., Чайка А. Л., Сохацкий А. А., Швачка А. И. Контроль суммарной величины тепловых потерь с охлаждающей водой на печах доменного цеха и их практическое приложение. Сб. научных трудов *международной научно-практической конференции «Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло»*, посвященная 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло – Екатеринбург, 26-28 марта, 2014. С. 74-80.
 10. Sadri A., Gebski P., Rampersad A., Marinelli P., Doro E. Comparing the accuracy of Acousto Ultrasonic-Echo (NDT), Finite Element Analysis (FEA), and Drilling, when obtaining a blast furnace refractory lining wear profile. *Iron and Steel technology*, 2010, p. 70-81.
 11. Харламов Д. А., Коберник О. П., Ансимов А. А. Методы контроля разгара огнеупорной футеровки в промышленных печах. *Фундаментальные исследования*, 2013. № 6. С. 877-879
 12. Кудинов Г. А. *Охлаждение современных доменных печей*. Москва : Металлургия, 1988. 256 с.
 13. Гаврилов Е. Е., Ульянов А. Г., Канаев В. В., Можаренко Н. М. Диагностирование состояния футеровки металлоприемника доменной печи по тепловым нагрузкам. *Сталь*. 1987. № 1. С. 13-15.
 14. Васильев П. Г., Левченко В. Е., Алпаев Н. Е., Шульга А. В. Ультразвуковой контроль износа футеровки шахты доменной печи. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1992. № 3. С. 3–5.
 15. Пинчук Д. А., Панчоха Г. В., Канаев В. В., Можаренко Н. М. Современные методы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*: Сб. научн. тр., 2005. Вып. 11. С. 247-253.
 16. Панчоха Г. В., Канаев В. В. и др. Система оперативного промышленного контроля состояния износа футеровки металлоприёмника ДП№5 ОАО «Северсталь». *Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы первой международной научно-технической конференции*. г. Череповец. ЧГУ. 1998. С. 18–20.

17. Чайка А. Л., Сохацкий А. А., Панчоха Г. В., Цюпа К. С., Шостак В. Ю., Корнилов Б. В. Совершенствование конструкции шахты и металлоприемника доменных печей при использовании пылеугольного топлива. *Экология и промышленность*. 2014. № 2. С. 28-35.
18. Чайка А. Л., Лебедь В. В., Корнилов Б. В., Шумельчик Е. И., Кариков С. А., Сафонов С. Е. Реализация комплекса моделей длительного и энергосберегающего производства чугуна на доменных печах Украины. *Сталь*. 2021. № 3. С. 15-18 <https://doi.org/10.3103/S0967091221030025>
19. Чайка А. Л., Корнилов Б. В., Лебедь В. В., Набока В. И., Сафонов С. Е., Мандра В. В., Глушенко Е. Л. Автоматизированный контроль тепловых потерь в системе охлаждения и оценка расхода кокса на их компенсацию на доменных печах ПАО «Запорожсталь». *Сталь*. 2020. № 8. С. 11-13.

References

1. Mittad J. (2005). Progress v oblasti ognepurnoj futerovki gornov domennyh pechej [Progress in the field of refractory lining of hearths of blast furnaces]. *Stal [Steel]*, 2005, 11, 20-22 [In Russian].
2. Petke Yu., Shtisovich T., Silven P. (2005). Novaya koncepciya futerovki gorna i leshchadi domennoj pechi kombinata Salzgitter Flachstahl [A new concept of lining of hearth and heart bottom on blast furnace of the Salzgitter Flachstahl plant]. *Stal [Steel]*, 2005, 7, 27-31 [In Russian].
3. Kovalski V., Lyungen H.B., Shtrikker K.P. (1999). Stojkost domennyh pechej: sovremennyj uroven, razvitiye i meropriyatiya po prodleniyu kampanii [Blast Furnace Sustainability: State of the Art, Development and Campaign Extension Measures]. *Chernye metally [Ferrous metals]*, 1999, 9, 26-35 [In Russian].
4. Vilms E., Yang J., Lyungen G.B., Peters M., Shmele P. (1993). Udlineniye kampanii domennoj pechi – faktory, vliyayushchie na stojkost futerovki gorna [Elongation of the blast furnace campaign - factors affecting the durability of the hearth lining]. *Chernye metally [Ferrous metals]*, 1993, 6, 35-48 [In Russian].
5. Noort N., Ruoff J., Schmidt K., Stolwijk C., Stralen J.V. (1994). Modernization and Reline of Hoogovens № 7 Blast Furnace. *Iron and Steel Engineer*, 1994, 71 (10), 29-34.
6. Novye koncepcii v konstrukcii futerovki i sistem ohlazhdeniya domennyh pechej [New concepts in the design of lining and cooling systems for blast furnaces]. (1997). *Novosti chernoj metallurgii za rubezhom [News of ferrous metallurgy]*, 1997, 1, 19-26 [In Russian].
7. Stewart H., Titterington B., James E.T. (1996). Blast Furnace Hearth Design and Operation for Long Campaign Life. *Proceedings of 3rd Eurp. Iron. Congress*, Belgium. p.p. 248-256.
8. Hebel R., Hille F. (2008). Futerovka gorna domennoj pechi i koncepciya ohlazhdeniya [Blast furnace hearth lining and cooling concepts]. *Chernye metally [Ferrous metals]*, 2008, 7, 39-45 [In Russian].
9. Bolshakov V.I., Borodulin A.V., Listopadov V.S., CHajka A.L., Sohackij A.A., Shvachka A.I. (2014). Kontrol summarnoj velichiny teplovyh poter s ohlazhdayushchej vodoj na pechah domennogo cekha i ih prakticheskoe prilozhenie

- [Control of the total value of heat losses with cooling water in the furnaces of the blast furnace and their practical application]. Sb. nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Tvorcheskoe nasledie V. E. Grum-Grzhimajlo», posvyashchennaya 150-letiyu so dnya rozhdeniya Vladimira Efimovicha Grum-Grzhimajlo» [*Proceedings of the international scientific-practical conference "Creative heritage of V.E. Grum-Grzhimailo", dedicated to the 150th anniversary of the birth of Vladimir Efimovich Grum-Grzhimailo*]. Ekaterinburg: 26-28 marta. (p.p. 74-80) [In Russian].
10. Sadri A., Gebksi P., Rampasad A., Marinelli P., Doro E. (2010). Comparing the accuracy of Acousto Ultrasonic-Echo (NDT), Finite Element Analysis (FEA), and Drilling, when obtaining a blast furnace refractory lining wear profile. *Iron and Steel technology*, 2010, 70-81.
 11. Harlamov D.A., Kobernik O.P., Ansimov A.A. (2013). Metody kontrolya razgara ognepornoj futerovki v promyshlennyh pechah [Methods for Controlling the Rise of a Refractory Lining in Industrial Furnaces]. *Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2013, 6, 877-879 [In Russian].
 12. Kudinov G.A. (1988). Ohlazhdenie sovremennyh domennyh pechej [Cooling of modern blast furnaces]. Moskva: Metallurgiya. 1988. 256 [In Russian].
 13. Gavrillov E.E., Ulyanov A.G., Kanaev V.V., Mozharenko N.M. (1987). Diagnostirovanie sostoyaniya futerovki metallopriemnika domennoj pechi po teplovym nagruzkam [Diagnosis of the condition of the lining of the metal receiver of a blast furnace by thermal loads]. *Stal [Steel]*, 1987, 1, 13-15 [In Russian].
 14. Vasilev P.G., Levchenko V.E., Alpaev N.E., Shulga A.V. (1992). Ultrazvukovoj kontrol iznosa futerovki shahty domennoj pechi [Ultrasonic monitoring of blast-furnace shaft lining wear]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 1992, 3, 3-5 [In Russian].
 15. Pinchuk D.A., Panchoha G.V., Kanaev V.V., Mozharenko N.M. (2005). Sovremennyye metody kontrolya ostatocnoy tolshchiny futerovki metallopriemnika domennoj pechi [Modern methods of controlling the residual thickness of the lining of the metal receiver of a blast furnace]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2005, 11, 247-253 [In Russian].
 16. Panchoha G.V., Kanaev V.V. et al. (1998). Sistema operativnogo promyshlennogo kontrolya sostoyaniya iznosa futerovki metallopriemnika DP№5 OAO «Severstal» [The system of operational industrial monitoring of the wear of the lining of the metal receiver DP No. 5 of OAO Severstal.]. *Progressivnyye processy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva. Materialy pervoy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii [Proceedings of the first international scientific and technical conference Progressive processes and equipment of metallurgical production]*. Cherepovec: 1998, (p.p. 18-20) [In Russian].
 17. Chajka A.L., Sohackij A.A., Panchoha G.V., Cyupa K.S., SHostak V.YU., Kornilov B.V. (2014). Sovershenstvovanie konstrukcii shahty i metallopriemnika domennyh pechej pri ispolzovanii pyleugolnogo topliva [improving the design of the mine and the metal receiver of blast furnaces using pulverized coal fuel]. *Ekologiya i promyshlennost [Ecology and industry]*, 2014, 2, 28-35 [In Russian].

18. Chaika A.L., Lebid V.V., Kornilov B.V., Shumelchik E.I., Karikov S.A., Safonov S.E. (2021). Realizaciya kompleksa modelej dlitelnogo i energosberegayushchego proizvodstva chuguna na domennyh pechah Ukrainy [Implementation of a Set of Long-Term and Energy-Saving Cast Iron Production Models in Blast Furnaces in Ukraine]. *Stal [Steel]*, 2021, 3, 15-18 [In Russian]. <https://doi.org/10.3103/S0967091221030025>
19. Chaika A.L., Kornilov B.V., Lebid V.V., Naboka V.I., Safonov S.E., Mandra V.V. et al. (2020). Avtomatizirovannyj kontrol teplovyh poter v sisteme ohlazhdeniya i ocenka raskhoda koksa na ih kompensaciyu na domennyh pechah PAO «Zaporozhstal» [Automated control of heat losses in the blast furnaces cooling system and evaluation of the coke consumption for their balancing at PJSC Zaporizhstal]. *Stal [Steel]*, 2020, 8, 11-13 [In Russian].

B. V. Kornilov, PhD, Senior Researcher; ORCID 0000-0002-5544-3023

O. L. Chaika, PhD, Senior Researcher, Head of laboratory of heat engineering and energy-saving technologies; ORCID 0000-0003-1678-2580

V. V. Lebid, PhD, Senior Researcher; ORCID 0000-0003-3938-3785

Ye. I. Shumelchik, PhD, Senior Researcher; ORCID 0000-0001-5350-6425

A. O. Moskalina, PhD, Researcher, ORCID 0000-0001-9552-2853

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

THE THERMAL WORK ANALYSIS OF THE FIREPLACES OF BLAST FURNACES OF UKRAINE OF VARIOUS DESIGNS

Summary. The aim of the work is to study modern ways to increase the operational reliability of the furnace and hearth of blast furnaces, which largely determine the duration of the blast furnace campaign. The article analyzes the ways to increase the stability of the furnace and hearth, presents the results of the analysis of thermal work and ignition of the lining of metal receivers of blast furnaces of different designs. The modern directions of construction of the metal receiver of blast furnaces are determined. It is shown that the modern methodology of construction of blast furnace furnaces develops two main directions: the use of a coordinated combination of refractory materials with a cooling system; use of a combination of wear-resistant materials based on carbon and ceramics. However, even the improvement of the design and cooling system of the metal receiver does not allow to fully increase the duration of the campaign. To assess the service life of the furnace, it is necessary to provide regular automated control of the ignition of the furnace lining and hearth.

In Ukraine, during the renovation of blast furnaces, the design of metal receivers with the use of "ceramic glass" was preferred. To date, the system of monitoring the thermal work and ignition of the furnace has been implemented in 10 blast furnaces using the automatic control system "Horn" developed by the HMI NASU. The implementation of continuous control over the ignition of the furnace in blast furnaces allowed us to assess the effect of the use of ceramic cups. The value of heat losses of the furnace and the cost

of coke for their compensation are estimated. Methods and models for determining the thermal state and wear of the metal receiver lining based on a combination of calorimetric and thermometric control methods have been developed. Comparison of heat losses of the metal receiver in the cooling system of blast furnaces allows to quantify the thermal performance of controlled areas and the furnace as a whole. It is shown that the specific value of heat loss of the metal receiver per unit volume of the blast furnace can serve as an integral parameter. It is established that the value of specific heat losses per unit volume of the blast furnace with a ceramic cup is $\sim 0.4-0.7 \text{ kW/m}^3$, which is much less than blast furnaces without it ($\sim 0.9-1.1 \text{ kW/m}^3$). Ceramic glass saves coke about 1 kg/t of cast iron.

Key words: metal receiver, monitoring, heat loss, "ceramic glass", coke consumption.

For citation: Kornilov B.V., Chaika O.L., Lebid. V.V., Shumelchik Ye.I., Moskalina A.O. Analiz teplovoi roboty hornu ta podu domennykh pechei Ukrainy riznoi konstruktсии [The thermal work analysis of the fireplaces of blast furnaces of Ukraine of various designs]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 55-68 (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-55-68

*Стаття надійшла до редакції збірника 21.12.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*