М.С. Кузнецов¹, газівник, e-mail: maks_kuznetsov82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6065-9929>**Г.Ю. Крячко**², канд. техн. наук, доц., e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>¹ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (Кам'янське, Україна)²Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

Взаємозв'язок критеріїв теплового стану горна з газодинамікою процесу і характеристиками продуктів доменної плавки

В статті проаналізовано придатність відомих режимних критеріїв роботи стану горна на газодинаміку процесу і характеристики продуктів плавки. Досліджено роботу двох доменних печей об'ємом 1500 і 1386 м³ у різних періодах з 2015 по 2020 р. Зважаючи на залежності ступеня відновлення кремнію і газодинамічних процесів від тиску в робочому просторі печі, вибір досліджуваних періодів проводили за умови коливання тиску на колошнику в межах, що не перевищують 5 кПа.

Підтверджено, що співвідношення теоретичної температури горіння і температури чавуну на випуску, а також різниця цих температур можуть бути використані в якості показників теплового стану горна, як такі, що, по-перше, мають відношення безпосередньо до низу доменної печі і, по-друге, мають достатньо тісний зв'язок з похідними процесу, а саме газодинамікою і властивостями продуктів плавки. Встановлено, що використання відношення T_T/t_c має перевагу, оскільки має більш тісний зв'язок з параметрами доменного процесу, ніж різниця вказаних вище температур. Наведено дані, які свідчать про перевагу критерію T_T/t_c у порівнянні з теоретичною температурою горіння для оперативного контролю теплового стану горна.

Встановлено, що залежно від стану печі, сировинних та експлуатаційних умов, діапазону зміни T_T/t_c , збільшення величини останнього співвідношення може по-різному впливати на нижній перепад тисків.

Показано, що зі збільшенням величини критерію T_T/t_c температура чавуну зменшується. Пояснено, яким чином дуттьовий режим, оцінюваний теоретичною температурою горіння, може впливати на формування кінцевого шлаку і чавуну на випуску, а саме через конкуруючий розвиток ендотермічних реакцій прямого відновлення і десульфурзації чавуну. На противагу залежностям температури чавуну від зміни критерію T_T/t_c не виявлено значущий зв'язок між T_T/t_c і вмістом кремнію в чавуні. Отримані дані в черговий раз свідчать про недостатню надійність $[Si]$ в якості критерію теплового стану горна.

Ключові слова: критерій, тепловий стан, горн, доменна піч, теоретична температура, газодинаміка, характеристика, продукти плавки.

Вступ. Оцінка теплового стану горна доменної печі розрахунковою (теоретичною) температурою горіння (T_T) дозволяє в темпі з плином процесу впливати не тільки на дуттьовий, але і на газодинамічний і тепловий режими плавки. Підставою для такого твердження є результати дослідження, проведені Ю.С. Юсфіним зі співробітниками на доменній печі (ДП) № 5 Череповецького металургійного комбінату, що дозволило виявити взаємозв'язок T_T з нижнім і загальним перепадами тисків по висоті печі [1]. Крім того, встановлено прямі взаємозв'язки між теоретичною температурою горіння і нагріванням горна – «хімічним» за концентрацією в чавуні кремнію $[Si]$, фізичним за температурою металу (t_c). Залежність температури чавуну від T_T відрізнялася більш високим значенням коефіцієнта зв'язку ($R = 0,608$), ніж для залежності вмісту кремнію в чавуні від T_T ($R = 0,447$). Невисокий коефіцієнт зв'язку для останньої залежності автори [1] цілком обґрунтовано пояснили тим, що крім температури в горні на відновлення кремнію в метал впливають і інші технологічні чинники.

У дослідженні авторів статті [2] на двох доменних печах Дніпровського металургійного комбінату в інших шихтових і експлуатаційних умовах отримано наступні результати. По-перше, було виявлено різний вплив T_T на $[Si]$ і t_c – при зростанні T_T температура чавуну підвищувалася, а вміст кремнію в ньому знижувався. По-друге, коефіцієнт тісноти зв'язку між T_T і t_c виявився менше ($R = 0,35$), ніж для T_T і $[Si]$ ($R = 0,45$). Виявлена різниця була пояснена визначальним впливом властивостей шлаку на фізичний нагрів чавуну. У той же час звертали на себе увагу практично однакові значення R для залежності $[Si] = f(T_T)$ в роботах [1] і [2].

Поряд з теоретичною температурою в якості критерію, що відображає тепловий стан нижньої частини печі, пропонувалося враховувати глибину (протяжність) проникнення фурмених газів в коксову насадку на осі печі, тобто довжину фурменої зони [3]. Авторами зазначеної роботи з урахуванням умов роботи ДП № 9 ВАТ «Криворіжсталь» отримано залежність вмісту сірки і кремнію в чавуні від протяжності прифурменої зони. На жаль, тісноту зв'язків між довжиною зони

і складом чавуну оцінити не має можливості через відсутність в статті необхідної інформації. Проте довжина прифурменної зони в якості критерію «згортки» показників дуттьового режиму роботи доменної печі при вирішенні завдань управління процесом виплавки чавуну заданого складу цілком прийнятна.

Бажаання авторів роботи [4] підвищити інформативність критерію, що враховує вплив технологічного режиму на формування кінцевих складів чавуну і шлаку, призвело до розробки комплексного показника дуттьового режиму, що включає температурний індекс печі (ТІП), ступінь використання оксиду вуглецю (η_{CO}) і довжину фурменої зони ($L_{фз}$):

$$K_T = TИП^{0,4} \cdot \eta_{CO}^{0,2} \cdot L_{фз}^{0,4}. \quad (1)$$

Показник ТІП, запропонований авторами [5], є набутком двох співвідношень, що відображають теплову роботу печі:

$$TИП = ((2500 - T_{кр})/t_{кр}) \cdot ((1500 - t_{ч})/(1250 - t_{д})), \quad (2)$$

де $t_{кр}$ та $t_{д}$ – температури колошникового газу та дуття відповідно, °С.

Аналізуючи вирази (1) і (2), неважко побачити, що складові $t_{кр}$ та η_{CO} не мають відношення ні до показника дуттьового режиму, ні до показника теплового стану нижньої зони доменної печі. Тому показник K_T (1), розроблений в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ) [5], є комплексним показником технологічного режиму, але не дуттьового.

Для оцінки температурних умов нижньої зони доменної печі авторами [6, 7] запропоновані різниця температур в зоні горіння і чавуну ($T_T - t_{ч}$) та відношення цих температур ($T_T/t_{ч}$). Ці показники дійсно мають відношення до оцінки теплового стану нижньої зони доменної печі (умовно горна). На вході в піч показник дуттьового режиму T_T відображає прихід тепла з дуттям і фурменними газами, на виході температура чавуну свідчить тією чи іншою мірою про завершеність теплових процесів в металоприймачеві горна. Для умов ДП № 3 «Запоріжсталі» встановлено оптимальну різницю температур в межах 620–650 °С і виявлено оптимальне співвідношення температур 1,43–1,45, при якому нижній перепад тисків мав мінімальне значення, сприятливе для інтенсивної роботи доменної печі. На жаль, в роботі [7] відсутня інформація про масиви даних і питому вагу одиничного періоду. Також не вказані умови відбору одиничних періодів, перш за все з урахуванням сталості тиску газу на колошнику, що виявляє вплив на газодинаміку процесу, в тому числі і фурменої зони. Автори [7] не розглядали взаємозв'язок різниці температур в зоні горіння і чавуну, а також їх співвідношення з показниками якості чавуну, оскільки це не було завданням зазначеного дослідження.

Мета дослідження. Виявлення закономірностей впливу теплового стану горна на газодинаміку низу печі, характеристики чавуну і шлаку. Виявлення вказаних закономірностей дозволить ефективніше прогнозувати температуру і склад металу на випуску з доменної печі.

Об'єкти і методика дослідження. Об'єктами досліджень були доменні печі Дніпровського металургійного комбінату об'ємом 1500 та 1386 м³. Від типових печей агрегат об'ємом 1500 м³ відрізняється більшими на 800 мм висотою горна і на 250 мм глибиною зумпфа, число повітряних фурм доведено до 20 проти 18. На печі обладнано дві чавунні льотки. Піч об'ємом 1386 м³ відрізняється від типового проекту поглибленими горном (3400 проти 3200 мм) і мертвим шаром (1100 проти 450 мм), а також кількістю повітряних фурм – 18 проти 16. Піч також оснащено двома чавунними льотками. Печі оснащено типовими двоконусними завантажувальними пристроями.

У період досліджень доменні печі працювали з вдуванням пиловугільного палива з додаванням в дуття технологічного кисню. Для аналізу використовували суміжні в часі середньодобові показники за вирахуванням діб з простоями або роботою на знижених параметрах. Оскільки ступінь відновлення кремнію залежить від тиску в робочому просторі печі, вибірку періодів проводили за умови коливання тиску газу на колошнику в межах, що не перевищують 5 кПа. Діапазон зміни надлишкового тиску колошникового газу на обох печах склав 130–135 кПа.

В якості критеріїв теплового стану горна використано запропоновані в роботах [6, 7] відношення теоретичної температури горіння до температури чавуну і різницю вказаних температур. Теоретична температура горіння розраховувалась в темпі зі змінами дуттьового режиму і усереднювалась за одиничний період роботи печі. Температура чавуну вимірювалась на кожному випуску термopарою занурення ТПР 0290М з межами вимірювання 800–1800 °С з використанням вторинного приладу фіксації температури Digitemp – Еп і також усереднювалась за добовий період роботи.

Досліджували взаємозв'язки критеріїв теплового стану горна з нижнім перепадом тисків газу в печі ΔP_H , температурою чавуну, вмістом в чавуні сірки [S] і кремнію [Si], а також основності шлаку $(CaO)/(SiO_2)$.

Результати дослідження. Перевірка придатності критеріїв теплового стану горна показала більш тісний зв'язок критерію $T_T/t_{ч}$ з показниками плавки в порівнянні з модулем $T_T - t_{ч}$ (табл. 1).

Тому було визнано доцільним для аналізу використовувати критерій $T_T/t_{ч}$. Збільшення величини відношення теоретичної температури до температури чавуну або різниці цих температур в умовах обмежених можливостей підвищення температури дуття може бути досягнуто за рахунок збільшення концентрації кисню в дутті і, відповідно, зростання теоретичної температури горіння. Тому при поясненні впливу критерію $T_T/t_{ч}$ слід враховувати вплив збагачення дуття киснем на показники плавки.

Передусім добавка технологічного кисню до атмосферного дуття зменшує вихід горнового газу в одиницю часу на одиницю маси шихтових матеріалів [8]. В результаті відбувається зрушення вниз по висоті печі зон активного гасіння теплового і концентраційного потенціалів газового потоку. Це означає збільшення теплотребності шихти в результаті зниження ступеня її підготовки у верхніх горизонтах печі. На користь наведе-

Таблиця 1

Дані про тісноту зв'язків нижнього перепаду тисків (ΔP_H), вмісту сірки в чавуні [S] і його температури (t_c) з критеріями теплового стану горна

Критерій теплового стану	T_T/t_c	$T_T - t_c$
Критерій тісноти зв'язку	R^2	R^2
Залежні показники		
ΔP_H	0,6869	0,6165
[S]	0,2521	0,2851
t_c	0,3062	0,1669

деного пояснення можна привести розрахункові дані авторів роботи [7], згідно з якими збільшення відношення T_T/t_c з 1,38 до 1,52 призвело до зростання вихідного ступеня прямого відновлення з 0,597 до 0,630 (відповідно до регресійної кривої).

Горновий газ, що утворюється на збагаченому киснем дутті, має більш високі відновний потенціал і температуру. Обидва ці параметри сприяють активному відновленню Fe з FeO, а другий з них – зростанню перепаду тисків на горизонті гасіння температурного потенціалу. В скороченому обсязі стовпа шихти більш масова і інтенсивно протікаюча реакція прямого відновлення:

чинить негативний вплив на розвиток ендотермічної реакції десульфурації, що протікає між розплавами в коксовій насадці:

Конкуруючий тепловий вплив реакції (3) пояснюється не тільки її масовим розвитком (приходом невідновленого заліза) в порівнянні з реакцією (4) (наявністю FeS в металі). Перебіг першої реакції взаємодії з вуглецем здійснений при наявності одного шлаку, тоді як для реалізації другої реакції необхідний ще і контакт з розплавом металу, тривалість якого на збагаченому дутті знижується [8].

Тому в обох досліджених періодах спостерігалися зниження основності шлаку і підвищення вмісту сірки в чавуні зі збільшенням відношення T_T/t_c . Якщо зростання значення T_T/t_c відповідало зниження нижнього перепаду тисків (рис. 1, б), то зниження температури чавуну і насичення його сіркою були більш істотними, ніж у періоді зі зростанням нижнього перепаду тисків (рис. 1, а).

Значущий зв'язок між T_T/t_c і вмістом кремнію в чавуні не спостерігався ні в періоді 08.09.2017 ([Si] = $-0,6417 \cdot T_T/t_c + 1,6224$; $R^2 = 0,0733$), ні в періоді 10.2020 ([Si] = $-1,3221 \cdot T_T/t_c + 2,3262$; $R^2 = 0,051$). Відсутність значущого зв'язку між T_T/t_c і [Si] обумовлено залежністю відновлення оксидів від коливання інших технологічних факторів.

Рис. 1. Дані про взаємозв'язок критерію теплового стану горна (T_T/t_c) з показниками плавки доменної печі об'ємом 1500 м³ в різні періоди роботи: серпень – вересень 2017 р. (а); жовтень 2020 р. (б)

Зниження основності шлаку при збільшенні відношення T_T/t_c обумовлено збільшенням вмісту SiO₂ в шлаку через витривання кремнію на металотермію і зниження температур розплавів в нижній зоні печі. Відповідно до умов реалізації доменного процесу в періоді 08–09.2017 збільшення відношення T_T/t_c з 1,45 до 1,55 супроводжувалося зменшенням основності CaO/SiO₂ на 0,03. У періоді 10.2020 приріст T_T/t_c з 1,34 до 1,44 також на 0,1 супроводжувався зниженням CaO/SiO₂ на 0,05.

Слід відзначити, що більшому розмаху коливання температури чавуну в періоді 08–09.2017 70 °С відповідав більший розмах коливань основності CaO/SiO₂ 0,18, тоді як в періоді 10.2020 ці величини складали

Таблиця 2

Розмах коливань температури чавуну і основності шлаку на ДП 1386 м³ у періоди досліджень

Періоди	11.2015	11.2020
$t_{\text{чmax}} - t_{\text{чmin}} \text{ } ^\circ\text{C}$	80	79
$\text{CaO/SiO}_{2\text{max}} - \text{CaO/SiO}_{2\text{min}}$	0,12	0,14

Рис. 2. Вплив співвідношення $T_T/t_{\text{ч}}$ на температуру чавуну в різні періоди роботи ДП 1386 м³: цифри біля регресійних кривих – рік дослідження

56 °C і 0,11 відповідно. Таким чином, простежується вплив складу шлаку на кінцеву температуру металу. Практично однаковим розмахом коливань температури чавуну у порівнянних періодах на доменній печі об'ємом 1386 м³ відповідали близькі значення розмаху коливань основності (табл. 2).

На відміну від результатів роботи [7], в якій було встановлено мінімальне значення нижнього перепаду тисків ΔP_H при співвідношенні $T_T/t_{\text{ч}}$ 1,43 – 1,45 на досліджених нами печах спостерігався різний вплив критерію $T_T/t_{\text{ч}}$ на газодинаміку низу печі. Так встановлено, що залежно від стану печі, сировинних та експлуатаційних умов, діапазону зміни $T_T/t_{\text{ч}}$ збільшення останнього співвідношення може по-різному впливати на ΔP_H – нижній

перепад може зростати (див. рис. 1, а), може знижуватися (рис. 1, б), може бути взагалі відсутній зв'язок між $T_T/t_{\text{ч}}$ і ΔP_H (ДП 1386 м³, період 11.2020, $R^2 = 0,0129$).

Як і на досліджуваній ДП 1500 м³, на ДП 1386 м³ спостерігається однаковий характер залежностей температури чавуну від зміни критерію $T_T/t_{\text{ч}}$ (рис. 2). Причому слід відмітити різний характер зміни основності шлаку при збільшенні величини $T_T/t_{\text{ч}}$. Якщо в періоді 11.2015 зростання $T_T/t_{\text{ч}}$ супроводжувалось зменшенням основності $\text{CaO/SiO}_2 = -3,4691 \cdot T_T/t_{\text{ч}} + 10,207 \cdot T_T/t_{\text{ч}} - 6,38$; $R^2 = 0,2622$), то в періоді 11.2020 був відсутній зв'язок між вказаними змінними ($R^2 = 0,0583$). При відсутності зв'язку між змінними $T_T/t_{\text{ч}}$ і CaO/SiO_2 відмічено відсутність зв'язків між $T_T/t_{\text{ч}}$ і ΔP_H ($R^2 = 0,0129$), а також між $T_T/t_{\text{ч}}$ і вмістом сірки в чавуні ($R^2 = 0,0182$).

Оскільки формування одиничного періоду тривалістю в одну добу усереднює коливання змінних і у визначеній мірі зменшує тісноту зв'язків досліджуваних параметрів, дослідили зв'язки між теоретичною температурою горіння, а також критерієм $T_T/t_{\text{ч}}$ з температурою чавуну для одиничних періодів тривалістю один випуск. Для оцінювання зв'язків приймали значення теоретичної температури, зафіксоване за 5 хв. до моменту відкриття чавунної льотки для чергового випуску з температурою чавуну $t_{\text{ч1}}$. За незмінних T_T і критерію $T_T/t_{\text{ч1}}$ досліджували їх зв'язки з температурою чавуну наступного випуску $t_{\text{ч2}}$. Результати оцінювання наведено на рис. 3, з якого видно, що для контролю

Рис. 3. Дані про зв'язок між теоретичною температурою горіння (а, е), критерієм $T_T/t_{\text{ч}}$ (б, г) з температурою чавуну $t_{\text{ч1}}$ на черговому випуску (а, б) і наступному $t_{\text{ч2}}$ (е, г) в період оцінювання 01.10–05.10.2020

теплого стану горна теоретична температура горіння значно поступається критерію T_T/t_q .

В розглянутому вище випадку тіснота зв'язку між температурами горіння на фурмах і чавуну на випуску виявилася меншою ($R^2 = 0,414$), ніж в роботі [1], де кореляційне відношення для вказаних змінних складало 0,608 і 0,622 залежно від методики розрахунку теоретичної температури горіння. В той же час коефіцієнт тісноти зв'язку між показниками теплового стану горна T_T/t_{q1} і t_{q2} виявився досить високим ($R = 0,838$), що свідчить про придатність критерію T_T/t_q для оперативного контролю нагріву нижньої частини доменної печі. Перевагою критерію T_T/t_q у порівнянні з розрахунковою T_T є інструментально вимірювана складова критерію, а саме температура чавуну на випуску. Зрозуміло, що інформативність показника T_T/t_q була би вищою, якщо замість одноразового виміру температури використовували середньоінтегральну температуру чавуну на випуску.

Висновки

Підтверджено, що співвідношення теоретичної температури горіння і температури чавуну на випуску,

а також різниця цих температур можуть бути використані в якості показників теплового стану горна.

Встановлено, що використання відношення T_T/t_q має перевагу, оскільки має більш тісний зв'язок з параметрами доменного процесу, ніж різниця вказаних вище температур.

Встановлено, що залежно від стану печі, сировинних та експлуатаційних умов, діапазону зміни T_T/t_q , збільшення величини останнього співвідношення може по-різному впливати на нижній перепад тисків.

Показано, що зі збільшенням критерію T_T/t_q температура чавуну зменшується. Цьому зменшенню відповідають відсутність надійного зв'язку зі вмістом кремнію в чавуні, зменшення основності шлаку і зростання вмісту сірки в металі. Пояснено, яким чином дутьовий режим, оцінюваний теоретичною температурою горіння, може впливати на формування кінцевого шлаку і чавуну на випуску, а саме через конкуруючий розвиток ендотермічних реакцій прямого відновлення і десульфурації чавуну.

Наведено дані, які свідчать про перевагу критерію T_T/t_q у порівнянні з теоретичною температурою горіння для оперативного контролю теплового стану горна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Юсфин Ю.С., Королева И.Л., Черноусов И.И. Расчет теоретической температуры горения и ее взаимосвязь с параметрами доменной плавки. *Сталь*. 1988. № 3. С. 6–11.
2. Кузнецов М.С., Тесля А.В., Крячко Г.Ю. Влияние теоретической температуры горения топлива в фурменной зоне на нагрев чугуна. *Матеріали ІХ Міжнародної конференції молодих вчених «Молоді вчені 2018 – від теорії до практики» 16 лютого 2018 р., м. Дніпро*. С. 51–54.
3. Белькова А.И., Гладков Н.А. и др. Оценка влияния дутьевых факторов на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях комбината «Криворожсталь». *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. Днепропетровск. 2005. Вып. 10. С. 79–87.
4. Белькова А.И., Степаненко Д.А., Скачко А.С. Интегральный показатель учета температурно-дутьевого режима доменной печи в задачах прогнозирования состава продуктов плавки в конкретных сырьевых и технологических условиях. *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2015. Вып. 30. С. 69–79.
5. Пареньков А.Е., Падерин С.Н., Юсфин Ю.С. и др. Температурные критерии оценки и прогнозирования работы доменной печи. *Дни науки МИСИС*. М.: МИСИС, 2008. С. 45–51.
6. Набока В.И., Иващенко В.П., Ковшов В.Н., Петренко В.А. Анализ газодинамического режима нижней зоны доменной печи ОАО МК «Запорожсталь». *Металл и литье Украины*. 2004. № 11. С. 3–6.
7. Набока В.И., Иващенко В.П., Ковшов В.Н., Петренко В.А. Работа доменной печи при стабилизации нижнего перепада давлений. *Металл и литье Украины*. 2006. № 6. С. 22–26.
8. Крячко Г.Ю. Изменения в ходе доменного процесса, вызываемые дутьем, обогащенным кислородом. *Черные металлы*. 2005. № 5. С. 12–17.

Надійшла 25.02.2021

REFERENCES

1. Yusfin, Yu.S., Koroleva, I.L., Chernousov, I.I. (1988). Calculation of the theoretical combustion temperature and its relationship with the parameters of blast-furnace smelting. *Steel*. no. 3. pp. 6–11 [in Russian].
2. Kuznetsov, M.S., Teslya, A.V., Kryachko, G. Yu. (2018). Influence of the theoretical temperature of fuel combustion in the tuyere zone on the heating of cast iron. *Materials of the IX International Conference of Young Scientists "Youth 2018 – from theory to practice"*. Dnipro, pp. 51–54 [in Russian].

3. Belkova, A.I., Gladkov, N.A. et al. (2005). Assessment of the influence of blowing factors on the technical and economic indicators of blast-furnace smelting in the conditions of ArcelorMittal Kryvyi Rih plant. *Scientific journal "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"*. Dnepropetrovsk, iss. 10, pp. 79–87 [in Russian].
4. Belkova, A.I., Stepanenko, D.A., Skachko, A.S. (2015). An integral record indicator of blast furnace temperature and blast regime in the tasks of predicting the composition of smelted products in specific raw material and technological conditions. *Scientific journal "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy"*, iss. 30, pp. 69–79 [in Russian].
5. Parenkov, A.E., Paderin, S.N., Yusfin, Yu.S. (2008). Temperature criteria for assessing and predicting the operation of a blast furnace. *Days of Science in MISIS*. Moscow: MISIS, pp. 45–51 [in Russian].
6. Naboka, V.I., Ivashchenko, V.P., Kovshov, V.N., Petrenko, V.A. (2004). Analysis of the gas-dynamic regime in the lower zone of the blast furnace of PJSC Zaporozhstal. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 11, pp. 3–6 [in Russian].
7. Naboka, V.I., Ivashchenko, V.P., Kovshov, V.N., Petrenko, V.A. (2006). Blast furnace operation during stabilization of the lower pressure drop. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 6, pp. 22–26 [in Russian].
8. Kryachko, G.Yu. (2005). Changes in the course of the blast-furnace process caused by oxygen-enriched blowing. *Ferrous Metals*, no. 5, pp. 12–17 [in Russian].

Received 25.02.2021

Summary

M.S. Kuznetsov¹, Gasman, e-mail: maks_kuznetsov82@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6065-9929>

G.Yu. Kryachko², PhD (Engin.), Associate Professor,
 e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>

¹PJSC “Dneprovsky Iron & Steel Integrated Works” (Kamyanske, Ukraine)

²Dniprovsk State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

The correlation between the criteria of the iron receiver thermal state and gas dynamics process with the characteristics of the blast furnace products

The article analyzes the suitability of the known operating criteria of the blast-furnace operation for assessing the influence of the iron receiver thermal state on gas dynamics of the process and the characteristics of smelting products. The operation of two blast furnaces with the volume of 1500 and 1386 m³ in different periods from 2015 to 2020 was investigated. Taking into account the dependence of the degree of silicon reduction and gas dynamic processes on the pressure in the working space of the furnace, the choice of the studied periods was carried out proceeding from the condition of fluctuations in the gas pressure on the furnace top within the limits not exceeding 5 kPa.

It has been confirmed that the ratio of the theoretical temperature of combustion and the temperature of cast iron at the outlet, as well as the difference of these temperatures, can be used as indicators of the thermal state of the iron receiver, such as those that, firstly, are directly related to the bottom of the blast furnace and, secondly, they have a fairly close connection with the derivatives of the process, namely, gas dynamics and properties of smelting products. It was found that the use of the $T_{\text{pr}}/t_{\text{p}}$ ratio has an advantage, since it has a closer relationship with the parameters of the blast furnace process than the difference between the above temperatures. The data showing the advantage of the $T_{\text{pr}}/t_{\text{p}}$ criterion in comparison with the theoretical combustion temperature for the operational control of the thermal state of the iron receiver (hearth) are shown.

It has been established that, depending on the state of the furnace, raw material and operating conditions, and the range of change in $T_{\text{pr}}/t_{\text{p}}$, an increase in the latter ratio can affect the lower pressure drop in different ways.

It is shown that with an increase in the value of the criterion $T_{\text{pr}}/t_{\text{p}}$, the temperature of the cast iron decreases. It is explained how the blast mode, estimated by the theoretical combustion temperature, can affect the formation of the final slag and pig iron at the outlet, namely through the competitive development of endothermic reactions of direct reduction and desulfurization of pig iron. In contrast to the dependencies of the temperature of cast iron on changes in the criterion $T_{\text{pr}}/t_{\text{p}}$, no significant relationship was found between this criterion and the silicon content in cast iron [Si]. The data obtained once again indicate the lack of reliability [Si] as a criterion for the thermal state of the iron receiver (hearth).

Keywords

Criterion, thermal state, iron receiver (hearth), blast furnace, theoretical temperature, gas dynamics, characteristic, smelting products.