В. В. Горупаха, Ю. С. Семенов /к. т. н./,
Є. І. Шумельчик /к. т. н./, С. В. Ващенко /к. т. н./,
О. Д. Вишинська

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
НАН України, м. Дніпро, Україна
e-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

Вплив перехідних режимів доменної плавки на зміну температур холодильників системи охолодження

V. V. Horupakha,
Yu. S. Semenov /Cand. Sci. (Tech.)/,
E. I. Schumelchik /Cand. Sci. (Tech.)/,
S. V. Vashchenko /Cand. Sci. (Tech.)/,
E. D. Vyshinskaya

Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute, National
Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine
e-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

Influence of transition modes of blast-furnace smelting to change the temperature of the cooling-system plates

Мета. Оцінка впливу нестационарної роботи доменної печі на тепловий стан системи охолодження.

Методика. Аналіз зміни показників термопар, встановлених у тілі холодильних плит, при різних режимах роботи доменної печі.

Результати. Виконано дослідження впливу перехідних режимів доменної плавки на зміну температур холодильників системи охолодження при спільному використанні природного газу і пиловугільного палива в умовах роботи доменної печі з низькою інтенсивністю та при використанні пиловугільного палива з витратою більше 110 кг/т чавуну.

Наукова новизна. Встановлено особливості впливу перехідних режимів доменної плавки на тепловий стан системи охолодження, у т. ч. при різних паливних добавках до дуття і при роботі печі зі зниженою інтенсивністю.

Практична значущість. Результати, наведені в статті, можуть бути використані при проектуванні системи охолодження, а також при виборі раціональних режимів роботи доменної печі. (Іл. 4. Бібліогр.: 12 назв.)

Ключові слова: доменна піч, ПВП, природний газ, холодильники системи охолодження, термопари.

DOI: 10.33101/S065456789

Стан питання. Застосування пиловугільного палива (ПВП) на доменних печах у сучасних шихтових умовах вимагає особливого підходу в управлінні радіальним і окружним розподілом шихти і газів. Практика вдування ПВП показує, що в цьому випадку коротшає окислювальна зона і виникає надмірно розвинений периферійний газовий потік. Оскільки при вдуванні в горн доменної печі ПВП зменшується кількість коксу, що завантажується в піч, внаслідок чого погіршується газопроникність шихти і відбувається перерозподіл потоків газу, з посиленням периферійного газового потоку зміщуються зони впливу максимальних теплових навантажень по висоті печі в зону розпару, заплечиків, а також першого і другого рядів холодильників низу шахти. Наслідком цього є прогари і руйнування холодильних плит найбільш теплонавантажених зон, що призводить до аварійних ситуацій і додаткових зупинок доменної печі. Крім цього, створюються умови для

порушення гарнісажу і футеровки шахти доменної печі. Для збільшення стійкості холодильників розробляються нові конструкції з більш інтенсивним охолодженням. Пропонуються також більш стійкі вогнетриви для низу печі і охолоджуваної частини шахти [1–4].

Внаслідок дорожчезі вищенаведених заходів при вирішенні зазначеної проблеми необхідно використовувати раціональні прийоми управління завантаженням і дуттєвими параметрами. Технологічним заходом впливу на надмірно розвинений периферійний газовий потік при застосуванні технології вдування ПВП є розробка і реалізація прийомів оперативного управління розподілом шихти по радіусу печі. Для чого необхідне вивчення особливостей зміни температур системи охолодження в різних технологічних умовах.

Результати досліджень. Подані в статті дослідження виконані на доменній печі (ДП) № 5

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

корисним об'ємом 1513 м³ групи «Метінвест Холдинг», введений в експлуатацію у червні 2007 р., яка оснащена конусним завантажувальним пристроєм та системою охолодження з гладкими чавунними холодильними плитами. Особливістю конструкції холодильних плит у найбільш теплонавантажених зонах є розташування змійовиків труб у кожній холодильній плиті у двох геометричних площинах, два – з відносно малою протяжністю у першій площині, розташовані з боку печі, та один – більшої протяжності з боку кожуха ДП. Система охолодження ДП № 5, як і іншої доменної печі цеху – ДП № 3, передбачає охолодження хімічно очищеною водою в замкнутих висхідних по висоті контурах (по 2-3 контури на кожний холодильник) з можливістю переходу на випарне охолодження з природною циркуляцією. При значному збільшенні локального теплового навантаження збільшення температури води системи охолодження ДП не може перевищити температуру кипіння при даних умовах (130–140 °С). Збільшення температури тіла холодильника вище цієї температури пов'язане з обмеженням теплопровідності чавунного тіла холодильника. Подібні конструкції охолодження почали широко впроваджуватися при реконструкціях на доменних печах України в останні роки [5].

Після пуску печі до проведення описаних у статті досліджень три рази було виконано шоткретування шахти: у жовтні 2009 р., липні 2011 р. та листопаді 2013 р. На початку 2016 р. на ДП №5 було розпочато освоєння технології вдування пилувугільного палива (ПВП) [6–12].

Під час проведення ремонту ДП № 5, перед впровадженням технології вдування ПВП, були відновлені й підключені до бази даних АСУ ТП термопар, що вимірюють температуру тіла холодильних плит. Закладені ще при капітальному будівництві печі у 2007 р., термопар розподілені рівномірно по колу печі: по 6 термопар на 5 відмітках по висоті печі в заплечиках і зоні низ – середина шахти (рис. 1). Спаї цих термопар розташовані в спеціальних нішах холодильних плит з боку кожуха печі.

Слід зазначити, що температури холодильних плит залежать, в першу чергу, від можливості відведення теплового потоку системою охолодження при впливі теплового навантаження на холодильні плити в процесі плавки, що залежить, у свою чергу, від стану футеровки і гарнісажу, температури середовища на периферії в різних паливних і сировинних умовах плавки.

На початковому етапі дослідження розподілу температур холодильних плит по висоті ДП № 5 на початку освоєння технології вдування ПВП були обрані три періоди з різними умовами:

1. Робота із застосуванням ПГ і ПВП на початковому етапі його освоєння з витратами ПГ = 22 м³/т, ПВП = 130 кг/т чавуну і вмістом О₂ в дутті ~23,1 %;

2. Дискретна робота в умовах низької продуктивності (<60 % від номінальної) при середніх витратах ПГ = 15 м³/т, ПВП = 50 кг/т і О₂ = 21,7 %;

3. Без ПГ з витратою ПВП = 112 кг/т чавуну, при середній інтенсивності плавки і зі збагаченням дуття киснем до вмісту О₂ = 22,8 %.

Як видно з рис. 1, найнижча і рівномірно розподілена по висоті шахти температура холодильних плит спостерігалася при низькому рівні виробництва чавуну (період II). Найбільш значне збільшення температур – до 225 °С мало місце на третьому горизонті установки термопар – при роботі з відносно високою витратою ПВП і з невеликою кількістю ПГ (період I). При роботі ДП з відносно невисокою витратою ПВП (період III) – температури в найбільш теплонавантажених точках у середньому не перевищували 200 °С, при

Рис. 1. Розподіл температур холодильних плит ДП № 5 в характерні періоди роботи

цьому спостерігалось деяке збільшення температур на 5-му горизонті середини шахти (відм. 28 160).

Найбільший вплив на температури тіла холодильних плит мають інтенсивність плавки і витрата паливно-дутьєвих добавок (рис. 1). Ці дані кореспондуються з розподілом температур футеровки іншої печі доменного цеху – ДП № 3 при роботі з різною кількістю паливних добавок [9; 12]. Зі збільшенням інтенсивності плавки і витрати паливних добавок, що заміщують кокс, екстремум температур футеровки зміщується в нижні горизонти і набуває більш яскраво вираженого характеру. Це створює умови перетікання газів до стінки печі, що призводить до збільшення теплових навантажень і температур тіла холодильників.

Температури тіла холодильних плит заплечиків і низу шахти практично не змінювалися у всіх трьох періодах, що пов'язано з добре розвиненим центральним потоком газу в печі і зменшеним потоком газів поблизу холодильників заплечиків, що дозволяє утримувати на них гарнісажеподібні маси значної товщини, які були виявлені при видувці доменної печі на капітальний ремонт з шоткретуванням шахти у листопаді 2016 р.

Динаміка зміни температур холодильників на різних рівнях протягом квітня – жовтня 2016 р. до зупинки ДП на шоткретування шахти показала значні коливання (рис. 2).

Середня температура тіла холодильних плит змінювалася від 80 до 220–230 °С при пікових навантаженнях, при цьому найбільше за абсолютною величиною і відхиленням температурно-теплове навантаження у всьому періоді зафіксовано на відм. 22 040, найменше – на рівні заплечиків. Для аналізу змін температур холодильних плит ДП № 5 в умовах освоєння технології вдування ПВП у квітні – жовтні 2016 р. цей період був розбитий на 5 окремих підперіодів (рис. 2), в яких переважали різні чинники.

Як було показано раніше, збільшенню місцевих теплових навантажень на систему охолодження сприяють збільшення тепло-газодинамічних параметрів дуття й інтенсивності процесу плавки, збільшення рудного навантаження при заміні коксу паливними добавками до дуття. Так, підвищення вмісту O_2 в дутті сприяє збільшенню виходу фурмених газів і теоретичної температури горіння, що вимагає температурно-теплової компенсації у вигляді паливних добавок. Ці фактори приводять до збільшення виробництва чавуну при збереженні кількості дуття і рівного опускання шихти. Основні фактори, які постійно впливають на температуру холодильних плит, наведені на рис. 3. Інші параметри і шихтові умови змінювалися різнонаправлено і незначним чином. На рис. 4 наведено розподіли температур тіла холодильників для шести аналізованих періодів по висоті ДП № 5.

Як видно, в періоді I на зростання температури холодильних плит впливало збільшення вмісту кисню в дутті і поступове нарощування витрат ПВП у попередньому періоді, йшов пошук оптимальних умов плавки і формування газорозподілу в умовах вдування ПВП при нормальній інтенсивності плавки. Розподіл температур по висоті ДП № 5 на початку першого періоду (рис. 4) при нарощуванні інтенсивності показав зростання максимальної температури на відм. 22 040 до 270 °С. У кінці періоду розподіл температур став більш рівномірним у теплонавантаженій зоні, зміна розподілу температур по висоті не призводила до значної зміни середньої температури тіла холодильників, яка становила близько 150 °С. Температура заплечиків залишалася незмінною завдяки гарній газопроникності центральної зони ДП № 5.

На початку періоду II – 20–30.04.2016 р. температури почали зменшуватися, багато в чому завдяки зменшенню інтенсивності вдування ПВП, потім спостерігалися значні коливання темпера-

Рис. 2. Зміна температур термодатчиків тіла холодильних плит ДП № 5 в період освоєння технології вдування ПВП

Рис. 3. Зміна температур термопар тіла холодильних плит в період освоєння технології вдування ПВП (а), при зміні вмісту кисню в дутті (б), при змінах виробництва чавуну (в)

тури, пов'язані з дискретною роботою ДП № 5 (роботою неповну добу) та простоями в умовах обмеження постачання сировини при нормальній інтенсивності плавки, коливання температур заплечиків свідчили про схід гарнісажу. Також у цей період знизилася середня витрата ПВП, іноді практично до нуля із заміною його на ПГ.

У періоді III піч працювала дискретно, з низькою інтенсивністю плавки, середня температура зменшилася до 100 °C. У першій половині цього періоду використовували ПГ, після чого перейшли на атмосферне дуття, що призвело до незначного зростання середньої температури холодильних плит. При цьому, незважаючи на низьку середню температуру, відхилення температури на відм. 22 040 від середньої становили 50 °C при використанні ПГ, і понад 100 °C при атмосферному дутті, рис. 2. Це свідчить про значне перетікання горнових газів з центральної зони на периферію через широкі коксові вікна при змен-

шенню рудному навантаженні і недостатності газо-дуттєвих параметрів для створення врівноваженої системи різнонаправлених сил ваги шихти і підпору газу, що призводило до зменшення порозності стовпа шихти. Розподіл середньої температури по висоті печі як у першій, так і в другій половині періоду фактично не відрізнявся.

У періоді IV почалося значне нарощування газодуттєвих параметрів та інтенсивності плавки, що зумовило значне зростання температур тіла холодильників. Подача ПВП і збільшення його витрати до 120 кг/т чавуну 03–05.07.2016 р. привели до зростання середньої температури від 130 до 195 °C за рахунок температур по всій висоті печі, а потім температури трохи зменшилися до 165 °C – 08.07.2016 р. Подальше зростання температури і її коливання були пов'язані зі збільшенням виробництва при нарощуванні газодуттєвих параметрів. Після стабілізації температур вони почали знижуватися 25.07–05.08.2016 р., в осно-

Рис. 4. Розподіли температур тіла холодильників ДП № 5 для шести аналізованих періодів

вному за рахунок температури на відм. 22 040 у процесі формування газопроникного стовпа шихти з центральним газорозподілом. Розподіл температур по висоті печі також показує значне їх збільшення у середині шахти при нарощуванні інтенсивності плавки, після досягнення якої з'являється тенденція на зниження температур до початкового рівня (рис. 4).

Нижні і верхні піки, які спостерігаються при загальній тенденції зниження середньої температури в періоді V, пов'язані зі стоянками для ремонтних робіт з подальшою задувкою і зниженням витрати ПВП з компенсацією природним газом. При цьому верхні піки пов'язані в основному зі збільшенням температур на відм. 22 040 і 25 100 внаслідок змін газорозподілу в ДП. Після зменшення температур холодильників заплечиків від 90 до 50 °С почало спостерігатися зменшення середньої температури холодильних плит у нижній і середній частинах шахти по висоті при середній інтенсивності доменної плавки (рис. 2).

На початку періоду VI збільшилася інтенсивність плавки, вміст O_2 в дутті збільшився від 22,7 до 23,4 %, витрату ПВП було стабілізовано в межах 120–130 кг/т чавуну, виробництво чавуну становило в середньому 3050 т/добу. Середні температури зросли на 50 °С – до 150 °С і потім, протягом 10–15 діб, зменшилися до 100 °С і менше. Коливання температур по висоті при цьому зменшилися і без урахування підвищень після стоянок, не перевищували 50 °С (рис. 4).

Зменшення температур тіла холодильних плит по висоті ДП № 5 у періодах V та VI, після значного збільшення інтенсивності плавки, кількості вдування ПВП та рудного навантаження у періодах I та IV, забезпечувалося заходами, спрямованими на підтримання центрального газорозподілу в печі. Значне збільшення кількості та об'єму горнових газів при збільшенні кількості дуття та вмісту кисню, а також за рахунок збільшення витрати ПВП провокує збільшення теплового навантаження на систему охолодження. За умови хорошої газо- та гідропроникності коксової насадки низу печі за рахунок перерозподілу газового потоку до центру печі через певний час температури холодильних плит зменшилися до звичайного робочого рівня.

Висновки

1. У зв'язку з впровадженням на доменних печах технології вдування ПВП необхідно переглянути застарілу для цих умов концепцію системи охолодження найбільш теплонавантажених зон та в цілому профілей доменних печей при їх реконструкції.

2. Підвищенню місцевих теплових навантажень на систему охолодження сприяє збільшення

тепло-газодинамічних параметрів дуття та інтенсивності процесу плавки, рудного навантаження при заміні коксу ПВП. Значні «верхні» піки температур у середній зоні печі також пов'язані із задувками печі після стоянок або тихого ходу. Для зменшення впливу цих параметрів необхідно застосовувати методи та заходи, спрямовані на створення і підтримання центрального газорозподілу у печі, а також уникати різкого та швидкого підвищення теплоенергетичних параметрів дуття. Значний вплив на зони заплечиків і розпару має збільшення інтенсивності після тихого ходу, що зумовлює збільшення периферійного газового потоку та може приводити до сходу гарнісажу.

3. За умови хорошої газо- та гідропроникності коксової насадки низу печі температури холодильних плит тримаються на звичайному робочому рівні. Витрата ПВП при цьому має обмежуватися повнотою його спалювання в межах окислювальної зони для запобігання захащення проміжних шлаків частками ПВП.

Бібліографічний список / References

1. Kurunov I. F. (2018). Ways of Improving Blast Furnace Smelting Efficiency with Injection of Coal-Dust Fuel and Natural Gas. *Metallurgist*, January, vol. 61, issue 9-10, pp. 736-744.

2. Lyalyuk V. P., Tarakanov A. K., Kassim D. A., Pinchuk D. V., Otorvin P. I. (2017). Pulverized-coal injection in a 5000-m³ blast furnace. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 10, pp. 675-681.

3. Филиппов В. В. Преимущества и риски технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива / В. В. Филиппов, В. А. Михалёв, К. В. Миронов, С. А. Загайнов, Б. С. Тлеугабулов // Черметинформация. Черная металлургия. – 2017. – № 1. – С. 38–43.

Filippov V. V., Mikhalyov V. A., Mironov K. V., Zagaynov S. A., Tleugabulov B.S. (2017). *Preimushchestva i riski tekhnologii domennoy pлавki s ispol'zovaniyem pyleugol'nogo topliva* [Advantages and risks of blast furnace smelting technology using pulverized coal]. *Chermetinformatsiya. Chernaya metallurgiya* [Chermetinformatsiya. Ferrous Metallurgy], no. 1, pp. 38-43.

4. Шотт Р. Стратегии оптимизации процесса вдувания пылеугольного топлива в доменную печь / Р. Шотт // Черные металлы. – 2016. – № 8. – С. 15–24.

Schott R. (2016). *Strategii optimizatsii protsessa vduvaniya pyleugol'nogo topliva v domennuyu pech'* [Strategies for optimizing the process of injection of pulverized coal into a blast furnace]. *Chernye Metally* [Ferrous Metals], no. 8, pp. 15-24.

5. Цыгулев Ю. И. Современные решения при проектировании систем охлаждения в условиях применения технологии вдувания пылеугольного

топлива / Ю. И. Цыгулев // Черметинформация. Черная металлургия. – 2017. – № 6. – С. 41–47.

Tsygulev Yu. I. (2017). *Sovremennyye resheniya pri proyektirovaniy sistem okhlazhdeniya v usloviyakh primeneniya tekhnologii vduvaniya pyleugol'nogo topliva* [Modern solutions for the design of cooling systems under the conditions of using the technology of injection of pulverized coal]. *Chermetinformatsiya. Chernaya metallurgiya* [Chermetinformatsiya. Ferrous Metallurgy], no. 6, pp. 41–47.

6. Семенов Ю. С. Диагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах / Ю. С. Семенов, Є. І. Шумельчик, В. В. Горупаха. – Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. – 260 с.

Semenov Yu. S. Shumelchik E. I., Horupakha V. V. (2018). *Diahnostyka ta upravlinnya domennoyu plavkoyu v zminnykh palyvno-syrovynnykh umovakh* [Diagnosis and management of blast furnace smelting variables in terms of fuel and raw]. Dnipro: Dominanta Print, 260 p.

7. Шумельчик Є.І. Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою / Є. І. Шумельчик, В. В. Горупаха, Ю. С. Семенов // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Наука і металургія». – 2018. – С. 24–29.

Shumelchik E. I., Horupakha V. V., Semenov Yu. S. (2018). *Rozrobka i vprovadzhennya novykh pidkhodiv do diahnostyky ta upravlinnya domennoyu plavkoyu* [Development and implementation of new approaches to diagnostics and management of blast furnaces]. *Materialy Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh vchenykh "Nauka i metalurhiya"* [Materials of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Science and metallurgy"], pp. 24–29.

8. Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Gorupakha V. V. (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*, March, vol. 61, issue 11–12, pp. 950–958.

9. Semenov Yu. S. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 7, pp. 473–477.

10. Semenov Yu. S., Shumelchik E. I., Horupakha V. V., Kuznetsov A. M., Zubenko A. V., Kovalenko A. G. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 6, pp. 389–393.

11. Podkorytov A. L., Kuznetsov A. M., Zubenko A. V., Semenov Yu. S., Nesterov A. S., Shumelchik E. I. (2017). Introduction of Pulverized-Coal Injection at Yenakiieve Iron and Steel Works. *Steel in Translation*, vol. 47, no. 5, pp. 313–319.

12. Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Gorupakha V. V., Nasledov A. V., Kuznetsov A. M., Zubenko A. V. (2017). Monitoring Blast Furnace Lining Condition During Five Years of Operation. *Metallurgist*, July, vol. 61, issue 3–4, pp. 291–297.

Цель. Оценка воздействия нестационарной работы доменной печи на тепловое состояние системы охлаждения.

Методика. Анализ изменения показаний термопар, установленных в теле холодильных плит, при различных режимах работы доменной печи.

Результаты. Выполнено исследование влияния переходных режимов доменной плавки на смену температур холодильников системы охлаждения при совместном использовании природного газа и пылеугольного топлива в условиях работы доменной печи с низкой интенсивностью и при использовании пылеугольного топлива с расходом более 110 кг/т чугуна.

Научная новизна. Установлены особенности влияния переходных режимов доменной плавки на тепловое состояние системы охлаждения, в т.ч. при различных топливных добавках к дутью и при работе печи с пониженной интенсивностью.

Практическая значимость. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы при проектировании системы охлаждения, а также при выборе рациональных режимов работы доменной печи.

Ключевые слова: доменная печь, ПВП, природный газ, холодильники системы охлаждения, термопары.

Purpose. Estimation of the influence of non-stationary blast-furnace smelting on the thermal state of the cooling system.

Methodology. Analysis of changes in the meanings of thermocouples installed in the body of the cooling system plates, under different operating conditions of the blast furnace.

Results. The study of the influence of transitional modes of blast-furnace smelting on the temperature change of the cooling-system plates at the joint use of natural gas and coal-pulverized fuel, under conditions of a low-intensity blast furnace operation and using pulverized coal with a consumption of more than 110 kg/ton of pig iron.

Findings. The peculiarities of the influence of transitional modes of blast-furnace smelting on the thermal state of the cooling system are established: incl. with various fuel additives for blasting and with the operation of the furnace with reduced intensity.

Practical value. The results presented in the article can be used in the design of the cooling system, as well as in the selection of rational operating modes of the blast furnace.

Key words: blast furnace, PCI technology, natural gas, cooling-system plates, thermocouple.

**Рекомендована до друку
к. т. н. А. Ю. Оробцевим
Надійшла 30.01.2019**