

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.16:669.162.24

Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В.

ВЛИЯНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ КРУПНОСТИ КОКСА НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ОСНАЩЕННОЙ ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ, В УСЛОВИЯХ ПАО «ММК»

Аннотация. Исследовали работу доменной печи ПАО «ММК», оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, при изменении эквивалентной по поверхности крупности кокса. Повышение крупности было осуществлено за счет увеличения содержания классов 60-80 и +80 мм. В базовом периоде она составила 50,4 мм, в опытном – 52,3 мм при постоянном режиме загрузки. Результаты показали, что рост крупности кокса сопровождался самопроизвольным перераспределением его относительно зон колошниково-го пространства: осевой, пристеночной, рудного гребня. Следствием было изменение рудной нагрузки по горизонтальному сечению, на что указывала температура газа в верхней части печи. Рост эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,4 до 52,3 мм сопровождался уменьшением его удельного расхода на 0,71% (3 кг/т чугуна) и снижением производительности печи на 1,29%. Для повышения положительного действия крупности кокса на ход доменной плавки целесообразно разработать рациональные режимы загрузки шихтовых материалов по кольцевым зонам колошника с корректировкой параметров дутья.

Ключевые слова: доменная плавка, чугун, расход кокса, производительность

Введение

Совершенствование доменного процесса направлено на уменьшение удельного расхода кокса и повышение производительности печей [1-4]. Одним из направлений улучшения технико-экономических показателей их работы является выявление рационального гранулометрического состава кокса с воздействием на распределение сырьевых материалов по радиусу колошника [5-8]. Положительное влияние на работу доменной печи оказывает ограничение поступления фракций менее 35(40 мм) и более 80 мм [9-12], с последующим выделением и загрузкой в скипы мелких составляющих совместно с железорудными материалами [13-15]. Увеличение содержания фракции более 80 мм может влиять положительно или отрицательно на работу доменной печи [16, 17]. В среднем на печах объемом 2000, 2700, 5000 м³ предприятий Российской Федерации, Украины и Финляндии повышение её на 1% сопровождалось уменьшением производительности на 30-50 т/сут при росте удельного расхода кокса на 1-2,5 кг/т чугуна [11, 19]. Ухудшение работы печей преимущественно объясняют низкой прочностью фракции более 80 мм в холодном и горячем состояниях. Обратное влияние повышения доли крупной фракции на каждый 1% в интервале 25-40% проявлялось ростом производительности на 0,77% и уменьшением удельного расхода кокса на 1,25%. В этом случае условия производства кокса обеспечивали высокие прочностные свойства фракции более 80 мм и, соответственно, минимизацию склонности к трещинообразованию [19, 20].

Исследованиями кокса, загружаемого в доменные печи ПАО «ММК», установлены существенно меньшие отличия в прочностных показателях между

фракциями кокса [21]. Класс крупности более 80 мм для кокса мокрого и сухого тушения по сравнению с фракцией 40-60 и 60-80 в среднем имел меньшую горячую прочность по показателю CSR и структурную прочность в холодном состоянии соответственно на 1,5 и 3,3%. Такие отличия в прочностных характеристиках фракций кокса в исследованиях [22] позволили обеспечить уменьшение удельного расхода кокса на 0,13% при росте его эквивалентной по поверхности крупности на каждый 1% в интервале крупности от 53,0 до 54,7 мм. Однако самопроизвольное его перераспределение в колошниковом пространстве печи, оснащенной КЗУ, сопровождалось уменьшением производительности печи на 0,59%.

В связи с этим цель работы заключалась в исследовании роли эквивалентной по поверхности крупности кокса для хода процессов и достигаемых результатов применительно к доменной печи ПАО «ММК», оснащенной лотковым загрузочным устройством.

Методы и результаты

Изучали влияние эквивалентной по поверхности крупности кокса на показатели работы доменной печи ПАО «ММК» объемом 1370 м³, оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа. Выделили два периода продолжительностью по 21 недели, отличающиеся крупностью кокса. В первом периоде (базовый) она составляла 50,4 мм, во втором (опытный) – 52,3 мм (табл. 1).

Повышение крупности кокса в периоде II по сравнению с периодом I от 50,4 до 52,3 мм обеспечивали при постоянном режиме загрузки (табл. 2) увеличением содержания класса +60 мм. Рост составил 36,2 отн. % для фракции +80 мм и 4,8 отн. % для интервала 60-80 мм (табл. 1).

Таблица 1

Показатели качества кокса, загружаемого в доменную печь и его ситовый состав

Наименование показателей	Уровень показателей при эквивалентной по поверхности крупности кокса, мм	
	50,4	52,3
Номер периода	I	II
Длительность периода, сутки	21	21
Содержание кокса (%) по классам крупности, мм:		
>80	9,85	13,42
80-60	37,79	39,60
60-40	39,84	35,96
40-25	9,43	8,17
< 25	3,09	2,85
Холодная прочность кокса по показателям, %:		
M10	8,4	8,4
M25	85,1	85,9
Горячая прочность кокса (CSR), %	37,3	37,1
Реакционная способность (CRI), %	42,1	42,1

Таблица 2

Характеристики режима загрузки материалов в печь и параметров дутья

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Содержание кокса в шихте по станциям углового положения лотка, %:		
№ 9-11 ($\alpha_{\text{пер}}$)	17,5	
№ 6-8 ($\alpha_{\text{гр}}$)	50,0	
№ 3-5 ($\alpha_{\text{пром}}$)	30,0	
№ 1-2 ($\alpha_{\text{центр}}$)	2,5	
Содержание железорудного материала в шихте по станциям углового положения лотка, %:		
№ 9-11 ($\alpha_{\text{пер}}$)	33,3	
№ 6-8 ($\alpha_{\text{гр}}$)	55,6	
№ 3-5 ($\alpha_{\text{пром}}$)	11,1	
№ 1-2 ($\alpha_{\text{центр}}$)	0,0	
Уровень засыпи фактический, м	2,37	2,46
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	38,6	38,5
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1666	1672
Содержание фракции 0-5 мм в агломерате, %	10,13	10,33
Расход, м ³ /т чугуна:		
– дутья	1065	1057
– природного газа	123,7	124,4
Давление горячего дутья, кПа	256	255
Температура дутья, °C	1182	1185
Расход водяного пара, г/м ³	1,4	2,2
Содержание кислорода в дутье, %	28,1	28,4

Рост крупности кокса в периоде II по сравнению с периодом I на 3,8 отн. % сопровождался самопроиз-

вольным перераспределением его по радиусу колошника преимущественно в зону рудного гребня при некотором перетекании в периферийную часть печи. На это указывает изменение температуры газа по радиусу в верхней части печи в периоде II по сравнению с периодом I (табл. 3):

– температура газа на периферии и в зоне рудного гребня увеличилась соответственно на 2 и 5⁰C, в центральной части печи уменьшилась на 26⁰C;

– соотношение температуры газа на периферии и температуры газа в центральной части печи к температуре газа в зоне рудного гребня уменьшилось соответственно от 1,20 до 1,17 и от 1,23 до 0,99;

– соотношение температуры газа на периферии к температуре в центральной части печи увеличилось от 1,04 до 1,28.

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве печи положительно действовало на участие газов в процессах восстановления. Степень использования CO и H₂ соответственно увеличилась на 0,71 и на 0,69 отн. %. Это действовало в направлении снижения удельного расхода кокса, который в периоде II по сравнению с периодом I уменьшился от 424,8 до 421,8 кг/т чугуна (табл. 3). Положительное действие на уменьшение удельного расхода кокса оказывало улучшение условий фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса из-за увеличения его крупности от 50,4 до 52,3 мм и уменьшения вязкости шлака от 0,33 до 0,26 Па·с. Показатель DMI увеличился от 163 до 168 растворимость углерода уменьшилась от 97,45 до 97,26% (табл. 4).

Таблица 3

Основные технико-экономические показатели работы доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Номер периода	I	II
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	424,8	421,8
Производительность, т/сут	3717	3669
Интенсивность хода:		
– по дутью, м ³ /(м ³ мин)	2,007	1,975
– по суммарному углероду, т/м ³ сут	0,973	0,958
Рудная нагрузка, т/т	3,654	3,666
Содержание железа в шихте, %	58,545	58,493
Вынос пыли, кг/т чугуна	11,4	12,1
Степень использования, %:		
– CO	46,50	46,83
– H ₂	46,16	46,48
Температура газа по радиусу, °C:		
– на периферии $T_{\text{пер}}$	149	151
– в рудном гребне $T_{\text{гр}}$	124	129
– в центре печи $T_{\text{ц}}$	157	131
Соотношение температур:		
$T_{\text{пер}}/T_{\text{гр}}$	1,20	1,17
$T_{\text{пер}}/T_{\text{ц}}$	0,95	1,15
$T_{\text{ц}}/T_{\text{гр}}$	1,27	1,02
Разность температур $T_{\text{пер}} - T_{\text{кол}}$, °C	208	200

Таблица 4

Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Количество шлака, остающегося в горне, т	16,4	20,0
Подвижность шлака, Па·с	0,33	0,26
Показатель DMI	163	168
Показатель растворимости углерода в чугуне	97,45	97,26

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве печи с повышением рудной нагрузки в периоде II по сравнению с периодом I от 3,654 до 3,666 т/т и с уменьшением содержания железа в шихте от 58,545 до 58,493% оказывало отрицательное действие на взаимное сопротивление потоков шихты и газа их противоточному движению. Коэффициент сопротивления шихты в верхней части печи увеличился на 1,5% (табл. 5). Для стабилизации работы печи по газодинамике в опытный период сократили интенсивность по дутью на 1,6 отн. % со снижением выхода фурменного газа от 3697 до 3655 м³/мин при увеличении уровня засыпи от 2,37 до 2,46 м. Эти изменения уменьшили производительность печи на 48 т/сут.

Таблица 5

Показатели газодинамического режима работы доменной печи

Наименование показателей	Эквивалентная по поверхности крупность кокса, мм	
	50,4	52,3
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:		
– вверху шахты	4,970	5,046
– в нижней части заплечиков	11,577	11,754
– общий	8,259	8,394
Выход фурменного газа, м ³ /т чугуна	1432	1428
м ³ /мин	3697	3655

Таким образом, увеличение эквивалентной по поверхности крупности кокса от 50,4 до 52,3 мм сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 0,71% и снижением производительности печи на 1,29%.

Заключение

Исследовали работу доменной печи ПАО «ММК», оснащенной бесконусным загрузочным устройством лоткового типа, при различной крупности кокса. Её увеличение, обеспечивало улучшение фильтрации жидких продуктов плавки через слой кокса в горне, что снизило его удельный расход на 0,71% (3 кг/т чугуна).

Самопроизвольное перераспределение кокса в колошниковом пространстве при увеличении его крупности сопровождалось ростом взаимного сопротивления потоков шихты и газа их противоточному движению выше воздушных фурм, что привело к снижению производительности печи на 1,29%.

Целесообразно изменение эквивалентной крупности кокса сопровождать рациональной корректировкой параметров загрузки материалов в колошниковое пространство и характеристик дутьевого режима.

Список источников

1. Оценка качества кокса как компонента технологии доменной плавки / Д.А. Мучник, А.И. Трикило, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим // Кокс и химия. 2018. № 1. С. 15-21.
2. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование доменного производства с использованием цифровых технологий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79, № 6. С. 455-464.
3. Курунов И.Ф. Качество кокса, его поведение в доменной печи и влияние на ее работу // Новости черной металлургии за рубежом. 2003. №7. С. 31-35.
4. Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.В. Павлов, А.А. Полинов // Черные металлы. 2021. № 12. С. 10-15.
5. Корректировка режима загрузки сырья в доменную печь при увеличении его эквивалентной крупности / Харченко А.С., Сибатуллин С.К., Харченко Е.О., Бегинюк В.А. // Черные металлы. 2024. № 3. С. 22-27.
6. Истечение материалов из шихтового бункера лоткового загрузочного устройства доменной печи по видам крупности / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Гаврюшкин С.И., Чевычелов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2009. № 9. С. 21-25.
7. Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 10. С. 766-773.
8. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Харченко Е.О., Сибатуллина М.И., Миникаев С.Р., Савченко Г.Ю. // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 (19). С. 8-12.
9. Кузин А.В., Хлапонин Н.С. Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 1 // Металлург. 2019. № 1. С. 10-16.
10. Effect of coke quality on blast-furnace performance indices / I.F. Kurunov, V.L. Emel'yanov, V.N. Titov, V.V. Kakunin // Metallurgist. 2007. Vol. 51. No. 11-12. P. 644-648.

11. Анализ изменения гранулометрического состава кокса на протяжении четверти века на примере бывшего Криворожского коксохимического завода / В.П. Лялюк, Е.О. Шмельцер, И.А. Ляхова [и др.] // Кокс и химия. 2013. № 12. С. 28-33.
12. Грибанов Е.А., Ганин Д.Р., Фукс А.Ю. Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе // Черные металлы. 2023. № 11. С. 4-7.
13. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4(32). С. 28-30.
14. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 2(30). С. 24-27.
15. Кузин А.В., Хлапонин Н.С. Опыт подготовки кокса к доменной плавке. Часть 2 // Металлург. 2019. №2. С. 12-18.
16. Оценка зависимости качества доменного кокса от параметров производителя / В.И. Гладышев, Н.Н. Горшков, А.В. Денисов [и др.] // Сталь. 2001. №3. С. 3-6.
17. Влияние качества доменного кокса на работу доменной печи полезным объемом 2000 м³ / Филоненко Ю.Я., Васильев С.В., Муравков П.Г., Дорофеев И.М. // Кокс и химия. 1972. № 6. С. 31-33.
18. Формирование гранулометрического состава кокса. Его взаимосвязь с показателями механической прочности / Карунова Е.В., Гюльмалиев А.М., Гадгарин С.Г., Султангузин И.А. // Кокс и химия. 2006. № 2. С. 23-31.
19. Стабильность качества кокса для доменной плавки / В.П. Лялюк, В.П. Соколова, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим // Кокс и химия. 2012. № 8. С. 19-24.
20. Характеристики кокса, загружаемого в доменные печи ПАО «Северсталь», и особенности его поведения в процессе выплавки чугуна / Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.В. Карунова [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 7(1387). С. 40-45.
21. Сибатуллин С.К., Харченко А.С. Использование коксового орешка на доменных печах: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 162 с.
22. Влияние крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной конусным загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / А. С. Харченко, А. В. Павлов, С. В. Юдина, С. К. Сибатуллин // Черные металлы. 2023. № 12. С. 20-24.

Сведения об авторах

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Юдина Светлана Владимировна – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: yudinasv1478@mail.ru

Сибатуллин Салават Камирович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: 10tks@mail.ru

Свечникова Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: natasha-svechnikova@yandex.ru

Юдин Данил Владиславович – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ydv2002@mail.ru

Кургузов Константин Вячеславович – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kurguzov.kostya@mail.ru

Павлов Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник доменного цеха ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия.

**THE EFFECT OF EQUIVALENT COKE SIZE ON THE PERFORMANCE OF A BLAST FURNACE
EQUIPPED WITH A TRAY LOADING DEVICE IN THE CONDITIONS OF PJSC MMK**

Kharchenko Alexander S. – ScD, head of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: as.mgtu@mail.ru

Yudina Svetlana V. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: yudinasv1478@mail.ru

Sibagatullin Salavat K. – ScD, professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 10tks@mail.ru

Svechnikova Natalya Yu. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nata-sha-svechnikova@yandex.ru

Yudin Danil V. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ydv2002@mail.ru

Kurguzov Konstantin V. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kurguzov.kostya@mail.ru

Pavlov Alexander V. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Blast Furnace Shop, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. The operation of the MMKPJSC blast furnace equipped with a non-cone tray-type loading device was investigated when the surface equivalent size of coke was changed. The increase in size was carried out by increasing the content of classes 60-80 and +80 mm. In the base period, it was 50.4 mm, in the experimental period – 52.3 mm with constant loading mode. The results showed that the increase in the size of coke was accompanied by a spontaneous redistribution of it relative to the zones of the grate space: axial, wall, ore ridge. The consequence was a change in the ore load along the horizontal section, as indicated by the temperature of the gas in the upper part of the furnace. An increase in the surface equivalent size of coke from 50.4 to 52.3 mm was accompanied by a decrease in its specific consumption by 0.71% (3 kg/ton of pig iron) and a decrease in furnace productivity by 1.29%. To increase the positive effect of coke size on the course of blast furnace melting, it is advisable to develop rational modes of loading charge materials along the annular zones of the grate with adjustment of blast parameters.

Keywords: blast furnace melting, cast iron, coke consumption, furnace performance, surface equivalent coke size, loading mode, blast parameters

Ссылка на статью:

Влияние эквивалентной крупности кокса на показатели работы доменной печи, оснащенной лотковым загрузочным устройством, в условиях ПАО «ММК» / Харченко А.С., Юдина С.В., Сибгатуллин С.К., Свечникова Н.Ю., Юдин Д.В., Кургузов К.В., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 4-8.

Kharchenko A.S., Yudina S.V., Sibagatullin S.K., Svechnikova N.Yu., Yudin D.V., Kurguzov K.V., Pavlov A.V. The effect of equivalent coke size on the performance of a blast furnace equipped with a tray loading device in the conditions of PJSC MMK. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 4-8.