

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА В АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Д. Р. ГАНИН¹, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, dmgan@mail.ru;
А. Ю. ФУКС^{1, 2}, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, главный специалист по аглодоменному производству технической дирекции, ayf181073@mail.ru; Е. А. ФУКС³, аспирант, faksevgenyu@mail.ru
(¹ Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета МИСИС, Россия, г. Новотроицк; ² АО «Уральская Сталь», Россия, г. Новотроицк; ³ Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Россия, г. Москва)

Аннотация. В статье выявлены «узкие» места в технологии доменного производства АО «Уральская Сталь». Проанализированы показатели качества кокса, используемого на предприятии для производства агломерата и чугуна. Показано, что содержание влаги в коксе является нестабильным, а гранулометрический состав кокса — неоднородным. Значения показателей истираемости кокса M₁₀, горячей прочности кокса CSR, реакционной способности кокса CRI не отвечают рекомендациям отечественных и зарубежных ученых. Предложены мероприятия, позволяющие улучшить качество используемого на предприятии кокса. Установлено, что относительно невысокое качество агломерата, производимого в АО «Уральская Сталь», связано с неудовлетворительным гранулометрическим составом компонентов агломерационной шихты, значительным содержанием мелких фракций в окомкованной агломерационной шихте и невысокой прочностью ее гранул. Данные недостатки вместе с нехваткой мощностей эксгаустеров на агломерационных машинах № 1–3 и большими вредными прососами у бортов палет и торцов агломерационных машин не позволяют увеличить разрежение в коллекторах, увеличить высоту спекаемого слоя, снизить расход твердого топлива в шихту, улучшить газопроницаемость шихты и прочность агломерата. Приведены химический состав и прочностные характеристики окатышей производства АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» с повышенными содержаниями железа и магнезии, использование которых в доменной шихте может повысить технико-экономические показатели доменной плавки. Проанализированы технология и показатели производства чугуна в доменной печи № 1 предприятия. Разработаны целесообразные для АО «Уральская Сталь» способы снижения удельного расхода кокса и увеличения производительности доменной печи.

Ключевые слова: качество кокса, агломерат, окатыши, металлургия чугуна, доменная печь, расход кокса, производительность печи, эффективность.

Ссылка для цитирования: Ганин Д. Р., Фукс А. Ю., Фукс Е. А. Повышение эффективности производства чугуна в АО «Уральская Сталь» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2024. Т. 80. № 3. С. 5–11.

DOI: 10.32339/0135-5910-2024-3-5-11

INCREASING THE EFFICIENCY OF CAST IRON PRODUCTION AT JSC “URAL STEEL”

D. R. GANIN¹, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, dmgan@mail.ru; A. YU. FUKS^{1, 2}, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Chief Specialist of the Technical Department, Blast Furnace Production, ayf181073@mail.ru; E. A. FUKS³, Postgraduate Student; faksevgenyu@mail.ru
(¹ Novotroitsk Branch of National University of Science and Technology MISIS, Russia, Novotroitsk; ² JSC “Ural Steel”, Russia, Novotroitsk; ³ National University of Science and Technology MISIS, Russia, Moscow)

Abstract. This article identifies the “bottlenecks” in the blast furnace production technology of JSC “Ural Steel”. The quality indicators of coke used for agglomerate and pig iron production at the enterprise are analyzed. It is shown that the moisture content in coke is unstable and the particle size distribution is heterogeneous. The values of coke quality indicators such as M10 abrasion, coke strength after reaction (CSR), and coke reactivity index (CRI) do not meet the

recommendations of domestic and foreign scientists. Measures are proposed to improve the quality of coke used at the enterprise. It is established that the relatively low quality of agglomerate produced at JSC “Ural Steel” is associated with an unsatisfactory particle size distribution of agglomerate components, a significant content of small fractions in the pelletised agglomerate mix, and low granule strength. These deficiencies, combined with the lack of exhausters on agglomeration machines № 1–3 and significant harmful suction at the sides of the pallets and ends of the agglomeration machines, prevent an increase the rarefaction in the collectors, height of the sintering layer, reduction in solid fuel consumption in the mix, improvement of gas permeability, and granule strength of the agglomerate. The chemical composition and strength characteristics of pellets produced by “Mikhailovsky GOK named after A. V. Varichev” with increased iron and magnesia contents are provided. The use of these pellets in the blast furnace burden can improve the technical and economic performance of the blast furnace process. The technology and production indicators of pig iron in blast furnace № 1 of the enterprise are analyzed. Feasible methods for reducing coke consumption and increasing the productivity of the blast furnace are developed for JSC “Ural Steel”.

Keywords: coke quality, agglomerate, pellets, iron metallurgy, blast furnace, coke consumption, furnace productivity, efficiency.

For citation: Ganin D. R., Fuks A. Yu., Fuks E. A. Increasing the efficiency of cast iron production at JSC “Ural Steel”. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2023, vol. 79, no. 3, pp. 5-11. (In Russ.).

DOI: 10.32339/0135-5910-2024-3-5-11

В АО «Уральская Сталь» чугуны производят в доменных печах (ДП) № 1–4 полезным объемом 1007, 1232, 1648, 2015 м³ соответственно. Для его производства применяют кокс мокрого и сухого тушения, получаемый в коксовых батареях № 1–4, 6 предприятия из низкосернистых углей (0,3–1,0 %) Кузнецкого, Печорского и Южно-Якутского бассейнов [1]. В составе доменной шихты используется агломерат собственного производства, доля которого в ней составляет 60–70 %, неофлюсованные и офлюсованные окатыши производства ПАО «Михайловский горно-обогатительный комбинат (ГОК) им. А. В. Варичева», а также неофлюсованные и офлюсованные окатыши производства АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» [2].

Целью работы является выявление «узких» мест в технологических процессах, связанных с производством чугуна в АО «Уральская Сталь», для разработки мероприятий, повышающих эффективность работы доменного цеха предприятия.

В качестве объекта исследования была выбрана ДП № 1, работающая со стабильно высокими технико-экономическими показателями, основные из которых приведены в табл. 1.

Повышение качества кокса

Показатели качества кокса, используемого в АО «Уральская Сталь», представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ДП № 1 [3]

TABLE 1. THE MAIN OPERATING PARAMETERS OF BF No. 1 [3]

Параметр	Значение
Производство чугуна, т/сут	1750–2150
Количество дутья, м ³ /мин	1730–2102
Давление дутья, кгс/см ²	1,65–2,07
Температура дутья, °С	980–1020
Давление газов под колошником, кгс/см ²	0,9–1,2
Число работающих фурм	16
Диаметр воздушных фурм, мм	150

ТАБЛИЦА 2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА КОКСА ЗА ТРЕХЛЕТНИЙ ПЕРИОД [3]

TABLE 2. COKE QUALITY INDICATORS FOR A THREE-YEAR PERIOD [3]

Параметр	Значение
Содержание золы в коксе А, %	11,1–12,2
Содержание летучих веществ в коксе V, %	1,1–1,2
Содержание серы в коксе S, %	0,29–0,56
Содержание влаги в коксе W, %	2,5–5,7
Коэффициент однородности кокса К	1,4–4,1
M ₂₅ , %	80,7–85,7
M ₁₀ , %	8,6–11,7
CRI, %	30,5–39,7
CSR, %	42,6–53,9

Колебания значений содержания влаги в коксе являются значительным отрицательным фактором, нарушающим тепловую работу печей. Снижение влажности кокса на 1,0 % позволит уменьшить его расход в ДП № 1 на 14,717 кг/т и увеличить производительность печи на 105,79 т/сут чугуна [3]. Гранулометрический состав кокса обладает большой неоднородностью, что увеличивает удельный расход кокса и снижает производительность печи. Среднее за 15 месяцев содержание фракции +80 мм в коксе составляет 31,1 %. Сократить содержание фракции +80 мм, куски которой чаще поражены трещинами и легче разрушаются, возможно с помощью шнекозубчатых дробилок. Их планируется установить между конвейерами К-1б и К-2б, а также между конвейерами К-1а и К-2а.

Качество кокса не отвечает рекомендуемым в научной литературе требованиям по значениям показателей истираемости кокса M_{10} (для ДП объемом 1000 м³ кокс высокого качества должен удовлетворять условию: $M_{10} \leq 8\%$ [4]). Улучшить качество кокса по M_{10} можно с помощью обработки угольных концентратов разных марок реагентом в виде раствора ортофосфорной кислоты, что значительно повлияет на физико-химические свойства углей во время их пластификации под воздействием температуры, а также посредством замены мокрого тушения кокса на сухое, отсева из кокса мелочи меньше 15 мм за счет применения для грохотов листовых щелевых решеток с расширением щелей книзу для исключения кострения в них кусков и «елочным» их расположением.

Показатели реакционной способности кокса CRI не соответствуют рекомендуемым в научной литературе значениям: $CRI \leq 28\%$. Значения показателей горячей прочности кокса CSR также не отвечают рекомендациям: $CSR \geq 58\%$ [5]. Снизив CRI и повысив CSR, можно уменьшить удельный расход кокса и увеличить производительность ДП. Этого можно добиться:

- изменением количества марок и шахто-групп угольных концентратов, используемых при составлении шихты (обеспечив требуемые свойства шихты по содержанию золы и серы, степени метаморфизма);

- увеличением в угольной шихте доли фракции ≤ 3 мм до 80 %, что устранил неравномерное утолщение кокса и улучшит его качество;

- уплотнением и термической подготовкой угольной шихты;

- подбором условий и параметров коксования (температуры, давления, периода коксования, скорости нагрева), на которые влияют гранулометрический состав углей, их плотность, способ загрузки, температура простенок;

- заменой мокрого тушения кокса на сухое [5–13].

Повышение качества агломерата

В качестве компонентов аглошихты для производства агломерата в АО «Уральская Сталь» используют железорудные концентраты ПАО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» и АО «Лебединский ГОК», руду железную сидеритовую производства ООО «Бакальское рудоуправление», отходы металлургического производства (окалину, отсева агломерата и окатышей, мелочь железа горячебрикетированного производства АО «Лебединский ГОК», колошниковую пыль, шлам и др.). Для офлюсования агломерата применяют известняк Аккермановского месторождения производства ООО «Аккерманцемент» и известь, производимую в аглоцехе. В качестве твердого топлива в агломерационном процессе используется коксовая мелочь коксохимического производства предприятия, отсев металлургического кокса, образовавшегося в доменном цехе предприятия, и коксовый шлам.

Агломерат должен иметь:

- стабильный химический состав, определяемый результатами усреднения отдельных компонентов аглошихты и точностью их дозирования в шихтовом отделении;

- высокое содержание железа (так как при этом снижается количество шлака и удельный расход кокса в ДП);

- минимальное содержание вредных примесей;

- однородный гранулометрический состав (минимальное содержание фракции +40 мм и мелочи 0–5 мм);

- основность, достаточную для вывода из ДП сырого известняка и обеспечения высокой прочности;

- высокие горячую и холодную прочность;

- высокую восстановимость;

- малый интервал температур размягчения и плавления [14].

Нехватка мощностей эксгаустеров на агломашинах № 1–3, наряду с низкой газопроницаемостью шихты и большими вредными прососами у бортов палет и торцов агломашин, не позволяет повысить разрежение в коллекторах, что сделало бы возможным увеличение высоты спекаемого слоя и прочности агломерата, снижение

расхода твердого топлива в шихту. Недостаточное качество подготовки аглошихты также не позволяет увеличить высоту спекаемого слоя.

Использование сидеритовой железной руды ООО «БРУ» для обеспечения необходимого содержания MgO в агломерате ограничивает увеличение содержания тонкозернистых концентратов в аглошихте.

Относительно невысокое качество агломерата связано с неудовлетворительным гранулометрическим составом компонентов аглошихты [15, 16]:

- большое количество (>30 %) фракции –0,5 мм в коксике, высокое содержание (>10 %) фракции +3 мм свидетельствуют о некачественном составе топлива, его переизмельчении, что отрицательно влияет на структуру и прочность агломерата;

- высокое содержание (>10 %) фракции +10 мм в извести отрицательно влияет на равномерность ее распределения в шихте при смешивании, низкая степень (менее 60 %) обжига приводит к частичному усвоению извести при спекании, ухудшает прочность агломерата;

- аглоруда ООО «БРУ» содержит большое количество (до 15 %) фракции +10 мм, плохо усваиваемой при спекании.

Низкая скорость спекания аглошихты свидетельствует о невысокой прочности ее гранул и большом содержании мелких фракций в окомкованной аглошихте.

С помощью эффективного грохочения топлива, например на виброгрохоте с активной декой FlipFlor, за счет предварительного отсева фракции 0–3 мм перед дроблением можно уменьшить количество вредной мелкой фракции <0,5 мм из-за снижения переизмельчения [14].

На челноковом распределителе шихты, представляющем собой короткий транспортер с резиновой лентой, рама которого установлена на катки и совершает возвратно-поступательные движения над бункером барабанного питателя, необходимо для измерения влажности шихты установить бесконтактный микроволновый поточный влагомер КА-500 производства российской компании «КОНВЕЛС Автоматизация». Непрерывный анализ содержания влаги на челноковом распределителе шихты позволит контролировать качество шихты, получая своевременную информацию для принятия решений, что

дает возможность эффективно использовать ресурсы и снижать расходы.

Качество окомкования аглошихты можно повысить, например, установив в окомкователе форсунки с тангенциальным подводом воздуха на периферии истекающей струи воды [9].

Увеличить прочность гранул аглошихты и агломерата можно за счет ввода минеральных добавок, например, бурожелезняковых руд, предварительно измельченных до крупности –0,063 мм, подаваемых при окомковании аглошихты в пульпе с водой [7], а также за счет ввода в аглошихту добавок оксида бора.

Для дробления агломерата на предприятии используют одновалковую зубчатую дробилку СМД-2А размером 1300×2700 мм. Сократить энергетические затраты на процесс дробления и улучшить гранулометрический состав агломерата за счет уменьшения количества крупных фракций можно с помощью применения способа дробления агломерата в одновалковой зубчатой дробилке ударом, который включает приложение усилий ротора между колосниками. Для наложения усилий создают удар, возникающий вследствие быстрого высвобождения заранее накопленной энергии со стороны ротора или со стороны колосников либо комбинированно, как со стороны ротора, так и со стороны колосников. При этом положение удара осуществляют поочередно от одного элемента ротора или колосника к другому либо чередуют между собой в ином установленном порядке [9].

Повышение качества окатышей

Повысить технико-экономические показатели доменной плавки можно увеличением содержания железа или магнезии в окатышах. Например, в доменной шихте АО «Уральская Сталь» необходимо заменить михайловские неофлюсованные окатыши на окатыши Михайловского ГОКа из флотационного концентрата с большим содержанием железа либо использовать офлюсованные окатыши производства Михайловского ГОКа с повышенным содержанием MgO, что позволит улучшить условия образования гарнисажа и предотвратить массовое прогорание холодильников в ДП [8]. Химический состав и прочностные характеристики окатышей производства ПАО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКАТЫШЕЙ ПРОИЗВОДСТВА
АО «МИХАЙЛОВСКИЙ ГОК им. А. В. ВАРИЧЕВА»

TABLE 3. QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF PELLETS PRODUCED
BY JSC MIKHAILOVSKY GOK NAMED AFTER A. V. VARICHEV

Вид окатышей	Химический состав, %					Прочностные характеристики		
	Fe	CaO	MgO	SiO ₂	CaO/SiO ₂	сжатие, кг/окатыш	Б ⁺⁵ , %	Б ^{-0,5} , %
Неофлюсованные	63,4	0,71	0,25	6,9	0,103	240	95,0	5,0
Офлюсованные	60,6	4,38	0,26	8,2	0,53	279	97,5	2,3
Магнезиальные	60,4	3,87	1,44	8,07	0,48	312	97,3	2,7
Из флотационного концентрата	65,7	3,12	0,68	2,84	1,1	257	97,7	2,4
Из концентрата после derrick	63,9	4,15	0,36	3,77	1,1	279	96,4	3,6

Анализ качественных характеристик новых видов окатышей показывает их более высокую металлургическую ценность по сравнению с базовыми неофлюсованными и перспективы использования.

Повышение технико-экономических показателей доменной плавки

Технико-экономические показатели доменной плавки (удельный расход кокса и производительность ДП) в АО «Уральская Сталь» можно повысить [2, 3, 15, 17–21]:

- улучшением усреднения шихтовых материалов за счет рациональной организации усреднительного склада и применения современного оборудования;

- снижением уровня колебаний химического состава и свойств материалов доменной шихты для стабилизации хода ДП, что достигается снижением количества перешихтовок при более равномерной поставке привозного железорудного сырья;

- использованием агломерата и окатышей с повышенным содержанием железа и более высокими прочностными характеристиками;

- отсевом из доменной шихты фракции 0–5 мм с помощью вторичного грохочения в агломерационном цехе;

- увеличением давления под колошником посредством повышения герметичности конструкции печей, улучшения технических характеристик воздуходувных машин;

- повышением температуры дутья за счет строительства бесшахтных воздухонагревателей конструкции Я. П. Калугина, что позволит снизить расход кокса;

- применением экспертных систем, упрощающих управление доменным процессом.

Выводы

1. Выявлены «узкие» места в технологических процессах, связанных с производством чугуна в АО «Уральская Сталь» (производство кокса, производство агломерата и качество окатышей, доменный процесс).

2. Разработаны мероприятия, повышающие эффективность работы доменного цеха АО «Уральская Сталь» и направленные на снижение удельного расхода кокса и увеличение производительности ДП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружков В. Г., Коноплев А. Д., Прохоров И. Е., Макарова И. В. Проектирование доменного цеха: учебное пособие. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2020. — 323 с.
2. Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Взаимосвязь газодутьевых параметров доменных печей и основных качественных показателей кокса в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2023. № 1. С. 4–7. DOI: 10.17580/chm. 2023.01.01.
3. Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Анализ влияния качества кокса на производство чугуна в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2021. № 2. С. 4–9. DOI: 10.17580/chm. 2021.02.01.

4. Товаровский И. Г., Меркулов А. Е. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // *Металлургия чугуна – вызовы XXI века: VIII Международный конгресс доменщиков*. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 111–122.
5. Дмитриев А. Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияния качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 4. С. 40–44.
6. Guo J., Shen Y., Wang M. etc. Effect of chemical structure of coal on the quality of coke produced from similar grade coals // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2022. V. 162. 105432. DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105432.
7. Zhang W., Shi T., Zhang Q. etc. Coke texture, reactivity and drum strength after reaction under simulated blast furnace conditions // *Fuel*. 2019. V. 251. P. 218–223. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.057.
8. Ghosh B., Sahou B. K., Chakraborty B. etc. Influence of coke structure on coke quality using image analysis method // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2018. V. 5. P. 473–485. DOI: 10.1007/s40789-018-0227-0.
9. Liu L., Yang X., Liu X. etc. Coke quality prediction based on improved WOA-LSTM // *Journal of Chemical Industry and Mechanical Engineering*. 2022. V. 73, Iss. 3. P. 1291–1299.
10. Kardas E., Pustejovska P. Quality of coke used in the blast furnace process – Analysis of selected parameters // *QPI*. 2019. V. 1, Iss. 1. P. 602–609. DOI: 10.2478/9783110680591-081.
11. Gu K., Wu S., Kou M. etc. Effect of coke quality on the main technical indicators of a blast furnace // *TMS 2018: 9th International Symposium on High Temperature Metallurgical Machining. Series “Minerals, metals and materials”*. 2018. P. 745–752. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_71.
12. Diez M. A., Alvarez R., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke, coke quality forecasts and future coke labeling requirements // *International Journal of Coal Geology*. 2022. V. 50, Iss. 1–4. P. 389–412. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
13. Tiwari H. P., Haldar S. K., Roy A. etc. Data mining – new perspectives for predicting coke quality in coke batch production process // *Metallurgical research and technology*. 2015. V. 112. № 6. 603. DOI: 10.1051/metal/2015040.
14. Фролов Ю. А. Агломерация. Технология. Управление. Экология. — М.: Металлургиздат, 2016. — 672 с.
15. Ганин Д. Р., Дружков В. Г., Панычев А. А., Фукс А. Ю. Анализ показателей и условий улучшения работы доменного цеха АО «Уральская Сталь» // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 12. С. 46–54. DOI: 10.32339/0135-2018-12-46-54.
16. Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Повышение эффективности агломерационного производства АО «Уральская Сталь» // *XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство»*. — Старый Оскол, 2021. С. 201–205.
17. Тобер С. Г., Потапов М. Г., Потапова М. В. Стабилизация теплового режима доменной плавки в условиях непостоянства влажности кокса // *Теория и технология металлургического производства*. № 1 (18). 2016. С. 19–21.
18. Морозова Д. А., Шаповалов А. Н., Потапов М. Г. Влияние параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Теория и технология металлургического производства*. 2015. № 1 (17). С. 26–29.
19. Dai B., Lung H-m., Ji Y-l. etc. Development and production of Chinese large blast furnaces in 2019 compared to 2015–2016 // *Metallurgical research and technology*. 2020. V. 117. № 3. 305 p. DOI: 10.1051/metal/2020026.
20. Lu L., Devasahayam S., Sahajwalla V. Evaluation of coal for metallurgical applications // *Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. 2013. P. 352–386. DOI: 10.1533/9781782421177.3.352.
21. Подкорытов А. Л., Кузнецов А. М., Дымченко Е. Н. и др. Теоретические и экспериментальные основы подготовки кокса к доменной плавке // *Металлург*. 2009. № 6. С. 124–131.

Поступила 26 декабря 2023 г.

REFERENCES

1. Druzhkov V. G., Konoplev A. D., Prokhorov I. E., Makarova I. V. *Proektirovanie domennogo tsekha* [Designing a blast furnace shop]. Magnitogorsk: MGTU im. G. I. Nosova, 2020, 323 p. (In Russ.).
2. Ganin D. R., Fuks A. Yu. Interrelation of gas-blown parameters of blast furnaces and the main quality indicators of coke in the conditions of JSC “Ural Steel”. *Chernye Metally*, 2023, no. 1, pp. 4–7. (In Russ.). DOI: 10.17580/chm. 2021.02.01.

3. Ganin D. R., Fuks A. Yu. Analysis of the quality of coke for the production of pig iron on the terms of JSC “Ural Steel”. *Chernye Metally*, 2021, no. 2, pp. 4–9. (In Russ.). DOI: 10.17580/chm. 2021.02.01.
4. Tovarovskii I. G., Merkulov A. E. *Normativnaya otsenka vliyaniya parametrov domennoi plavki na raskhod koksa i proizvoditel'nost'* [Standard assessment of blast furnace melting parameters on coke consumption and productivity]. *Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka: VIII Mezhdunarodnyi kongress domenshchikov* [Iron metallurgy – challenges of the 21st century: VIII International Congress of Blast Furnace Workers]. Moscow: Izdatel'skii dom “Kodeks”, 2017, pp. 111–122. (In Russ.).
5. Dmitriev A. N. Formation of coke quality by changing the composition of the coal charge for coking, the overall quality of coke on its consumption in blast furnace smelting and productivity. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 4, pp. 40–44. (In Russ.).
6. Guo J., Shen Y., Wang M. etc. Effect of chemical structure of coal on the quality of coke produced from similar grade coals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, vol. 162. DOI: 10.1016/j.jaap.2022.105432.
7. Zhang W., Shi T., Zhang Q. etc. Coke texture, reactivity and drum strength after reaction under simulated blast furnace conditions. *Fuel*, 2019, vol. 251, pp. 218–223. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.057.
8. Ghosh B., Sahou B. K., Chakraborty B. etc. Influence of coke structure on coke quality using image analysis method. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2018, vol. 5, pp. 473–485. DOI: 10.1007/s40789-018-0227-0.
9. Liu L., Yang X., Liu X. etc. Coke quality prediction based on improved WOA-LSTM. *Journal of Chemical Industry and Mechanical Engineering*. 2022, vol. 73, iss. 3, pp. 1291–1299.
10. Kardas E., Pustejovska P. Quality of coke used in the blast furnace process – Analysis of selected parameters. *QPI*, 2019, vol. 1, iss. 1, pp. 602–609. DOI: 10.2478/9783110680591-081.
11. Gu K., Wu S., Kou M. etc. Effect of coke quality on the main technical indicators of a blast furnace. *TMS 2018: 9th International Symposium on High Temperature Metallurgical Machining. Series “Minerals, metals and materials”*, 2018, pp. 745–752. DOI: 10.1007/978-3-319-72138-5_71.
12. Diez M. A., Alvarez R., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke, coke quality forecasts and future coke labeling requirements. *International Journal of Coal Geology*, 2022, vol. 50, iss. 1–4, pp. 389–412. DOI: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
13. Tiwari H. P., Haldar S. K., Roy A. etc. Data mining – new perspectives for predicting coke quality in coke batch production process. *Metallurgical research and technology*, 2015, vol. 112, no. 6, 603. DOI: 10.1051/metal/2015040.
14. Frolov Yu. A. *Agglomeratsiya Tekhnologiya. Teplotekhnika. Upravlenie. Ekologiya* [Agglomeration. Technology. Heat engineering. Control. Ecology]. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 672 p. (In Russ.).
15. Ganin D. R., Druzhkov V. G., Panychev A. A., Fuks A. Yu. Analysis of indicators and conditions for improving the work of the blast furnace shop of JSC “Ural Steel”. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 12, pp. 46–54. (In Russ.). DOI: 10.32339/0135-2018-12-46-54.
16. Ganin D. R., Fuks A. Yu. *Povyshenie effektivnosti aglomeratsionnogo proizvodstva AO “Ural'skaya Stal”* [Increasing the efficiency of the quality of sinter production of JSC “Ural Steel”]. *XVII Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo”*. Staryi Oskol, 2021, pp. 128–133. (In Russ.).
17. Tober S. G., Potapov M. G., Potapova M. V. Stabilization of the thermal regime of blast furnace smelting under conditions of variable coke moisture content. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2016, no. 1 (18), pp. 19–21. (In Russ.).
18. Morozova D. A., Shapovalov A. N., Potapov M. G. Influence of blast furnace melting parameters on the results of blast furnace operation under the conditions of JSC “Ural Steel”. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2015, no. 1 (17), pp. 26–29. (In Russ.).
19. Dai B., Lung H-m, Ji Y-l. etc. Development and production of Chinese large blast furnaces in 2019 compared to 2015–2016. *Metallurgical research and technology*, 2020, vol. 117, no. 3, 305. DOI: 10.1051/metal/2020026.
20. Lu L., Devasahayam S., Sahajwalla V. Evaluation of coal for metallurgical applications. *Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, 2013, pp. 352–386. DOI: 10.1533/9781782421177.3.352.
21. Podkorytov A. L., Kuznetsov A. M., Dymchenko E. N. etc. Theoretical and experimental foundations for preparing coke for blast-furnace smelting. *Metallurg*, 2009, no. 6, pp. 124–131. (In Russ.).

Received December 26, 2023