

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.1

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)

Женин Е.В., Шаповалов А.Н., Потапов И.М.

ОПТИМИЗАЦИЯ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния параметров шлакового режима на результаты доменной плавки по производственным данным о работе доменной печи полезным объемом 1232 м³ с использованием железорудных материалов Курской магнитной аномалии. Показано, что для достижения наилучших результатов доменной плавки шлаковый режим должен характеризоваться минимальной основностью, обеспечивающей достижение заданного качества передельного чугуна.

На основе анализа производственных данных даны рекомендации по оптимизации шлакового режима доменной плавки по уровню основности, отношения CaO/MgO и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. Реализация предлагаемых рекомендаций обеспечит условия для улучшения результатов доменной плавки.

Установлено, что в условиях нестабильности состава железорудной шихты и шлака в качестве оценки химических свойств шлака следует использовать показатель суммарной основности, который даёт более объективные результаты.

Ключевые слова: доменная плавка, производительность, расход кокса, десульфурация чугуна, коэффициент распределения серы, основность шлака

Введение

Несмотря на активное развитие альтернативных технологий производства стали, более 90 % стальной продукции в настоящее время производится по классической схеме с участием доменного передела. Устойчивые позиции доменной технологии в структуре производства стали обусловлены известными достоинствами доменной плавки, такими как высокая степень использования тепловой и химической энергии, а также эффективность десульфурации чугуна [1-4]. Вместе с тем доменный передел, включая вспомогательные процессы производства кокса и подготовки руд к плавке, является основным потребителем энергетических ресурсов и главным источником выбросов загрязняющих веществ в черной металлургии [1-5].

Одним из главных направлений повышения эффективности и экологичности доменной плавки является снижение расхода кокса. Эта задача решается путем повышения качества шихтовых материалов, совершенствования техники и технологии плавки [6-9]. Одним из направлений повышения эффективности доменной плавки, обеспечивающих как снижение расхода кокса, так и повышение качества чугуна, является совершенствование шлакового режима [10-12].

Известно, что химический состав, количество и свойства доменного шлака должны обеспечивать требуемый уровень десульфурации чугуна [1, 13-16] при минимальном отрицательном влиянии на газодинамические условия плавки и его технико-экономические показатели в виде удельного расхода кокса и производительности.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных данной теме, вопрос совершенствова-

ния шлакового режима доменной плавки остается актуальным, поскольку оптимальные параметры шлака определяются специфическими шихтовыми условиями работы доменных печей. Поэтому в настоящей работе задача оптимизации шлакового режима доменной плавки решалась на основе анализа производственных данных о работе доменной печи №2 АО «Уральская Сталь» полезным объемом 1232 м³.

Исходные данные

Для исследования влияния шлакового режима на результаты работы доменной печи был выполнен анализ производственных данных за период с 2021 по 2023 годы. Этот период характеризовался относительно стабильной работой печи на железорудной шихте Курской магнитной аномалии. Усредненные показатели работы печи и контролируемые параметры шлакового режима сведены в табл. 1.

Анализ производственных данных

Анализ производственных данных (табл. 1) свидетельствует о значительной колеблемости технико-экономических показателей работы исследуемой печи, что связано с изменениями условий доменной плавки, главным образом, параметров дутья и шлакового режима, а также содержания железа в железорудной части шихты. Отмеченная вариативность условий работы печи осложняет решение поставленной в работе задачи и не позволяет в полной мере адекватно оценить влияние параметров шлакового режима на показатели работы печи. Поэтому влияние шлакового режима на основные показатели доменной плавки оценивали по «приведенным» расходу кокса и производительности, рассчитанным для условий работы печи в марте 2021 года с учетом стандартных коэффициентов влияния параметров доменной плавки [1].

Усредненные показатели работы печи и контролируемые параметры шлакового режима

Показатели		Значение за период	
		диапазон	среднее
Производительность фактическая, т/сут		1797,1-2203,5	2012,5
Производительность приведенная, т/сут		1605,4-2301,4	1910,2
Содержание железа в рудной части, %		54,6-61,6	57,4
Выход шлака, кг/т чугуна		304,6-394,0	343,8
Доля в рудной части шихты, %	окатыши	18,1-61,6	40,2
	агломерат	36,3-81,9	58,3
Рудная нагрузка, т/т кокса		3,5-4,2	3,85
Параметры дутья	расход, м ³ /мин	1773-2303	1984
	давление, МПа	0,294-0,347	0,324
	температура, °С	1059-1166	1118
	содержание O ₂ , %	24,3-31,2	28,7
Расход кокса фактический, кг/т		401,0-457,68	433,2
Расход кокса приведенный*, кг/т		390,3-475,6	444,2
Расход природного газа, м ³ /т		102,6-177,7	132,2
Химический состав шлака, %	SiO ₂	40,4-44,9	41,9
	Al ₂ O ₃	6,7-10,0	7,8
	CaO	41,4-46,1	43,7
	MgO	4,7-7,6	5,9
	FeO	0,26-0,58	0,39
	S	0,51-0,82	0,66
Простая основность CaO/SiO ₂ , ед.		1,00-1,10	1,058
Суммарная основность (CaO+MgO)/SiO ₂ , ед.		1,11-1,25	1,19
Общая основность (CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃), ед.		0,95-1,06	1,00
CaO/MgO, ед.		5,45-9,38	7,49
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , ед.		0,16-0,25	0,19
Выход шлака кг/т чугуна		325-368	343,8

Из сопоставления фактических и «приведенных» показателей доменной плавки следует, что при учете изменяющихся условий работы печи и приведении их к условиям марта 2021 года существенно расширяется диапазон колебаний расхода кокса и производительности, что говорит о действенности метода для исследования влияния технологических факторов на показатели доменной плавки.

Учитывая значительные колебания содержания MgO и Al₂O₃ в шлаке, использование показателя простой основности CaO/SiO₂ не дает полного представления о свойствах шлака, поэтому в дальнейшем анализе использовали показатели суммарной (CaO+MgO)/SiO₂ и полной (CaO+MgO)/(SiO₂+Al₂O₃) основности. Влияние этих показателей на удельный расход кокса представлено на рис. 1, из которого следует, что повышение основности шлака и, как следствие, его количества сопровождается ростом «приведенного» расхода кокса. При этом с точки зрения достоверности полученных уравнений регрессии использование суммарной основности для анализа влияния шлакового режима на расход кокса более предпочтительно.

Влияние показателей основности шлака на приведенную производительность представлено на рис. 2. Снижение производительности с повышением основности связано как с увеличением количества шлака и

снижением количества железа в шихте, так и с ухудшением газодинамических условий доменной плавки. Так же как и в случае с расходом кокса, использование суммарной основности дает более тесную корреляцию с «приведенной» производительностью, поэтому в дальнейшем исследовании для оценки химических свойств шлака использовали показатель суммарной основности.

Таким образом, анализ производственных данных наглядно иллюстрирует негативное влияние роста основности на производительность и расход кокса, что, очевидно, обусловлено прямой корреляцией между основностью шлака, его количеством, расходной частью теплового баланса и газодинамическим сопротивлением столба доменной шихты. Поэтому с точки зрения достижения наилучших технико-экономических показателей работы доменной печи шлаковый режим должен характеризоваться минимальным уровнем основности, обеспечивающим требуемую степень десульфурации чугуна. Последнее обеспечивается увеличением основности шлака, что наглядно иллюстрируется графиками на рис. 3, из которых следует, что повышение уровня суммарной основности является действенным фактором для повышения степени десульфурации чугуна и коэффициента распределения серы, что полностью соответствует теории и практике поведения серы в доменной печи [13-18].

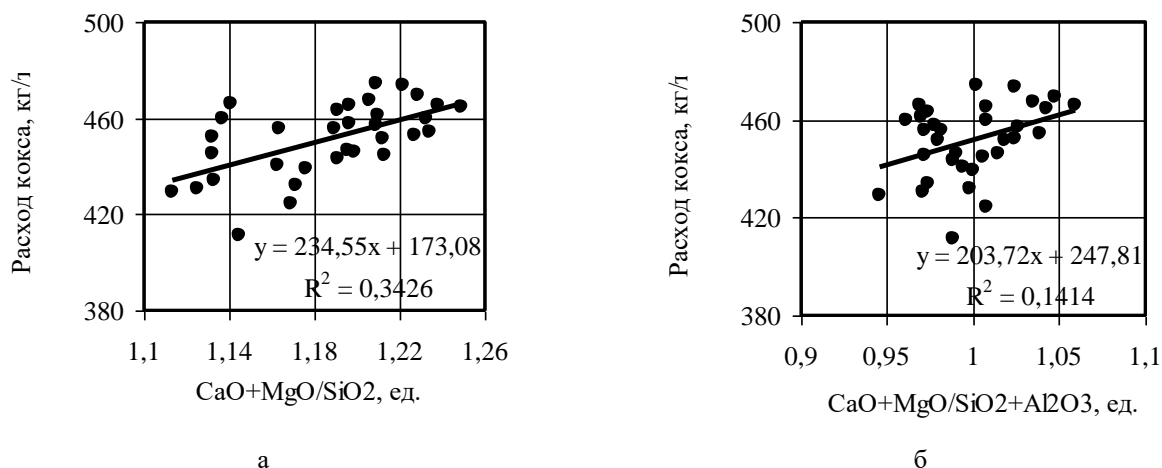


Рис. 1. Влияние суммарной (а) и полной (б) основности на приведенный расход кокса

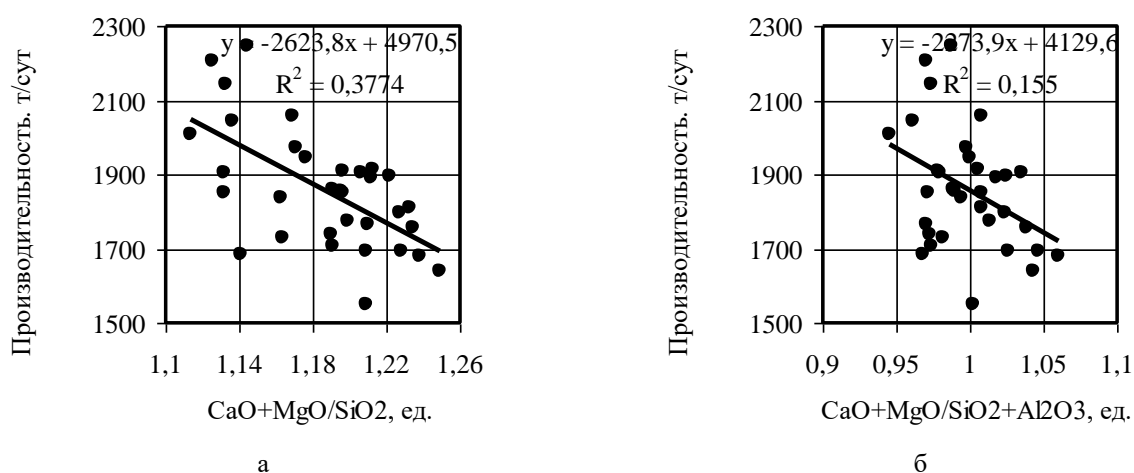


Рис. 2. Влияние суммарной (а) и полной (б) основности на приведенную производительность

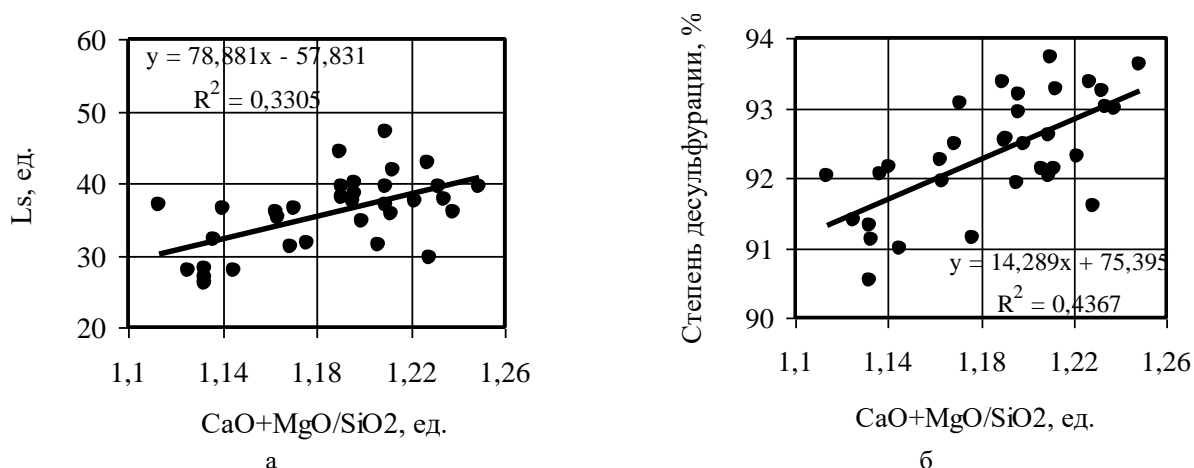


Рис. 3. Влияние суммарной основности на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

Суммарная основность шлака как интегральный показатель, характеризующий сульфидную емкость, можно повысить как в результате увеличения содержания CaO, так и в результате роста MgO. Известно, что CaO является более сильным основным оксидом в сравнении

с MgO, однако увеличение содержания CaO повышает температуру плавления и вязкость доменных шлаков, что ухудшает условия десульфурации. В то же время увеличение содержания MgO в шлаке до 10-12% повышает жидкоподвижность и устойчивость доменных

шлаков [16-21], способствуя тем самым улучшению условий и результатов десульфурации. Более значимая роль MgO в сравнении с CaO в результатах десульфурации подтверждается влиянием отношения CaO/MgO, с уменьшением которого результаты десульфурации улучшаются (рис. 4).

Таким образом, в рассматриваемых условиях резервом улучшения результатов десульфурации является частичное замещение CaO на MgO с доведением содержания последнего до 8-10 % при сохранении величины суммарной основности шлака на текущем уровне 1,19 ед. Для сохранения результатов десульфурации при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки целесообразно снижение суммарной основности до 1,15-1,17 ед. при поддержании содержания MgO в шлаке на уровне 8-10 %. Последнее возможно в результате увеличения содержания MgO в агломерате [23, 23] при одновременной корректировке поступления CaO с шихтой в результате снижения основности агломерата по отношению CaO/SiO₂ или увеличения доли окатышей.

Другим важным критерием шлакового режима доменной плавки, оказывающем влияние на физические свойства шлака и реализацию его обессеривающей способности является отношение Al₂O₃/SiO₂ (рис. 5), повышение которого способствует улучшению результатов десульфурации чугуна в результате воздействия на вязкость и температуру плавления шлака.

Из представленных на рис. 5 данных следует, что для исследуемых шихтовых условий доменной плавки целесообразно поддерживать отношение Al₂O₃/SiO₂ на уровне 0,20-0,25 ед. Для получения шлака с таким соотношением Al₂O₃ и SiO₂ при текущем содержании кремнезема 41-42 % необходимо обеспечить содержание глинозема в шлаке на уровне не менее 8-10%. Положительное влияние именно такого уровня содержания глинозема в шлаке отмечено и в литературных данных [20, 24].

Текущие и рациональные параметры шлакового режима, обеспечивающие улучшение показателей работы печи и качества чугуна, представлены в табл. 2.

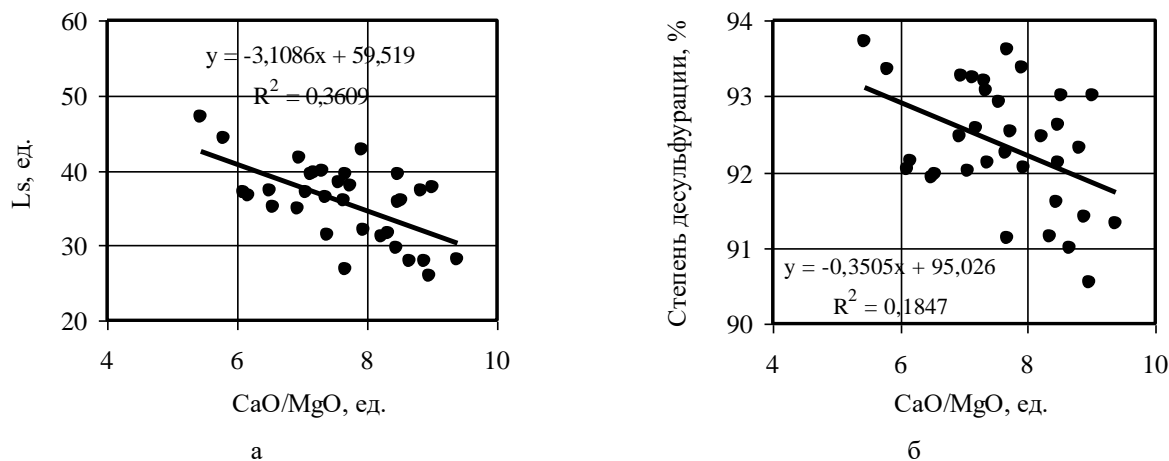


Рис. 4. Влияние отношения CaO/MgO в шлаке на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

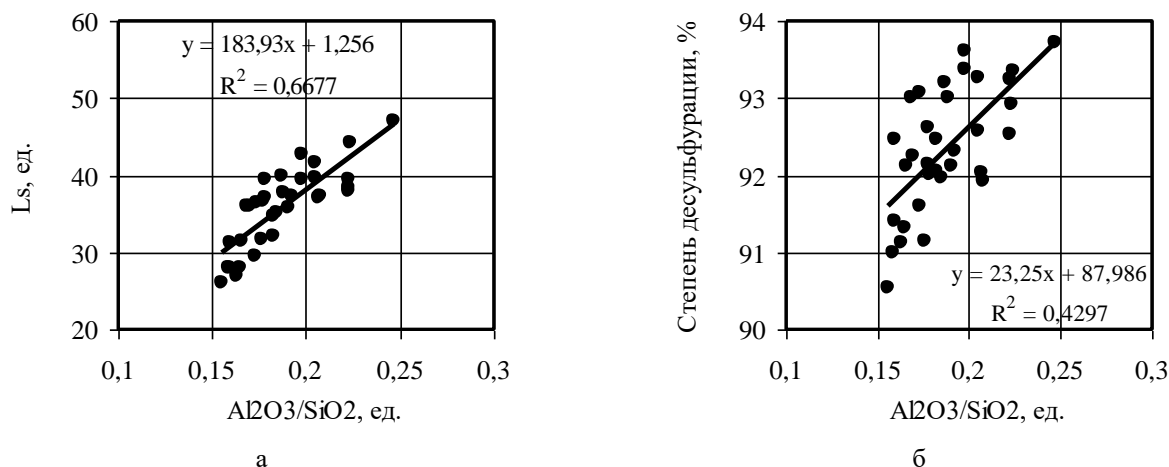


Рис. 5. Влияние отношения Al₂O₃/SiO₂ в шлаке на коэффициент распределения серы (а) и степень десульфурации (б)

Текущие и рациональные параметры шлакового режима

Параметры шлака	Исследуемый период	Рациональные параметры
CaO, %	41,4-46,1 / 43,7	38-40
SiO ₂ , %	40,4-44,9 / 41,9	41-42
MgO, %	4,7-7,6 / 5,9	8-10
Al ₂ O ₃ , %	6,7-10,0 / 7,8	8-9
CaO/MgO, ед.	5,45-9,38 / 7,49	4,0-4,5
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , ед.	0,16-0,25 / 0,19	0,20-0,25
CaO/SiO ₂ , ед.	1,0-1,1 / 1,06	0,94
(CaO+MgO)/SiO ₂ , ед.	1,11-1,25 / 1,19	1,15-1,17
(CaO+MgO)/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃), ед.	0,95-1,06 / 1,00	1,06-1,08
Выход шлака, кг/т	325-368 / 343,8	325-345 / 335

Поддержание рациональных параметров шлакового режима позволит повысить результаты десульфурации при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки в результате снижения выхода шлака и улучшения его физических свойств.

Заключение

Для повышения качества чугуна при одновременном улучшении технико-экономических показателей доменной плавки целесообразно скорректировать состав шлака в сторону увеличения содержания MgO до 9-10 % при снижении уровня простой основности шлака до 0,94 ед. и поддержании величины суммарной основности на уровне 1,15-1,17 ед. Дополнительным мероприятием, способствующим улучшению технико-экономических показателей доменной плавки в рассматриваемых условиях является поддержание отношения Al₂O₃/SiO₂ на уровне 0,2-0,25 ед.

Список источников

1. *Металлургия чугуна: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.С. Юсфина. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.*
2. Курунов И.Ф. Доменный процесс – есть ли альтернатива? // *Металлург.* 2012. №4. С. 40-44.
3. Smith M. Blast furnace ironmaking: view on future developments // *Ironmaking & Steelmaking.* 2015. 42(10). Pp. 734-742.
4. Люнген Х.Б., Шмёле П. Сравнение рабочих характеристик доменных печей в мире // *Черные металлы/* 2019. №3. С. 13-18.
5. Li X.-L., Sun W., Zhao L., Cai J.-J. Energy consumption and smoke and dust emissions analysis of typical iron and steel production enterprise // *Journal of Northeastern University,* 2016, 37(3). 352-356.
6. Повышение эффективности доменной плавки в ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Портнов Л.В., Коверзин А.М., Никитин Л.Д., Щипицын В.Г., Бугаев С.Ф. // *Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации.* 2014. № 6 (1374). С. 15-18.

7. Koichi T., Taihei N., Michitaka S., Tatsuro A. Perspective on Progressive Development of Oxygen Blast Furnace for Energy Saving // *ISIJ International,* 2015, 55(9), 1866-1875.
8. Behnaz R., Arash T., Hannah L. et al. A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking // *Fuel.* 2023, 336, 127077.
9. Повышение эффективности доменной плавки в условиях ПАО «НЛМК» путем оптимизации структуры вдуваемого топлива / Филиппев С.Н., Горовых Н.И., Титов В.Н., Белых Е.В., Прохорова Т.В. // *Металлург.* 2024. № 10. С. 13-16.
10. Shatokha V. Slag parameters and sulphur partition in blast furnace hearth: Ukrainian case and international comparison // *Ironmaking & Steelmaking.* 2022, 49(1), 60-69.
11. Sahoo M, Hazra S, Kumar B, et al. Optimisation of slag composition (MgO and Basicity) to operate 20% alumina in Blast Furnace slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy,* 2024, 133(1-2), 42-48.
12. Shapovalov A.N., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R. The influence of parameters of slag conditions on blast furnace smelting performance and cast iron quality // *CIS Iron and Steel Review,* 2024, 28, 15-20.
13. Шаповалов А.Н., Дружков В.Г. Повышение эффективности десульфурации чугуна. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.Н. Носова, 2011. 148 с.
14. Ma X., Chen M., Xu H. et al. Sulphide capacity of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO system relevant to low MgO blast furnace slags // *ISIJ International,* 2016, 12, 2126–2131.
15. Потапова М.В., Шаповалов А.Н. Влияние параметров доменной плавки на качество передельного чугуна в условиях АО «Уральская Сталь» // *Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки.* 2018. № 17. С. 4-14.
16. Анализ возможных путей снижения содержания серы в чугуне / Мясоедов С.В., Филатов С.В., Пантелеев В.В., Листопадов В.С., Загайнов С.А. //

- Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 878-882.
17. Крячко Г.Ю., Беляев Ю.В. Влияние состава шлака на работу доменных печей // Черные металлы. 2006. № 3. С. 17-22.
 18. К обоснованию выбора рационального шлакового режима в металлургических процессах / Степаненко Д.А., Волкова О., Хеллер Х.П., Оторвин П.И., Чебыкин Д.А. // Сталь. 2017. № 9. С. 2-5.
 19. Shen F., Jiang X., Wu G. et al. Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation // ISIJ International, 2006, 46(1), 65-69.
 20. Исследование подвижности доменных шлаков / Логачев Г.Н., Гостенин В.А., Пишнограев С.Н., Селезнев Д.И., Гридасов В.П. // Сталь. 2013. № 12. С. 4-6.
 21. Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Оценка шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Наука и производство Урала. 2015. № 11. С. 35-39.
 22. Экспериментальные исследования магниезных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н., Майстренко Н.А., Берсенев И.С. // Сталь. 2018. № 1. С. 2-5.
 23. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А. Влияние вида магниезных материалов на показатели агломерационного процесса в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2018. №11(1043). С.38-42.
 24. Sunahara K. Nakano K. Hoshi M. et al. Effect of high Al₂O₃ slag on the blast furnace operations // ISIJ International, 2008, 48, 420-429.

Сведения об авторах

Женин Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Шаповалов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Потапов Иван Михайлович – бакалавр 4 курса каф. МиХТ, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: potapovmg@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SLAG REGIME OPTIMIZATION IN BLAST FURNACE SMELTING

Zhenin Evgeniy V. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: evzhenin@mail.ru.

Shapovalov Alexey N. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS, Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Potapov Ivan M. – 4th-year bachelor's student, Department of Metallurgy and Chemical Technology, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: potapovmg@mail.ru.

Abstracts. The article presents the results of a study of the influence of slag regime parameters on the results of blast furnace smelting based on production data on the operation of a blast furnace with a useful volume of 1232 m³ using iron ore materials from the Kursk Magnetic Anomaly. It is shown that in order to achieve the best results in blast furnace smelting, the slag regime must be characterized by a minimum basicity, ensuring the achievement of a specified quality of pig iron.

Based on an analysis of production data, recommendations are provided for optimizing the blast furnace slag regime in terms of basicity level, CaO/MgO ratio, and Al₂O₃/SiO₂ ratio. Implementation of these recommendations will ensure improved blast furnace smelting results.

In conditions of instability in the composition of iron ore charge and slag, to assess the chemical properties of slag, it is necessary to use the indicator of total basicity.

Keywords: blast furnace smelting, productivity, coke consumption, hot metal desulphurization, sulphur distribution coefficient, slag basicity

References

1. Metallurgy of iron: tutorial for institutions of higher education, revised 3rd edition. Edited by Yusfin Yu.S. Moscow: IKTs «Akademkniga», 2004. 774 p. (In Russ.).
2. Kurunov I.F. The blast-furnace process – is there any alternative? *Metallurgist*, 2012, 56(3-4), 241-246.
3. Smith M. Blast furnace ironmaking: view on future developments. *Ironmaking & Steelmaking*, 2015, 42(10), 734-742.
4. Längen H.B., Schmöle P. Comparative operating parameters of blast furnaces worldwide. *Chernye Metally*, 2019, № 3, 13-18.
5. Li X.-L., Sun W., Zhao L., Cai J.-J. Energy consumption and smoke and dust emissions analysis of typical iron and steel production enterprise. *Journal of Northeastern University*, 2016, 37(3). 352-356.
6. Portnov L.V., Koverzin A.M., Nikitin L.D. et al. Improving the efficiency of blast furnace smelting at JSC EVRAZ ZSMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific-Technical and Economic Information*, 2014, 6(1374), 15-18. (In Russ.).
7. Koichi T., Taihei N., Michitaka S., Tatsuro A. Perspective on Progressive Development of Oxygen Blast Furnace for Energy Saving. *ISIJ International*, 2015, 55(9), 1866-1875.
8. Behnaz R., Arash T., Hannah L. et al. A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking. *Fuel*. 2023, 336, 127077.
9. Filipyev, S.N., Gorovykh, N.I., Titov, V.N. et al. Improving the efficiency of blast furnace melting at Novolipetsk Steel (NLMK) by optimizing the composition of injected fuel. *Metallurgist*, 2025, 68, 1425–1431.
10. Shatokha V. Slag parameters and sulphur partition in blast furnace hearth: Ukrainian case and international comparison. *Ironmaking & Steelmaking*, 2022, 49(1), 60-69.
11. Sahoo M, Hazra S, Kumar B, et al. Optimisation of slag composition (MgO and Basicity) to operate 20% alumina in Blast Furnace slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2024, 133(1-2), 42-48.
12. Shapovalov A.N., Dema R.R., Amirov R.N., Latypov O.R. The influence of parameters of slag conditions on blast furnace smelting performance and cast iron quality. *CIS Iron and Steel Review*, 2024, 28, 15-20.
13. Shapovalov A.N., Druzhkov V.G. Increasing the Efficiency of Pig Iron Desulfurization. Magnitogorsk: Publishing House of Magnitogorsk State Technical University named after G.N. Nosov, 2011, 148 p. (In Russ.).
14. Ma X., Chen M., Xu H. et al. Sulphide capacity of CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO system relevant to low MgO blast furnace slags. *ISIJ International*, 2016, 12, 2126–2131.
15. Potapova M.V., Shapovalov A.N. Influence of blast furnace smelting parameters on the quality of remelting pig iron under the conditions of JSC «Ural Steel». *Technologies of Metallurgy, Mechanical Engineering and Materials Processing*, 2018, 17, 4-14. (In Russ.).
16. Myasoedov S.V., Filatov S.V., Pantelev V.V. et al. Analysis of possible ways to reduce sulfur content in pig iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2020, 63(11-12), 878-882. (In Russ.).
17. Kryachko G.Yu., Belyaev Yu.V. The influence of slag composition on the operation of blast furnaces. *Chernye Metally*, 2006, 3, 17-22. (In Russ.).
18. Stepanenko D.A., Volkova O., Heller H.-P. et al. Selecting optimal slag conditions in the blast furnace. *Steel in Translation*, 2017, 47(9), 610-613.
19. Shen F., Jiang X., Wu G. et al. Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation, *ISIJ International*, 2006, 46(1), 65-69.
20. Logachev G.N., Gostenin V.A., Pishnograev S.N. et al. Mobility of blast-furnace slag. *Steel in Translation*, 2013, 43(12), 805-807.
21. Ovchinnikova E.V., Gorbunov V.B., Shapovalov A.N. Assessment of the slag regime in blast furnace smelting under the conditions of JSC «Ural Steel». *Science and Production of the Urals*, 2015, 11, 35-39. (In Russ.).
22. Ovchinnikova E.V., Gorbunov V.B., Shapovalov A.N. et al. Magnesia Sinter with Flux Based on Magnesium Silicate. *Steel in Translation*, 2018, 48(1), 34-38.
23. Shapovalov A.N., Ovchinnikova E.V., Maistrenko N.A. Effect of the type of magnesia materials on the sintering process indicators at JSC «Ural Steel». *Chernye Metally*, 2018, (11), 38-42.
24. Sunahara K. Nakano K. Hoshi M. et al. Effect of high Al₂O₃ slag on the blast furnace operations. *ISIJ International*, 2008, 48, 420-429.

Ссылка на статью:

Женин Е.В., Шаповалов А.Н., Потапов И.М. Оптимизация шлакового режима доменной плавки // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)
 Zhenin E.V., Shapovalov A.N., Potapov I.M. Slag regime optimization in blast furnace smelting. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-4-10)