

УДК 669.162.263.4

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В ЧУГУНЕ

**Мясоедов С.В.<sup>1</sup>**, начальник доменного цеха № 1 (myasoedov\_sv@nlmk.com)

**Филатов С.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., управляющий директор (filatov\_sv@nlmk.com)

**Пантелеев В.В.<sup>2</sup>**, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов» (vpantelееv@urfu.ru)

**Листопадов В.С.<sup>1</sup>**, директор дирекции по аглодоменному производству (listopadov\_vs@nlmk.com)

**Загайнов С.А.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsk@mail.ru)

<sup>1</sup> ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Свердловская обл., Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Одним из путей повышения энергоэффективности и интенсивности доменной плавки, особенно при использовании пылеугольного топлива, является увеличение горячей прочности кокса. В условиях ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) для повышения качества кокса в угольную шихту вводили нефтяную добавку. При этом содержание серы в коксе возрастает, а, следовательно, повышается содержание серы в чугуне. В связи с этим задача поиска путей улучшения десульфурации чугуна в доменной печи становится актуальной. Основными факторами, определяющими десульфурацию чугуна, являются основность шлака, содержание в нем оксида MgO, температура продуктов плавки, вязкость шлака. Целью настоящей работы является сопоставление эффективности удаления серы путем повышения основности шлака и содержания оксида MgO. На основе известных уравнений разработан алгоритм, позволяющий решить поставленную задачу. Установлено, что повышение содержания оксида MgO в шлаке в большей степени способствует десульфурации чугуна, чем повышение основности. Кроме того, повышение содержания оксида MgO на 1 % сопровождается увеличением выхода шлака на 3,0 – 3,5 кг/т чугуна. В то же время повышение основности на 0,01 приводит к увеличению выхода шлака на 4 – 5 кг/т чугуна. Следовательно, снижение содержания серы в чугуне путем повышения основности шлака требует меньших затрат тепла. В пересчете на удельный расход кокса различие в потребности тепла составляет 0,4 – 0,5 кг/т чугуна. Показано, что при повышении содержания оксида MgO в шлаке вязкость шлака при температуре 1450 °C возрастает в меньшей степени, чем при повышении основности.

**Ключевые слова:** производство чугуна, качество кокса, десульфурация чугуна, вязкость шлака, состав шлака, коэффициент распределения серы, содержание серы в чугуне.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-11-12-878-882

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение горячей прочности кокса является одним из путей повышения энергоэффективности при условии интенсификации плавки [1 – 7]. В условиях ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) для повышения качества кокса в угольную шихту вводится нефтяная добавка с повышенным содержанием серы и с низким содержанием золы [3 – 5, 8]. При этом содержание серы в коксе возрастает. В связи с этим задача поиска путей улучшения десульфурации чугуна в доменной печи становится актуальной. Основными факторами [9 – 22], определяющими десульфурацию чугуна, являются основность шлака, содержание в нем оксида MgO, температура продуктов плавки, вязкость шлака.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Известно, что десульфурация чугуна протекает при взаимодействии оксидов CaO и MgO с соединением FeS. Целью настоящей работы является сопоставле-

ние эффективности удаления серы путем повышения основности шлака и содержания оксида MgO.

Для расчета содержания серы в чугуне, как правило, используют следующую зависимость [23, 24]:

$$[S] = \frac{(1 - \lambda_s) S^{\text{III}}}{1 + L_s \text{III}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  – степень улетучивания серы;  $S^{\text{III}}$  – содержание серы в шихте;  $L_s = \frac{(S)}{[S]}$  – коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном; III – выход шлака.

Для расчета содержания серы в чугуне целесообразно использовать линеаризованное уравнение [24]:

$$\frac{\Delta[S]}{[S]} = \frac{\Delta S^{\text{III}}}{S^{\text{III}}} - \frac{\text{III} \Delta L_s}{1 + \text{III} L_s} - \frac{L_s \Delta \text{III}}{1 + \text{III} L_s}, \quad (2)$$

где знак  $\Delta$ , стоящий перед любым параметром, означает изменение этого параметра в прогнозном периоде по сравнению с базовым.

В работе [9] приводится ряд уравнений для расчета  $L_s$ . Сопоставление относительного изменения коэффициента распределения серы  $\left(\frac{\Delta L_s}{L_s}\right)$ , рассчитанное по основным уравнениям [9], показало, что величина  $\left(\frac{\Delta L_s}{L_s}\right)$  практически постоянна. Для расчета степени распределения серы целесообразно использовать эмпирическое уравнение [8]:

$$\log L_s^0 = 2,44B + k \log \left( \frac{f_s}{p_{CO}} \right) - 2,07, \quad (3)$$

где  $B$  – обобщенная основность;  $f_s$  – коэффициент активности серы в чугуна;  $p_{CO}$  – парциальное давление оксида углерода CO в горновом газе.

Уравнения для расчета этих показателей приводятся в работе [9]. Коэффициент  $k$  в уравнении (3) рассматривается как параметр настройки модели.

Необходимость использования эмпирического коэффициента  $k$  обусловлена различием в условиях десульфурации на каждой конкретной доменной печи. Зависимость коэффициента распределения серы от основности шлака на доменных печах НЛМК приводится на рис. 1.

Поиск коэффициента  $k$  реализован построением зависимости между расчетным ( $L_s^{\text{расч}}$ ) коэффициентом распределения серы и фактическим ( $L_s^{\text{ф}}$ ), найденным по данным работы доменных печей. Для поиска использована информация о составе чугуна и шлака на доменных печах. Всего проанализирована информация за четыре месяца. Выпуск продуктов плавки после остановки печей исключали. Данные группировали по основным признакам, а именно, по содержанию оксида MgO и основ-

ности шлака. Различие средних для групп значений оценивали с использованием критерия Стьюдента [25].

Зависимость между рассчитанным по уравнению (3) и фактическим значениями  $L_s$  приводится на рис. 2.

Разработанный алгоритм позволяет решать ряд конкретных задач. Одной из этих задач является сравнение эффективности десульфурации чугуна путем повышения основности шлака, а также за счет повышения содержания оксида MgO в шлаке. Оценку осуществляли для различной основности шлака. Выполнены расчеты изменения содержания серы в чугуне при увеличении основности шлака на 0,01 и повышении содержания оксида MgO на 1 %. Полученные зависимости приводятся на рис. 3.

Приведенные данные показывают, что повышение содержания оксида MgO в шлаке в большей степени способствует десульфурации чугуна, чем повышение основности. Кроме того, повышение содержания оксида MgO на 1 % сопровождается увеличением выхода шлака на 3,0 – 3,5 кг/т чугуна. Повышение основности шлака также сопровождается увеличением его количества. При этом величина повышения количества шлака зависит от фактической основности шлака. При основности шлака 1,1 повышение ее на 0,01 сопровождается увеличением количества шлака на 4 – 5 кг/т чугуна. Следовательно, снижение содержания серы в чугуне путем повышения основности шлака требует меньших затрат тепла. В пересчете на удельный расход кокса различие в потребности тепла составляет 0,4 – 0,5 кг/т чугуна.

Вязкость шлака во многом определяет как состав чугуна, так и производительность доменной печи [10, 26 – 33]. Анализ влияния содержания оксида MgO и основности шлака на вязкость шлака выполнен с использованием модели [31], разработанной на основе диаграмм В.Г. Воскобойникова [32].

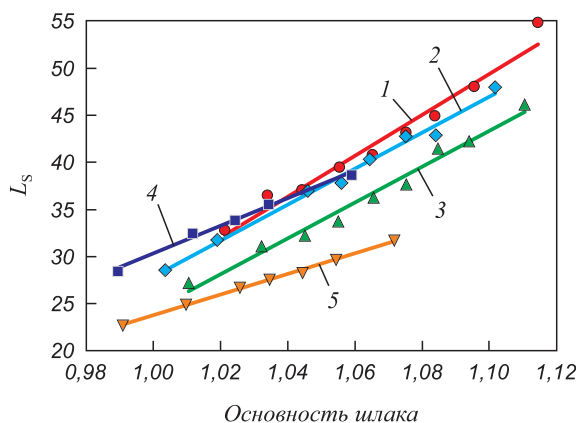


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения серы от основности шлака на доменных печах НЛМК: 1 – ДП 3; 2 – ДП 4; 3 – ДП 5; 4 – ДП 6; 5 – ДП 7

Fig. 1. Dependence of sulfur distribution coefficient on the slag basicity at NLMK blast furnaces:

1 – BF 3; 2 – BF 4; 3 – BF 5; 4 – BF 6; 5 – BF 7

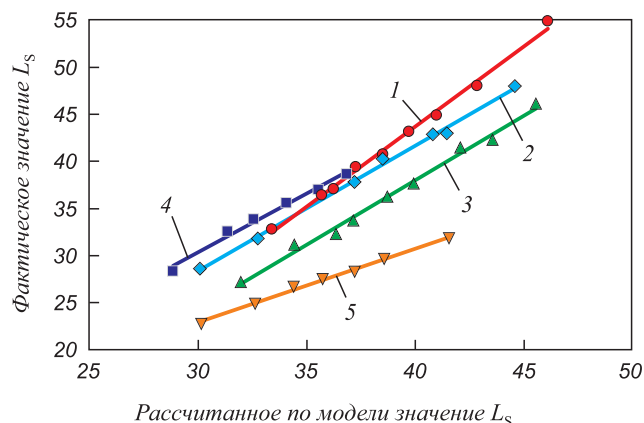


Рис. 2. Зависимость между расчетным и фактическим значениями коэффициентов распределения серы:

1 – ДП 3; 2 – ДП 4; 3 – ДП 5; 4 – ДП 6; 5 – ДП 7

Fig. 2. Relationship between the calculated and actual values of sulfur distribution coefficients:

1 – BF 3; 2 – BF 4; 3 – BF 5; 4 – BF 6; 5 – BF 7

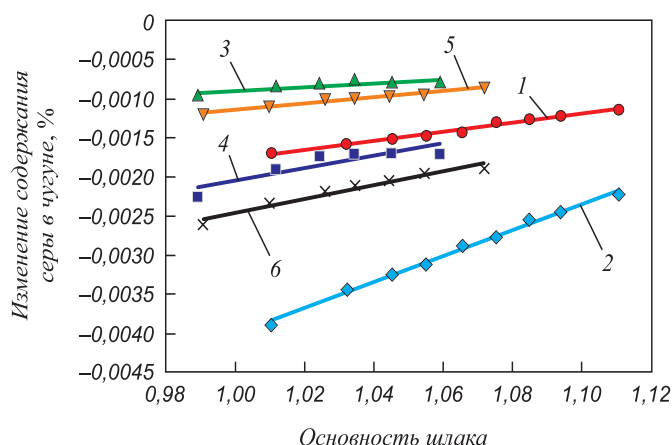


Рис. 3. Зависимость изменения содержания серы в чугуне при увеличении основности шлака на 0,01 и при увеличении содержания MgO на 1 % от основности шлака:  
1 – ДП 5 основность; 2 – ДП 5 MgO; 3 – ДП 6 основность; 4 – ДП 6 MgO; 5 – ДП 7 основность; 6 – ДП 7 MgO

Fig. 3. Dependence of change in sulfur content in pig iron at increase in the slag basicity by 0.01 and at increase in MgO content by 1 % on the slag basicity:  
1 – BF 5 basicity; 2 – BF 5 MgO; 3 – BF 6 basicity; 4 – BF 6 MgO; 5 – BF 7 basicity; 6 – BF 7 MgO

Результаты расчета влияния основности шлака и содержания в нем оксида MgO на его вязкость приводятся на рис. 4, 5. Повышение содержания оксида MgO в шлаке предпочтительнее, так как изменение вязкости шлака при температуре 1450 °C меньше, чем при повышении основности.

Другой задачей исследования является оценка требуемого изменения состава шлака при повышении содержания серы в коксе. Реальный приход серы в доменные печи составляет 2,5 – 4,0 кг/т чугуна. Увеличение содержания серы в коксе на 0,1 % приводит к повышению поступления серы на 0,30 – 0,35 кг/т чугуна, что может сопровождаться повышением содержания серы в чугуне на 0,0008 – 0,0012 %. Такое увеличение содержания серы в чугуне может быть компенсировано повышением содержания оксида MgO на 0,3 – 0,5 %.

## Выводы

При повышении содержания серы в коксе наиболее эффективным мероприятием является повышение содержания оксида MgO в шлаке при постоянной его основности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ishikawa Y., Kase M., Abe Y., Ono K., Sugata M., Nishi T. Influence of post reaction strength of coke on blast furnace operation // Proceedings – Ironmaking Conference. 1983. Vol. 42. P. 357 – 368.
2. Bertling H. Coal and coke for blast furnaces // ISIJ International. 1999. Vol. 39. No. 7. P. 617 – 624.
3. Chatterjee A., Prasad H.N. Possibilities of tar addition to coal as a method for improving coke strength // Fuel. 1983. Vol. 62. No. 5. P. 591 – 600.

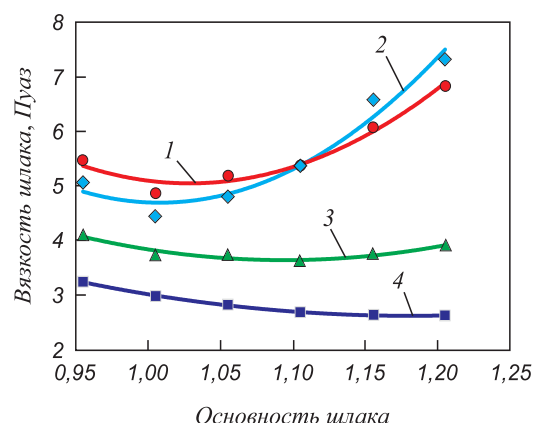


Рис. 4. Зависимость вязкости шлака от его основности:  
1 – вязкость при температуре 1400 °C и содержании MgO 10,5 %; 2 – вязкость при температуре 1400 °C и содержании MgO 11,5 %; 3 – вязкость при температуре 1450 °C; 4 – вязкость при температуре 1500 °C

Fig. 4. Dependence of slag viscosity on its basicity:  
1 – viscosity at a temperature of 1400 °C and MgO content of 10.5 %; 2 – viscosity at a temperature of 1400 °C and MgO content of 11.5 %; 3 – viscosity at a temperature of 1450 °C; 4 – viscosity at a temperature of 1500 °C

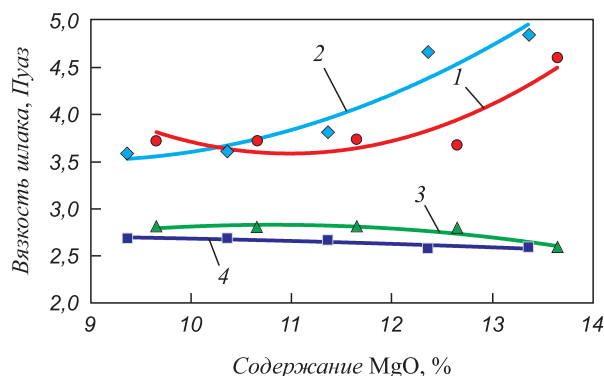


Рис. 5. Зависимость вязкости шлака от содержания в нем оксида MgO:  
1 – вязкость при температуре 1450 °C и основности 1,06; 2 – вязкость при температуре 1450 °C и основности 1,11; 3 – вязкость при температуре 1500 °C и основности 1,11; 4 – вязкость при температуре 1500 °C и основности 1,06

Fig. 5. Dependence of slag viscosity on the MgO content in it:  
1 – viscosity at a temperature of 1450 °C and basicity of 1.06; 2 – viscosity at a temperature of 1450 °C and basicity of 1.11; 3 – viscosity at a temperature of 1500 °C and basicity of 1.11; 4 – viscosity at a temperature of 1500 °C and basicity of 1.06

4. Gonzalez-Cimas M.J., Patrick J.W., Walker A. Influence of pitch additions on coal carbonization: Coke strength and structural properties // Fuel. 1987. Vol. 66. No. 8. P. 1019 – 1023.
5. Liziero Ruggio da Silva G., Souza R., Belchior Reis T., Ladeira Lima I., Quintas A., Amorim L., Andretti Sabino Mota M., Brasil Dias Haneiko N. Influence of coal tar addition on coke quality // AISTech Conference Proceedings. 2018. P. 173 – 184.
6. Geerdes M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingardi O., Ricketts J. Modern Blast Furnace Ironmaking. 3<sup>rd</sup> ed. IOS Press, 2015. – 228 p.
7. Sharma R., Tiwari H., Banerjee P. Producing high coke strength after reactivity in stamp charged coke making // Coke and Chemistry. 2014. Vol. 57. No. 9. P. 351 – 358.

8. Стуков М.И., Мамаев М.В., Чернавин А.Ю. и др. Новый кокс для металлургии // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2012. № 5 (1349). С. 35 – 37.
9. Вегман Е.Ф. Доменное производство. Справочное издание. В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
10. Товаровский И.Г., Севернюк В.В., Лялюк В.П. Анализ показателей и процессов доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 420 с.
11. Товаровский И.Г., Можаренко Н.М., Белецкий В.А. и др. Условия выплавки низкремнистого чугуна с низким содержанием серы // *Сталь*. 1992. № 10. С. 5 – 8.
12. Скачко А.С., Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И. Влияние состава шихты на коэффициенты распределения элементов между продуктами доменной плавки // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. № 4 (34). С. 8 – 15.
13. Довгалюк Б.П., Щербицкий Б.В., Ярошенко Н.М. и др. Повышение качества чугуна за счет стабилизации состава шлака // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1978. № 3. С. 3, 4.
14. Дружков В.Г., Прохоров И.Е. Выбор режима выпуска чугуна и шлака из горна доменных печей в современных условиях // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 4 (36). С. 9 – 12.
15. Шаповалов А.Н., Дружков В.Г. Повышение эффективности десульфурации чугуна. – Магнитогорск: изд. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 148 с.
16. Babich A., Senk D., Gudenau H.W., Mavrommatis K.Th. Ironmaking. Aachen: Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH, 2008. – 402 p.
17. Andersson A.J., Andersson A.M.T., Jönsson P.G. A study of some elemental distributions between slag and hot metal during tapping of the blast furnace // *Steel Research Int.* 2004. Vol. 75. No. 5. P. 294 – 301.
18. Hatch G.G., Chipman J. Sulphur equilibria between iron blast furnace and metal // *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 1949. Vol. 1. P. 274 – 284.
19. Loginov V.I., Berin A.L., Lebed' P.K. etc. Effect of magnesia on desulfurizing power of blast-furnace slags // *Metallurgist*. 1976. Vol. 20. No. 5. P. 315 – 317.
20. Pehlke R.D., Fuwa T. Control of sulphur in liquid iron and steel // *Int. Metals Reviews*. 1985. Vol. 30. No. 1. P. 125 – 140.
21. Zuo H.B., Wang C., Xu C.F., Zhang J.L., Zhang T. Effects of MnO on slag viscosity and wetting behaviour between slag and refractory // *Ironmaking & Steelmaking*. 2016. Vol. 43. No. 1. P. 56 – 63.
22. Choi J.Y., Kim D.J., Lee H.G. Reaction kinetics of desulfurization of molten pig iron using  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$  slag systems // *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. No. 3. P. 216 – 224.
23. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.Н. Лобанов и др. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2001. – 617 с.
24. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев и др. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
25. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1971. – 568 с.
26. Листопадов В.С., Тогобицкая Д.Н., Муравьева И.Г. и др. Стабилизация шлакового режима доменной плавки в условиях работы ДП № 9 ОАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ» на многокомпонентной шихте // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2008. № 8 (1304). С. 14 – 20.
27. Eyring H., Yenderson D., Ree T. Thermodynamic and transport properties of liquids // *Progress in Int. Research on Thermodynamic and Transport Properties*. 1962. P. 340 – 351.
28. Roberto de Oliveira J., Cristo Clem de Oliveira H., Gambarine Soares S. etc. Comparative study of hot metal desulfurization mixtures // *AISTech Proceedings*. 2018. P. 1034 – 1042.
29. Изюмский Н.Н., Гордон Я.М., Третьяк А.А. Математическая модель и система стабилизации шлакового режима работы доменной печи // *Черная Металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2017. № 11. С. 46 – 52.
30. Гиммельфарб А.А., Котов К.И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах. – М.: Металлургия, 1982. – 328 с.
31. Сухарева С.П., Гилева Л.Ю., Загайнов С.А. Разработка блока анализа и прогноза шлакового режима доменной плавки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2004. № 3. С. 75, 76.
32. Свойства жидких доменных шлаков / В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев, А.Г. Михалевич и др. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
33. Yan Z., Pang Z., Lv X.W., Qiu G., Bai C. Effect of  $\text{TiO}_2$  on the viscous behavior of high alumina blast furnace slag // *Minerals, Metals and Materials Series*. 2018. Vol. F10. P. 725 – 733.

Поступила в редакцию 7 июля 2020 г.

После доработки 3 августа 2020 г.

Принята к публикации 26 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 11-12, pp. 878–882.

## ANALYSIS OF POSSIBLE WAYS TO REDUCE SULFUR CONTENT IN PIG IRON

*S.V. Myasoedov<sup>1</sup>, S.V. Filatov<sup>1</sup>, V.V. Panteleev<sup>2</sup>, V.S. Listopadov<sup>1</sup>, S.A. Zagainov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant”, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** One of the ways to increase the energy efficiency and intensity of blast furnace smelting, especially when using pulverized coal fuel, is to increase the hot strength of coke. In the conditions of OJSC NLMK, an oil additive was introduced into the coal charge to improve the coke quality. At the same time, sulfur content in the coke increases, and, consequently, sulfur content in the cast iron increases as well. In this regard, the task of finding ways to improve the desulfurization of cast iron in blast furnace becomes urgent. The main factors determining the desulfurization of cast iron are slag basicity, content of MgO oxide in it, temperature of the smelting products, and the slag viscosity. The purpose of this work was to compare the efficiency of sulfur removal

by increasing the slag basicity and MgO content. On the basis of well-known equations, an algorithm was developed that allows the problem to be solved. It was established that an increase in MgO content in the slag promotes desulfurization of cast iron to a greater extent than a basicity increase. In addition, an increase in MgO content by 1 % is accompanied by an increase in slag yield by 3.0 – 3.5 kg/t of cast iron. At the same time, an increase in basicity by 0.01 leads to an increase in the slag yield by 4 – 5 kg/t of pig iron. Consequently, reducing the sulfur content in pig iron by increasing the slag basicity requires less heat. In terms of the specific consumption of coke, difference in heat demand is 0.4 – 0.5 kg/t of pig iron. It is shown that with an increase in MgO content in the slag, the slag viscosity at a temperature of 1450 °C increases to a lesser extent than with an increase in basicity.

**Keywords:** pig iron production, coke quality, pig iron desulfurization, slag viscosity, slag composition, sulfur distribution coefficient, sulfur content in pig iron.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-11-12-878-882



# REFERENCES

- Ishikawa Y., Kase M., Abe Y., Ono K., Sugata M., Nishi T. Influence of post reaction strength of coke on blast furnace operation. *Proceedings – Ironmaking Conference*. 1983, vol. 42, pp. 357–368.
- Bertling H. Coal and coke for blast furnaces. *ISIJ International*. 1999, vol. 39, no. 7, pp. 617–624.
- Chatterjee A., Prasad H.N. Possibilities of tar addition to coal as a method for improving coke strength. *Fuel*. 1983, vol. 62, no. 5, pp. 591–600.
- Gonzalez-Cimas M.J., Patrick J.W., Walker A. Influence of pitch additions on coal carbonization: Coke strength and structural properties. *Fuel*. 1987, vol. 66, no. 8, pp. 1019–1023.
- Liziero Ruggio da Silva G., Souza R., Belchior Reis T., Ladeira Lima I., Quintas A., Amorim L., Andretti Sabino Mota M., Brasil Dias Haneiko N. Influence of coal tar addition on coke quality. *AISTech Conference Proceedings*. 2018, pp. 173–184.
- Geerdes M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingardi O., Ricketts J. *Modern Blast Furnace Ironmaking*. 3<sup>rd</sup> ed. IOS Press, 2015, 228 p.
- Sharma R., Tiwari H., Banerjee P. Producing high coke strength after reactivity in stamp charged coke making. *Coke and Chemistry*. 2014, vol. 57, no. 9, pp. 351–358.
- Stukov M.I., Mamaev M.V., Chernavin A.Yu. etc. New coke for metallurgy. *Chernaya Metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 5 (1349), pp. 35–37. (In Russ.).
- Vegman E.F. *Domennoe proizvodstvo: Spravochnoe izdanie. V 2-kh t. T. 1. Podgotovka rud i domennyi protsess* [Blast-Furnace Production: Reference Book. In 2 vols. Vol. 1. Preparation of Ores and Blast Furnace Process]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 496 p. (In Russ.).
- Tovarovskii I.G., Severnyuk V.V., Lyalyuk V.P. *Analiz pokazatelei i protsessov domennoi plavki* [Analysis of Indicators and Processes of Blast-Furnace Smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2000, 420 p. (In Russ.).
- Tovarovskij I.G. Melting conditions of low silicon pig iron with low sulphur content. *Stal'*. 1992, no. 10, pp. 5–8. (In Russ.).
- Skachko A.S., Togobitskaya D.N., Bel'kova A.I. Influence of charge composition on coefficients of elements distribution between products of blast furnace smelting. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2013, no. 4 (34), pp. 8–15. (In Russ.).
- Dovgalyuk B.P., Shcherbitskii B.V., Yaroshenko N.M. etc. Improving pig iron quality by slag composition stabilizing. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1978, no. 3, pp. 3, 4. (In Russ.).
- Druzhkov V.G., Prokhorov I.E. Selection of the iron and slag tapping mode from hearth of blast furnaces in modern conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2011, no. 4 (36), pp. 9–12. (In Russ.).
- Shapovalov A.N., Druzhkov V.G. *Povyshenie effektivnosti desulfuratsii chuguna* [Improvement of the Efficiency of Pig Iron Desulfurization]. Magnitogorsk: MGTU im. G.N. Nosova, 2011, 148 p. (In Russ.).
- Babich A., Senk D., Gudenau H.W., Mavrommatis K.Th. *Ironmaking*. Aachen: Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH, 2008, 402 p.
- Andersson A.J., Andersson A.M.T., Jönsson P.G. A study of some elemental distributions between slag and hot metal during tapping of the blast furnace. *Steel Research Int.* 2004, vol. 75, no. 5, pp. 294–301.
- Hatch G.G., Chipman J. Sulphur equilibria between iron blast furnace and metal. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 1949, vol. 1, pp. 274–284.
- Loginov V.I., Berin A.L., Lebed' P.K. etc. Effect of magnesia on desulfurizing power of blast-furnace slags. *Metallurgist*. 1976, vol. 20, no. 5, pp. 315–317.
- Pehlke R.D., Fuwa T. Control of sulphur in liquid iron and steel. *International Metals Reviews*. 1985, vol. 30, no. 1, pp. 125–140.
- Zuo H.B., Wang C., Xu C.F., Zhang J.L., Zhang T. Effects of MnO on slag viscosity and wetting behaviour between slag and refractory. *Ironmaking & Steelmaking*. 2016, vol. 43, no. 1, pp. 56–63.
- Choi J.Y., Kim D.J., Lee H.G. Reaction kinetics of desulfurization of molten pig iron using CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Na<sub>2</sub>O slag systems. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 3, pp. 216–224.
- Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.N. etc. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information Systems in Metallurgy]. Ekaterinburg: izd. UGTU – UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
- Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsessa* [Computer Modeling of Blast Furnace Process]. Ekaterinburg: izd. UGTU – UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
- Mitropol'skii A.K. *Tekhnika statisticheskikh vychislenii. Izd. 2-e* [Technique of Statistical Calculations. 2<sup>nd</sup> ed.]. Moscow: Nauka, 1971, 568 p. (In Russ.).
- Listopadov V.S., Togobitskaya D.N., Murav'eva I.G. etc. Stabilization of slag mode of blast-furnace smelting in the operating conditions of BF No. 9 of JSC "ARSELORMITTAL KRIVROY ROG" on a multicomponent charge. *Chernaya Metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2008, no. 8 (1304), pp. 14–20. (In Russ.).
- Eyring H., Yenderson D., Ree T. Thermodynamic and transport properties of liquids. *Progress in Int. Research on Thermodynamic and Transport Properties*. 1962, pp. 340–351.
- Roberto de Oliveira J., Cristo Clem de Oliveira H., Gambarine Soares S. etc. Comparative study of hot metal desulfurization mixtures. *AISTech Proceedings*. 2018, pp. 1034–1042.
- Izyumskii N.N., Gordon Ya.M., Tretyak A.A. Mathematical model and system for stabilizing the slag operating mode of blast furnace. *Chernaya Metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2017, no. 11, pp. 46–52. (In Russ.).
- Gimmel'farb A.A., Kotov K.I. *Protsessy vosstanovleniya i shla-kobrazovaniya v domennykh pechakh* [Reduction and Slagging Processes in Blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 328 p. (In Russ.).
- Sukhareva S.P., Gileva L.Yu., Zagainov S.A. Analysis and forecast block for slag mode of blast furnace smelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 3, pp. 75, 76. (In Russ.).
- Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. etc. *Svoistva zhidkikh domennykh shlakov* [Properties of Liquid Blast Furnace Slags]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p. (In Russ.).
- Yan Z., Pang Z., Lv X.W., Qiu G., Bai C. Effect of TiO<sub>2</sub> on the viscous behavior of high alumina blast furnace slag. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2018, vol. F10, pp. 725–733.

## Information about the authors:

**S.V. Myasoedov**, Head of the Blast Furnace Shop No. 1  
(myasoedov\_sv@nlmk.com)

**S.V. Filatov**, Cand. Sci. (Eng.), Managing Director  
(filatov\_sv@nlmk.com)

**V.V. Panteleev**, Postgraduate of the Chair "Metallurgy of Iron and Alloys" (vpanteleev@urfu.ru)

**V.S. Listopadov**, Director of Sintering and Blast Furnace Production Directorate (listopadov\_vs@nlmk.com)

**S.A. Zagainov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of "Metallurgy of Iron and Alloys" (zagainovski@mail.ru)

Received July 7, 2020

Revised August 3, 2020

Accepted October 26, 2020