

УДК 669.1: 658.5

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В
УСЛОВИЯХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»**

**THE USE OF STATISTICAL MODELLING TO JUSTIFY A RATIONAL TECHNOLOGY
OF STEEL PRODUCTION IN THE CONDITIONS OF JSC URAL STEEL**

©Шановалов А. Н.

канд. техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Новотроицк, Россия, alshapo@misis.ru

©Shapovalov A.

Ph.D., National University of Science and Technology «MISIS»
Novotroitsk, Russia, alshapo@misis.ru

Аннотация. В условиях АО «Уральская Сталь» наиболее затратной технологической задачей при производстве высококачественной стали является обеспечение требуемого содержания серы. Выполнен анализ удаления серы в процессе производства высококачественной стали в технологических условиях АО «Уральская Сталь». Установлено повышение содержания серы в чугуне на 0,007-0,010% от выпуска из доменной печи до заливки в дуговую сталеплавильную печь. Обоснована необходимость предварительной десульфурации чугуна перед его заливкой в дуговую сталеплавильную печь. Разработана методика расчета затрат на десульфурацию чугуна, выплавку и ковшовую обработку стали в зависимости от качества исходной шихты по содержанию серы. В основу методики положены материальные и тепловые балансы процессов, а также статистические закономерности поведения серы при десульфурации чугуна, в процессах выплавки и ковшовой обработки стали. Создана программа расчета суммарных издержек на производство стали заданного качества, позволяющая оптимизировать технологию производства стали с требуемым содержанием серы с учетом достижения минимальных издержек производства. Приведены результаты оптимизации технологии выплавки высококачественной стали с использованием десульфурации чугуна в условиях ОАО «Уральская сталь». В ценовых условиях 2014 года, при среднем содержании серы в чугуне из доменного цеха 0,019%, минимальные издержки на производство стали с содержанием серы 0,005% в ЭСПЦ (при доле чугуна в металлошихте 40%) обеспечиваются при организации внепечной десульфурации чугуна до содержания серы 0,006%. При ориентировочных затратах на строительство установки по внедоменной десульфурации чугуна в 0,5 млрд. руб., срок окупаемости в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» составит менее 5 лет.

Abstract. In the conditions of JSC Ural Steel, the most costly technological task in the production of high-quality steel is to provide the required sulfur content. The analysis of the sulfur removal in the production of high quality steel in the technological conditions of JSC Ural Steel

was performed. An increase in the sulfur content of the pig iron at 0,007-0,010% of the tapping from the blast furnace until used in an electric arc furnace was founded. The need for preliminary hot metal desulphurization before pouring in the electric arc furnace was justified. The method of calculating the cost of hot metal desulphurization, and the performance of the electric arc furnaces and ladle-furnace, depending on the quality of the initial charge on the sulfur content was developed. The methodology is based on material and thermal balances of processes, as well as statistical patterns of sulfur behavior during the hot metal desulphurization, the steel smelting in the electric arc furnaces and ladle-furnace. A program has been created for calculating the total costs for the production of steel of the required quality, which makes it possible to optimize the technology of steel production with the required sulfur content, taking into account the achievement of minimum production costs. The results of optimization technology of smelting high quality steel with using hot metal desulphurization at JSC Ural Steel were presented. In price terms in 2014, with an average sulfur content of the pig iron from the blast furnace 0.019 %, the minimum cost of production of steel with a sulfur content of 0.005% (with the share of liquid pig iron in the metal stock to 40%) are provided at the organization ladle hot metal desulphurization to a sulfur content of 0.006%. With an estimated cost of building an installation for the hot metal desulphurization at 0.5 billion rubles, the payback period under conditions of JSC Ural Steel will be less than 5 years.

Ключевые слова: десульфурация чугуна, доменная плавка, электродуговая плавка, ковшовая обработка стали, высококачественная сталь.

Keywords: hot metal desulphurization; blast-furnace melt; electric-arc-furnace melt; ladle treatment of steel, high quality steel.

Сталь является важнейшим конструкционным материалом для машиностроения, транспорта, строительства и прочих отраслей народного хозяйства. В последние 15-20 лет требования новых отраслей техники к качеству стали многих марок резко возросли и продолжают возрастать. Поэтому одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед металлургами, является получение конкурентоспособной продукции высокого качества, удовлетворяющего потребностям рынка.

Конкурентоспособность металлопродукции при сопоставимых показателях ее качества определяется суммарными издержками на производство. Последние напрямую зависят от технических и технологических возможностей производства.

АО «Уральская Сталь» производит листовой прокат из высококачественных низкоуглеродистых низколегированных сталей по технологической цепочке, включающей выплавку чугуна в доменных печах, получение стального полупродукта в электродуговых печах емкостью 120 т (ДСП) из чугуна и лома, ковшовую обработку стали на установке «ковш-печь» (УКП) и вакууматоре, непрерывную разливку и прокатку.

Имеющиеся в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) АО «Уральская Сталь» технологические возможности позволяют выплавлять металл, удовлетворяющий самым высоким требованиям. При этом, затраты на производство увеличиваются пропорционально росту требований к качеству стали по содержанию в ней серы и фосфора.

В условиях АО «Уральская Сталь» заданное содержание фосфора в стали (менее 0,010%) обеспечивается в процессе электродуговой плавки основным окислительным шлаком. Поэтому наиболее затратной технологической задачей является обеспечение требуемого содержания серы в стали.

Как известно, удаление серы из металла сопряжено с дополнительными технологическими трудностями и затратами на всех этапах металлургического передела [1-6]: десульфурация в доменной печи связана с повышенными расходами кокса и флюса, что ухудшает технико-экономические показатели плавки, а в сталеплавильных агрегатах удаление серы сопряжено с увеличением продолжительности плавки, расходов энергии и различных материалов, что значительно повышает себестоимость готовой стали. Так, в условиях АО «Уральская Сталь», несмотря на относительно невысокий уровень содержания серы в передельном чугуна (менее 0,020%), задача достижения требуемого содержания серы в стали решается в три стадии: в ДСП, в ковше на выпуске и при обработке на У КП. Причем, учитывая низкие показатели по десульфурации стали в ДСП и на выпуске, основная нагрузка по удалению серы приходится на У КП [6]. При этом из теории ковшовой обработки известно, что при удалении серы из чугуна создаются существенно лучшие условия по сравнению с условиями десульфурации стали [7-10]. Резонно предположить, что включение в технологическую цепочку выплавки стали процесса десульфурации чугуна облегчит трудоемкость обработки стали на У КП и обеспечит снижение суммарных затрат на передел.

Необходимость предварительной десульфурации чугуна перед его заливкой в ДСП подтверждается данными о динамике содержания серы в чугуна от выпуска из доменной печи до заливки в ДСП. Так, по данным химического анализа 10 проб чугуна, отобранных из ковшей перед заливкой в ДСП, содержание серы составляло 0,019-0,025% [11]. При этом, содержание серы в чугуна на выпуске по отчетным данным доменного цеха составляло 0,012-0,015%. Таким образом, несоответствие содержания серы в чугуна, определенное на выпуске и в пробах взятых непосредственно перед заливкой в ДСП, объясняющееся несовершенством применяемой методик отбора проб на выпуске из доменных печей, а также переходом серы из шлака в чугун в процессе транспортировки, составляет 0,007-0,010 %.

Таким образом, фактические содержания серы в чугуна, применяемом в ДСП при выплавке стали, превышают отчетные данные в 1,5-2,0 раза, что подтверждает актуальность вопроса о внедоменной десульфурации чугуна в ЭСПЦ.

Для решения вопроса о целесообразности внедоменной десульфурации чугуна перед сталеплавильным переделом в условиях АО «Уральская Сталь» была разработана методика расчета затрат на десульфурацию чугуна, а также показателей работы ДСП и У КП в зависимости от качества исходной шихты по содержанию серы. В основу данной методики положены материальные и тепловые балансы процессов, а также статистические закономерности поведения серы при десульфурации чугуна, в процессах выплавки и ковшовой обработки стали, полученные в результате анализа производственных данных о работе ЭСПЦ за 2008-2012 годы [4, 6, 11]. Расчеты проводили для стали 09Г2С с конечным содержанием серы 0,005% в сравнении с усредненными показателями производства за 2014 год, в течение которого использовался чугун с содержанием серы 0,019%.

В расчете стоимости внедоменной десульфурации чугуна определялись суммарные затраты на реагент, по переделу, а также учитывались потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком и снижение температуры чугуна при обработке (учитывались в расчете показателей работы ДСП). Поскольку на АО «Уральская Сталь» отсутствуют технические возможности для внедоменной обработки чугуна, то при определении затрат на передел исходили из литературных данных и зависимостей [12, 13].

В качестве реагентов для десульфурации в расчете принимали гранулированный магний и карбид кальция, обеспечивающие снижение содержания серы в чугуна до 0,005 %.

Результаты расчета затрат на десульфурацию чугуна (от 0,019% до заданного содержания серы) представлены на Рисунке 1.

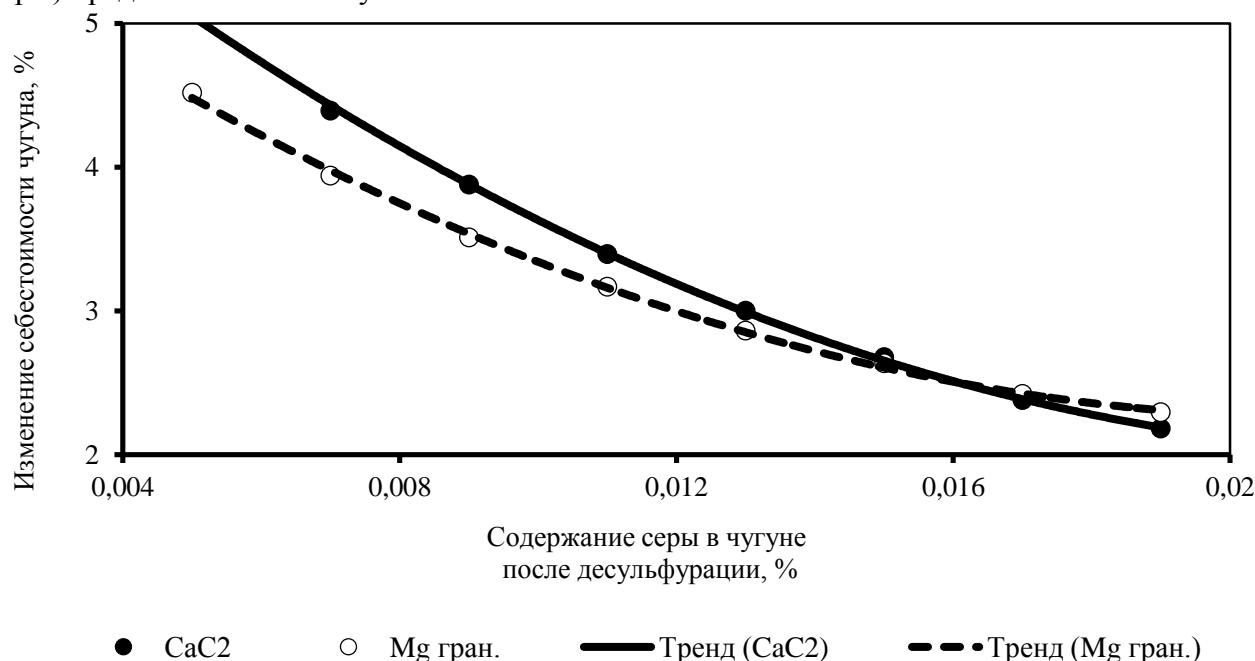


Рисунок 1. Изменение себестоимости чугуна (% от базового уровня) в зависимости от глубины десульфурации

Таким образом, при удалении серы из чугуна от 0,019% до 0,015% и менее, оптимальным вариантом десульфурации является обработка чугуна гранулированным магнием, вдуваемым в токе воздуха. Применение карбида кальция имеет более высокую сравнительную эффективность только при удалении серы до 0,016 % (от базового уровня в 0,019%), однако такой режим внедоменной десульфурации неэффективен из-за больших условно-постоянных расходов по переделу.

Методика расчета показателей выплавки стали в ДСП с заданным содержанием серы и издержек на ее производство предусматривает расчет требуемой основности шлака, расходов электроэнергии, кислорода, шлакообразующих, огнеупоров, электродов, а также производительности, что, в конечном итоге, позволяет определить себестоимость стали в зависимости от глубины удаления серы и содержания серы в чугуне (Рисунок 2).

Представленные на Рисунке 2 результаты расчета иллюстрируют рост себестоимости стали с повышением требований по содержанию серы, особенно при повышенных содержаниях серы в чугуне. Это связано с необходимостью поддержания более высокой основности шлака, что отрицательно влияет на показатели электроплавки. При этом возможности десульфурации металла в ДСП существенно ограничены, что и предопределяет необходимость проведения ковшевой десульфурации.

В методике расчета показателей ковшевой обработки стали и издержек на ее проведение определялась требуемая основность шлака, продолжительность обработки, расходы электроэнергии, твердой шлаковой смеси (ТШС), карбида кальция, легирующих и алюминия на обработку стали. Результаты расчета затрат на ковшевую десульфурацию стали, приведенные на Рисунке 3, иллюстрируют рост издержек на производство стали

заданного качества с повышением содержания серы в металле, подвергаемом ковшевой обработке.

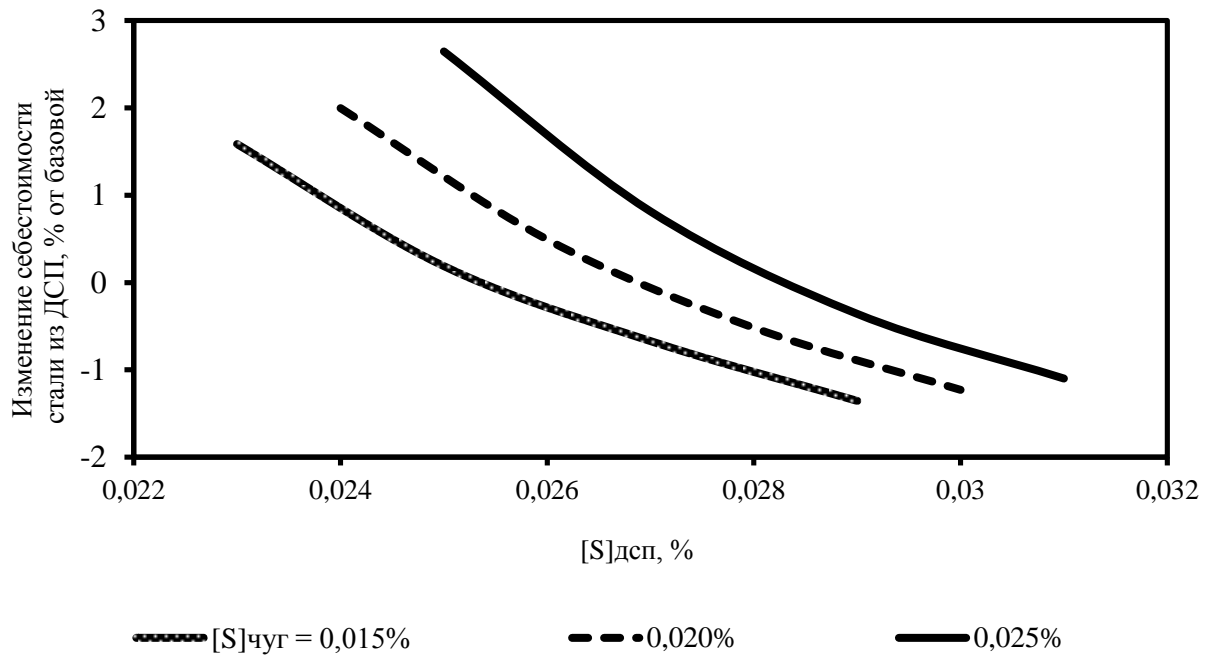


Рисунок 2. Влияние содержания серы в металле на выпуске из ДСП ([S]дсп) на себестоимость стали в ценовых условиях 2014 года

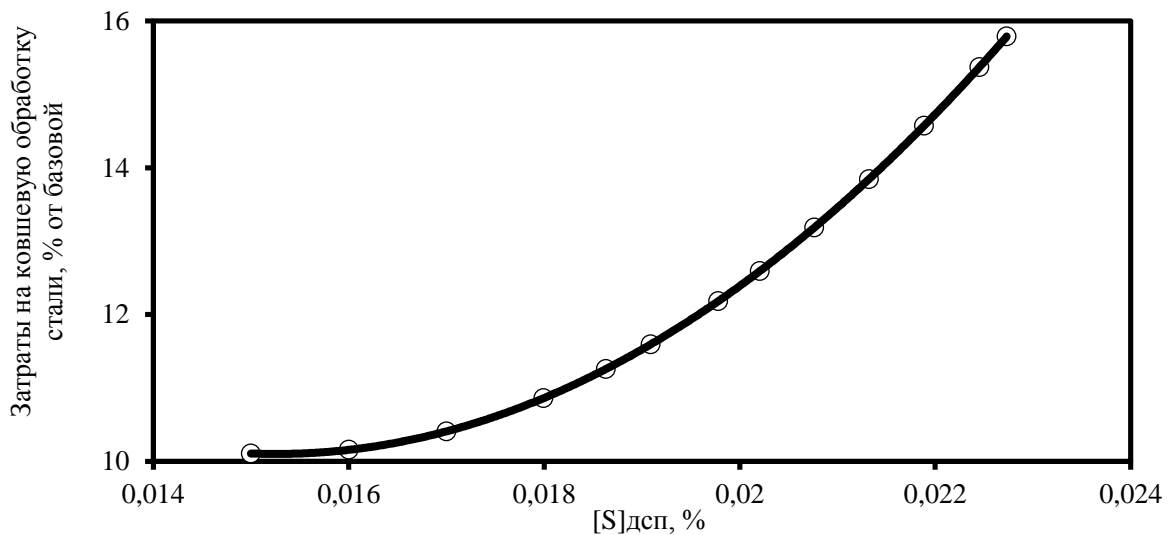


Рисунок 3. Влияние содержания серы в металле на выпуске из ДСП ([S]дсп) на величину затрат при ковшевой десульфурации стали до уровня серы 0,005%

На основе разработанных методик определения затрат на внедоменную десульфурацию чугуна, выплавку и ковшевую обработку стали, создана программа расчета суммарных издержек на производство стали заданного качества, позволяющая оптимизировать технологию производства стали с требуемым содержанием серы с учетом достижения минимальных издержек производства. Результаты расчета суммарных затрат на выплавку стали с содержанием серы 0,005% в ЭСПЦ при различной степени внедоменной десульфурации чугуна представлены на Рисунке 4.

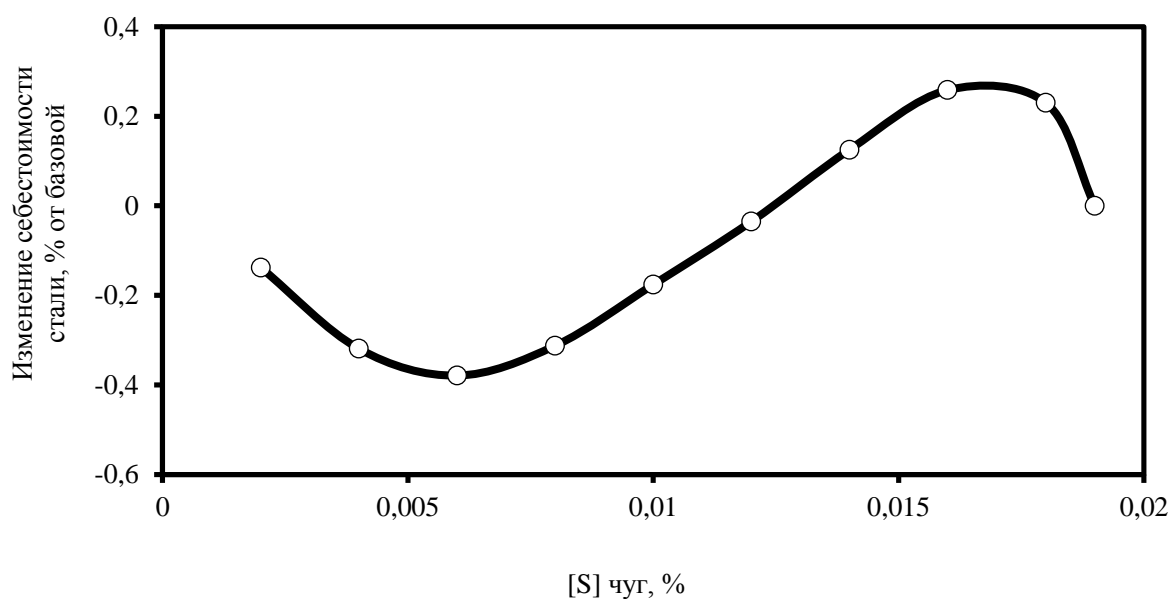


Рисунок 4. Изменение себестоимости стали с содержанием серы 0,005% в зависимости от содержания серы в передельном чугуне

Оптимизация суммарных издержек на выплавку стали с $[S]=0,005\%$ в ЭСПЦ с учетом внедоменной десульфурации чугуна позволяет определить рациональный, с экономической и технологической точек зрения, уровень содержания серы в передельном чугуне (Рисунок 4). В ценовых условиях 2014 года, при среднем содержании серы в чугуне из доменного цеха 0,019%, минимальные издержки на производство стали с содержанием серы 0,005% в ЭСПЦ (при доле чугуна в металлошихте 40%) обеспечиваются при организации внепечной десульфурации чугуна до содержания серы 0,006%. Параметры текущего и рационального технологического режимов выплавки стали с содержанием серы 0,005% представлены в Таблице.

Таблица.

ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ С
 СОДЕРЖАНИЕМ СЕРЫ 0,005%
 ПРИ РАЗЛИЧНОМ КАЧЕСТВЕ ЧУГУНА В ЦЕХАХ 2014 г

Параметр	Вариант технологии выплавки стали с [S] = 0,005 %	
	Базовый	Рациональный
<i>Внепечная десульфурация чугуна гранулированным магнием</i>		
[S]чуг из миксера, %	0,019	0,019
Расход Mg гран., кг/т	-	0,82
Степень десульфурации, %	-	68,4
[S]чуг после обработки, %	-	0,006
Затраты на обработку, % от себестоимости чугуна	-	4,2
Себестоимость чугуна, %	100	104,2
<i>Показатели плавки в ДСП (по стандартной технологии)</i>		
Доля чугуна, % / [S]чуг, %	40 / 0,019	40 / 0,006
Доля лома, % / [S]лом, %	60 / 0,030	60 / 0,030
[S] в расплаве, %	0,026	0,020
[S] _{ДСП} перед выпуском, %	0,023	0,018
Основность шлака CaO/SiO ₂	2,5	2,5
Степень десульфурации, %	11,6	11,00
Себестоимость металла из ДСП (Сб _{ДСП}) с учетом затрат на обработку чугуна, %	100	101,7
<i>Десульфурация на выпуске (по стандартной технологии)</i>		
[S]в ковше после выпуска, %	0,020	0,016
Степень десульфурации, %	12,25	11,95
<i>Показатели работы У КП</i>		
[S] исх, %	0,020	0,016
[S] троб, %	0,005	0,005
Требуемая основность шлака CaO/SiO ₂	2,6	2,4
Степень десульфурации, %	74,8	68,7
Себестоимость обработки на У КП, % от Сб _{ДСП}	12,60	10,34
Себестоимость стали (Сб _{ст}), % от базовой	100	99,64
Изменение Сб _{ст} , %	-	-0,36

Разработанная технология, предусматривающая проведение предварительной десульфурации чугуна, позволит снизить трудоемкость обработки стали в ДСП и на У КП, и получить высококачественную сталь с минимальными издержками. При ориентировочных затратах на строительство установки по внедоменной десульфурации чугуна в 0,5 млрд. руб, срок окупаемости в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» составит менее 5 лет.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проекту № 11.2054.2017/4.6 в рамках государственного задания на 2017-2019 гг.

Список литературы:

1. Серов Ю. В., Михалевич А. Г. Оценка эффективности повышения качества передельного чугуна в соответствии с требованиями сталеплавильного производства // *Металлург.* 1982. №2. С. 9-12.
2. Старов Р. В., Емельянов И. Я., Адаменко Л. П. Технико-экономическая эффективность применения обессеренного чугуна при выплавке стали в 350-тонных конвертерах // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 1982. №3. С. 12-14.
3. Антипов И. С., Мещеряков А. А., Невмержицкий Е. В. и др. Повышение качества чугуна - одна из основных задач производства качественной стали // *Сталь.* 1988. №7. С. 7-12.
4. Шаповалов А. Н., Кропотов В. К. Оптимальное содержание серы в чугуне для внедоменного обессеривания // *Металлург.* 1997. №12. С. 14.
5. Шаповалов А. Н., Кропотов В. К., Дружков В. Г. Рациональная степень десульфурации чугуна в доменной печи с учетом последующей внеагрегатной обработки // *Теория и технология металлургического производства.* Вып. 1. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 10-15.
6. Шаповалов А. Н. Разработка сквозной технологии производства стали заданного качества в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Металлург.* 2012. №2. С. 41-43.
7. Красавцев Н. И., Корнеев Ю. А., Мачикин В. И., Красавцев И. Н. Внедоменная десульфурация чугуна. Киев: Техника, 1975. 120 с.
8. Борнацкий И. И., Мачикин В. И., Живченко В. С. и др. Внепечное рафинирование чугуна и стали. Киев: Техника, 1979. 168 с.
9. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. М.: Металлургия, 1992. 336 с.
10. Zhang M., Zeng J. H. Study on Refining Technology of Low-Sulfur Steel // *Advanced Materials Research.* 2012. V. 418-420. P. 196-200.
11. Шаповалов А. Н. Эффективность десульфурации чугуна при производстве высококачественной стали в условиях ОАО «Уральская Сталь» // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.* 2013. №1. С. 34-37.
12. Никулин А. Ю. Математическое моделирование кинетики растворения реагентов при внепечной обработке черных металлов: дисс. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 1997. 340 с.
13. Ганчев А. В., Гонсалес О., Чижикова В. М. и др. К математической модели внепечной десульфурации чугуна // *Известия вузов. Черная металлургия.* 1992. №7. С. 16-19.

References:

1. Serov, Yu. V., & Mikhalevich, A. G. (1982). Estimating the efficiency of improving the quality of pig iron in accordance with the requirements of steelmaking. *Metallurg*, (2), 9-12. (in Russian)
2. Starov, R. V., Yemelyanov, I. Ya., & Adamenko, L. P. (1983). Technical and economic efficiency of the use of desulfurized cast iron for steel smelting in 350-ton converters. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (3), 12- 14. (in Russian)
3. Antipov, I. S., Meshcheryakov, A. A., Nevmerzhitsky, E. V., & al. (1988). Improving the quality of cast iron is one of the main tasks of producing high-quality steel. *Stal*, (7), 7-12. (in Russian)
4. Shapovalov, A. N., Kropotov, & V. K. (1997). Optimal content of sulfur in cast iron for non-domain desulfurization. *Metallurg*, (12), 14. (in Russian)

5. Shapovalov, A. N., Kropotov, V. K., & Druzhkov, V. G. (2001). Rational degree of desulphurization of pig iron in a blast furnace with allowance for subsequent extra-aggregate processing. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. Vyp. 1. Magnitogorsk, MGTU, 10-15.* (in Russian)
6. Shapovalov, A. N. (2012). Development of the through technology for the production of steel of specified quality in the conditions of JSC Ural Steel. *Metallurg, (2), 41-43.* (in Russian)
7. Krasavtsev, N. I., Korneev, Yu. A., Machikin, V. I., & Krasavtsev, I. N. (1975). Extra-Domain Desulphurization of Cast Iron. Kiev, Tekhnika, 120. (in Russian)
8. Bornnitsky, I. I., Machikin, V. I., Zhivchenko, V. S., & al. (1979). Vnepechnoe refining of cast iron and steel. Kiev, Tekhnika, 168. (in Russian)
9. Kudrin, V. A. (1992). Out-of-furnace treatment of iron and steel. Moscow, Metallurgiya, 336. (in Russian)
10. Zhang, M., & Zeng, J. H. (2012). Study on Refining Technology of Low-Sulfur Steel. *Advanced Materials Research, 418-420, 196-200.*
11. Shapovalov, A. N. (2013). Efficiency of the desulfurization of cast iron in the production of high-quality steel in the conditions of JSC Ural Steel. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal, (1), 34-37.* (in Russian)
12. Nikulin, A. Yu. (1997). Mathematical modeling of kinetics of dissolution of reagents for out-of-furnace treatment of ferrous metals: Dr. Diss. Magnitogorsk, MGMA, 340. (in Russian)
13. Ganchev, A. V., Gonzalez, O., Chizhikova, V. M., & al. (1992). To the mathematical model of out-of-furnace desulphurization of cast iron. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya, (7), 16-19.* (in Russian)

*Работа поступила
в редакцию 16.10.2017 г.*

*Принята к публикации
20.10.2017 г.*

Ссылка для цитирования:

Шаповалов А. Н. Использование статистического моделирования для обоснования рациональной технологии производства стали в условиях АО «Уральская Сталь» // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №11 (24). С. 227-235. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/shapovalov> (дата обращения 15.11.2017).

Cite as (APA):

Shapovalov, A. (2017). The use of statistical modelling to justify a rational technology of steel production in the conditions of JSC Ural Steel. *Bulletin of Science and Practice, (11), 227-235*