

УДК 669.162.463.2:721.4

**Зборщик А.М. /д.т.н./**

Донецкий НТУ

**Писмарев К.Е. /к.т.н./**

ПАО «Алчевский МК»

**Куберский С.В. /к.т.н./**

Донбасский ГТУ

## Анализ результатов десульфурации чугуна смесью гранулированного магния и порошкообразной флюидизированной извести

*Проанализированы результаты десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах кислородно-конвертерного цеха. Показано, что при десульфурации чугуна до содержания серы 0,020–0,030 % продувкой смесью гранулированного магния и порошкообразной флюидизированной извести в крупных заливочных ковшах увеличение удельного расхода извести для повышения степени десульфурации металла нецелесообразно. Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** чугун, внедоменная десульфурация, крупный заливочный ковш, гранулированный магний, флюидизированная известь

*The results of hot metal desulphurization in 300-t charging ladles of BOF shop are analyzed. It has been shown that during hot metal desulphurization to final sulphur content 0,020 – 0,030% by injection of the mixture of granulated magnesium and powder fluidized lime in high volume charging ladles the rise of specific lime consumption to increase metal desulphurization rate is not expedient.*

**Keywords:** pig iron, out-of-furnace desulphurization, high volume charging ladle, granulated magnesium, fluidized lime

В кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) ПАО «Алчевский МК» (АМК) эксплуатируются два 300-т конвертера комбинированного дутья, вблизи каждого из которых расположены отделения десульфурации чугуна (ОДЧ) в 300-т заливочных ковшах продувкой смесью гранулированного магния и порошкообразной флюидизированной извести. Оборудование ОДЧ и организация работ по десульфурации чугуна в ККЦ описаны в работе [1].

ОДЧ в ККЦ АМК были спроектированы для понижения содержания серы в чугуне от 0,020–0,030 до 0,005 %. Эффективность использования десульфураторов в этих условиях проанализирована в работах [2–4]. Показано, что вдуваемая вместе с магнием в металл известь не оказывает существенного влияния на результаты обработки. Поэтому, при глубокой десульфурации чугуна с исходным содержанием серы 0,020–0,030 % экономически целесообразны такие мероприятия, как отказ от продувки чугуна флюидизированной известью после ввода в расплав расчетного количества магния и замена ее продувкой азотом через пористые пробки в днище ковша или погружаемые в металл фурмы, а также переход к инъектированию гранулированного магния в чугун без добавок.

В настоящее время ОДЧ в ККЦ АМК используются, преимущественно, для понижения содержания серы в чугуне от 0,040–0,070 до 0,020–0,030 %.

Авторами работы [3] проанализирована зависимость расхода извести на удаление 0,001 % серы от концентрации серы в чугуне. Установлено, что при

содержании серы в чугуне 0,020–0,030 % расход извести на удаление 0,001 % серы при продувке порошкообразной флюидизированной известью в 300-т заливочных ковшах уменьшается до 0,444–0,329 кг/т. Продувка чугуна флюидизированной известью после ввода в металл расчетного количества магния может сопровождаться значительным увеличением степени десульфурации металла. Поэтому вопрос о рациональном соотношении расходов гранулированного магния и флюидизированной извести на десульфурацию чугуна в нынешних условиях эксплуатации ОДЧ ККЦ АМК требовал дополнительного анализа.

Для оценки влияния удельного расхода флюидизированной извести на результаты десульфурации чугуна в настоящей работе использована следующая методика.

Известно, что процессы десульфурации при обработке чугуна магнием и при продувке его порошкообразной известью с достаточной точностью могут быть описаны кинетическими уравнениями реакции первого порядка относительно концентрации серы в металле [5–8]. Поэтому при обработке чугуна смесью гранулированного магния и флюидизированной извести скорость десульфурации металла, согласно принципу аддитивности, должна описываться уравнением

$$-dS / dt = (k + k_1)S, \quad (1)$$

где  $S$  – концентрация серы в чугуне, %;  $t$  – время, с;  $k$  и  $k_1$  – константы скорости реакций десульфурации чугуна магнием и известью, с<sup>-1</sup>.

Решение уравнения (1) может быть получено в виде

$$S_K = S_H e^{-(k+k_1)t} \quad (2)$$

где  $[S]_H$  и  $[S]_K$  – начальное и конечное содержание серы в металле, %.

При неизменной скорости подачи десульфураторов уравнение (2) можно привести к виду

$$S_K = S_H e^{-k_2 q_{Mg} - k_3 q_{изв}} \quad (3)$$

где  $q_{Mg}$  и  $q_{изв}$  – удельные расходы магния и флюидизированной извести, кг/т чугуна.

Подставив уравнение (3) в выражение для расчета степени десульфурации чугуна

$$D = (S_H - S_K) / S_H \quad (4)$$

получим

$$D = 1 - e^{-k_2 q_{Mg} - k_3 q_{изв}} \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что степень десульфурации чугуна при продувке смесью гранулированного магния и флюидизированной извести определяется удельными расходами десульфураторов и не зависит от исходного содержания серы в металле.

Прологарифмировав правую и левую части уравнения (5), получим

$$-\ln(1-D) = k_2 q_{Mg} + k_3 q_{изв} \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что при неизменном удельном расходе магния или изменении его в узких пределах, зависимость степени десульфурации чугуна от удельного расхода флюидизированной извести должна описываться линейным уравнением в координатах  $-\ln(1-D) - q_{изв}$ .

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах, полученные при расходах магния 0,15–0,18 кг/т (среднее значение 0,164 кг/т) и соотношении суммарных расходов флюидизированной извести и гранулированного магния на обработку 3,08–14,4. При этом масса обрабатываемого чугуна изменялась от 251,8 до 289,2 т. Температура чугуна до обработки составляла 1343–1425 °С, после обработки 1318–1413 °С. Содержание серы в чугуне снижалось от 0,030–0,061 до 0,019–0,035 %.

В ходе исследования после погружения фурмы в ковш на заданную глубину в металл вдували 30–50 кг извести с расходом 36 кг/мин, а затем магния. При обработке чугуна магнием массовые скорости подачи – гранулированный магний с расходом 12 кг/мин. Необходимое соотношение между суммарными расходами магния и извести на десульфурацию металла достигалось путем изменения количества флюидизированной извести, которую вдували в заключительном периоде обработки после ввода в металл расчетного количества магния.

Обработка экспериментальных данных, представленных на рис. 1 с использованием пакета прикладных программ «Statgraphics Plus 3.0» показала, что из имеющихся в пакете стандартных статистических

моделей зависимость параметра  $\ln(1-D)$  от

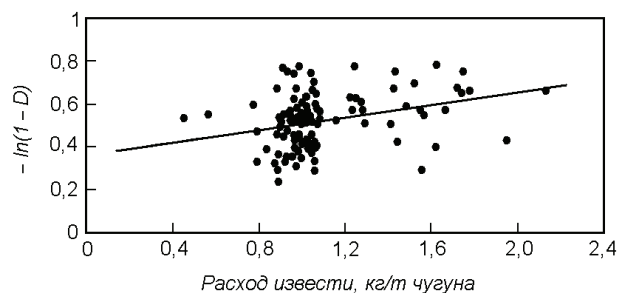


Рис. 1. Зависимость параметра  $\ln(1-D)$  от расхода флюидизированной извести при десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах

удельного расхода флюидизированной извести точнее других описывает линейная модель вида

$$-\ln(1-D) = 0,364303 + 0,144963 q_{изв} \quad (7)$$

На рис. 2 показана зависимость степени десульфурации чугуна от расхода гранулированного магния. Для ее построения использованы результаты десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах при обычном для ОДЧ ККЦ АМК соотношении суммарных расходов магния и извести на обработку 1:(5,9–6,1). При обработке этого массива ковшей содержание серы в чугуне понижали от 0,025–0,062 до 0,019–0,033 %.

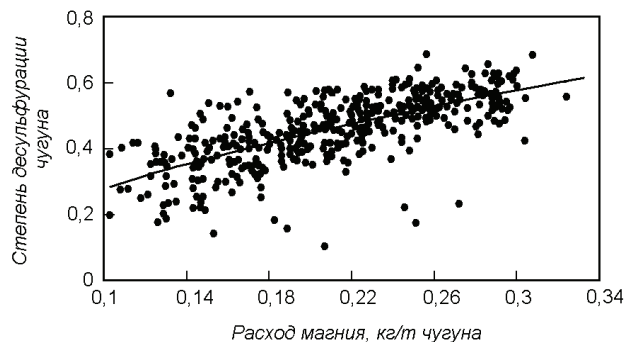


Рис. 2. Зависимость степени десульфурации чугуна от расхода гранулированного магния при соотношении суммарных расходов магния и извести на обработку 1:(5,9–6,1)

Статистическая обработка данных на рис. 2 показала, что зависимость степени десульфурации чугуна от удельного расхода гранулированного магния точнее других описывает статистическая модель «Square Root – X» вида

$$D = -0,134143 + 1,29717 q_{Mg}^{0,5} \quad (8)$$

Для определения зависимости массы шлака, который скачивают из ковшей после обработки в ОДЧ, от удельного расхода извести использованы результаты опытно-промышленного исследования десульфурации чугуна продувкой флюидизированной известью в 300-т заливочных ковшах [3].

Установлено, что при десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах АМК зависимость массы скачанного ковшевого шлака ( $M$ , кг/т чугуна) от расхода флюидизированной извести (рис. 3) может

быть описана уравнением

$$M = 15,122 + 2,72464q_{изв} \quad (9)$$

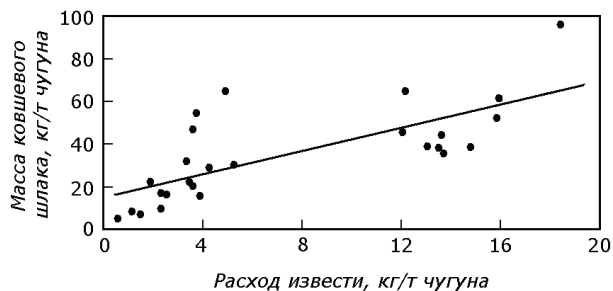


Рис. 3. Зависимость массы скачанного ковшевого шлака от расхода флюидизированной извести

При помощи зависимостей (7)–(9) оценивали затраты на десульфурацию чугуна при различных соотношениях между суммарными расходами гранулированного магнезия и флюидизированной извести на обработку. Эти затраты принимали равными суммой стоимости реагентов, а также стоимости чугуна, который теряется со скачаным шлаком в результате увеличения массы ковшевого шлака при десульфурации чугуна и содержания металла в нем.

В табл. 1 приведены результаты оценки затрат на десульфурацию чугуна при работе ОДЧ с различными соотношениями расходов гранулированного магнезия и флюидизированной извести. При этом рассматривались следующие варианты организации обработки:

- работа с соотношением расходов магнезия и извести, равным 1:3, которое в ОДЧ ККЦ АМК поддерживают во время вдувания магнезия в чугун;
- работа с соотношением суммарных расходов магнезия и извести, равным 1:6, которое обычно используется в ОДЧ ККЦ АМК;
- работа с повышенными расходами флюидизированной извести при соотношениях суммарных расходов магнезия и извести, равных 1:9 и 1:12.

Указанные в табл. 1 значения степени десульфурации чугуна рассчитывали с использованием уравнения (7).

При определении дополнительных потерь чугуна массу шлака, который скачивают из заливочных ковшей в случаях, когда десульфурация чугуна не проводится, и после десульфурации металла, оценивали с использованием уравнения (9). Согласно рекомендациям авторов работы [9], массовую долю чугуна в шлаке до обработки и после десульфурации смесью гранулированного магнезия и флюидизированной извести в расчетах принимали равной соответственно 30 и 45 %.

Стоимость гранулированного магнезия в расчетах принимали равной 28100 грн./т, импортной флюидизированной извести 5500 грн./т, флюидизированной извести собственного производства 1200 грн./т, передельного чугуна 2500 грн./т.

В табл. 2 приведены результаты оценки затрат на десульфурацию чугуна при работе с обычным для

условий ОДЧ ККЦ АМК соотношением суммарных расходов гранулированного магнезия и флюидизированной извести, равным 1:6. Расход магнезия, необходимый для достижения указанных в таблице значений степени десульфурации чугуна при таком соотношении расходов реагентов, рассчитывали согласно уравнению (8).

Таблица 1. Показатели работы ОДЧ при обработке чугуна с различными соотношениями расходов гранулированного магнезия и флюидизированной извести

Показатели	Соотношение расходов магнезия и извести			
	1:3	1:6	1:9	1:12
Расходы десульфураторов, кг/т: гранулированный магнезий	0,165	0,165	0,165	0,165
флюидизированная известь	0,495	0,99	1,485	1,98
Степень десульфурации чугуна	0,353	0,398	0,44	0,479
Дополнительные потери чугуна с ковшевым шлаком, кг/т	2,875	3,482	4,089	4,696
Затраты на десульфурацию чугуна, грн./т*	<u>14,55</u> 12,42	<u>18,79</u> 14,53	<u>23,03</u> 16,64	<u>27,27</u> 18,75

\* Числитель – при использовании импортной флюидизированной извести, знаменатель – при использовании извести собственного производства

Таблица 2. Показатели работы ОДЧ при обработке чугуна с соотношением расходов гранулированного магнезия и флюидизированной извести 1:6

Показатели	Степень десульфурации чугуна			
	0,353	0,398	0,44	0,479
Расходы десульфураторов, кг/т: гранулированный магнезий	0,141	0,168	0,196	0,223
флюидизированная известь	0,846	1,010	1,175	1,341
Дополнительные потери чугуна с ковшевым шлаком, кг/т	3,306	3,506	3,709	3,912
Затраты на десульфурацию чугуна, грн./т*	<u>16,88</u> 13,24	<u>19,05</u> 14,71	<u>21,24</u> 16,19	<u>23,43</u> 17,67

\* Числитель – при использовании импортной флюидизированной извести, знаменатель – при использовании извести собственного производства

Сравнение данных в табл. 1 и 2 показывает, что при десульфурации чугуна в крупных заливочных ковшах до содержания серы 0,020–0,030 % продувкой смесью гранулированного магнезия и порошкообразной флюидизированной извести повышение степени десульфурации металла путем увеличения расхода извести в заключительном периоде обработки эко-



номически не оправдано. Затраты на десульфурацию чугуна при этом увеличиваются при использовании как импортной флюидизированной извести, так и извести собственного производства.

Можно ожидать, что уменьшить затраты на десульфурацию чугуна позволит обработка с соотношением суммарных расходов магния и флюидизированной извести, равным 1:3. Поэтому целесообразно изучить эффективность десульфурации металла при инжентировании магния и извести в соотношении 1:(2,5–3), которое позволяет избежать закупоривания фурмы, без продувки известью в заключительном периоде обработки, а также с возможной заменой ее продувкой чугуна азотом через фурму или пористые пробки в днище заливочного ковша.

Таким образом, результаты приведенного выше анализа свидетельствуют о том, что при десульфурации чугуна до содержания серы 0,020–0,030 % продувкой смесью гранулированного магния и порошкообразной флюидизированной извести в крупных заливочных ковшах повышение степени десульфурации металла путем увеличения удельного расхода извести не целесообразно.

#### Библиографический список

1. Десульфурация чугуна в 300-т заливочных ковшах кислородно-конвертерного цеха / С.В. Куберский, А.М. Зборщик, Г.Я. Довгалюк и др. // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. – 2010. – № 4. – С. 9-12.
2. Эффективность современных технологий внедоменной десульфурации чугуна / А.М. Зборщик, С.В. Куберский, К.Е. Писмарев и др. // *Изв. вузов*.

*Черная металлургия*. – 2009. – № 11. – С. 10-12.

3. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах / А.М. Зборщик, С.В. Куберский, Г.Я. Довгалюк, К.В. Винник // *Сталь*. – 2011. – № 9. – С. 16-19.

4. Зборщик А.М., Куберский С.В., Косолап Н.В. Эффективность использования реагентов в современных процессах внедоменной десульфурации чугуна // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2011. – № 12. – С. 35-41.

5. Зборщик А.М. Анализ термодинамики и кинетики десульфурации чугуна магнием // *Сталь*. – 2001. – № 7. – С. 17-20.

6. Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок / А.М. Зборщик, В.А. Курганов, Ю.Б. Бычков и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.

7. Гульга Д.В., Пашкова З.И. Внедоменная обработка чугуна на заводе «Азовсталь» // *Сталь*. – 1977. – № 4. – С. 292-297.

8. Десульфурация чугуна мелкой известью в ковше / Эше В., Гауке М., Копеник Г.-И. и др. // *Черные металлы*. – 1963. – № 5. – С. 17-27.

9. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. – К.: Наукова думка, 2011. – 207 с.

**Поступила 21.01.2013**



#### К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ!

Поскольку наш журнал входит в перечень изданий, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ по техническим (Бюл. ВАК №5, 1999) и экономическим (Бюл. ВАК №6, 2000) наукам, редакция обращается к Вам с просьбой при подготовке статей учитывать требования **Постановления Президиума ВАК Украины №7-05/1 от 15.01.2003 “ПРО ПІДВИЩЕННЯ ВИМОГ ДО ФАХОВИХ ВИДАНЬ, ВНЕСЕНИХ ДО ПЕРЕЛІКІВ ВАК УКРАЇНИ”** (Бюл. ВАК №1, 2003), которыми предписывается:

”...3. Редакційним колегіям організувати належне рецензування та ретельний відбір статей до друку. Зобов'язати їх приймати до друку у виданнях, що виходитимуть у 2003 році та у подальші роки, лише наукові статті, які мають такі необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

4. Спеціалізованим ученим радам при прийомі до захисту дисертаційних робіт захищувати статті, подані до друку, починаючи з лютого 2003 року, як фахові лише за умови дотримання вимог до них, викладених у п. 3 даної постанови...”

Журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» читают практически на всех предприятиях металлургического комплекса Украины и СНГ, в десятках ВУЗов и НИИ, а также в ряде зарубежных стран, поэтому редакция еще раз обращается к авторам с просьбой тщательно вычитывать материалы перед отправкой в редакцию.

*Редакция журнала «Металлургическая и горнорудная промышленность»*

*Тел. (0562) 46-12-95, отв. секретарь (056) 744-81-66. E-mail: metinfo@metinform.dp.ua; [mgp@metalljournal.com.ua](mailto:mgp@metalljournal.com.ua)*