

С.А. Воденников <sup>(1)</sup>, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

С.А. Гаврилко <sup>(1)</sup>, профессор, к.т.н.

Г.А. Громак <sup>(1)</sup>, ассистент

Н.В. Личконенко <sup>(1)</sup>, ст. преподаватель

Ю.В. Мосейко <sup>(1)</sup>, ст. преподаватель

Ю.С. Гаврилко <sup>(2)</sup>, инженер II категории

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕРЫ МЕЖДУ ПРОДУКТАМИ ПЛАВКИ ПО ХОДУ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

<sup>(1)</sup> Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup> ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь», г.Запорожье

Наведено результати досліджень розподілу сірки між продуктами по ходу доменної плавки шляхом складання балансів. Встановлено, що найбільша кількість сірки надходить в доменну піч з коксом (до 88 %), а у витратних статтях найбільша кількість сірки переходить до шлаку (92...94 %). Якщо до доменної печі надходить шихта з підвищеним вмістом сірки, то для одержання низькосірчастого чавуну необхідно здійснити технологічні заходи, що сприяють підвищенню сіркопоглинальної спроможності шлаку.

Приведены результаты исследований распределения серы между продуктами по ходу доменной плавки путем составления балансов. Установлено, что наибольшее количество серы поступает в доменную печь с коксом (до 88 %), а в расходных статьях наибольшее количество серы переходит в шлак (92...94 %). Если в доменную печь поступает шихта с повышенным содержанием серы, то для получения малосернистого чугуна необходимо осуществить технологические мероприятия, способствующие повышению серопоглотительной способности шлака.

*Введение.* Высокие требования к качеству металла, получаемого в условиях форсированного хода доменных печей, работающих на агломерате и окатышах с оптимальным удельным расходом кокса, требуют изучения характера поведения серы, поступающей в печь с шихтовыми материалами [1].

*Анализ достижений.* Вопросу получения малосернистого чугуна в доменной печи посвящено значительное количество работ [2-8].

В работе [2] отмечается, что в доменной печи происходит передача значительного количества серы от кокса к продуктам плавки через газовую фазу. Наибольшее количество серы переходит из газовой фазы в шлак и металл в нижней части печи на участке «горизонт фурмы – распар». Такой обмен в значительной степени определяется характером распределения газов в печи, а газификация серы из кокса в основном зависит от тепловых условий в горне печи. Установлено, что из сернистых коксов, полученных при переработке донецких углей, при движении их в доменной печи к горизонту фурм газифицируется до 50 % серы.

Для более полного перевода серы в шлак необходимо создавать условия для хорошего поглощения серы из газов пустой породой агломерата, первичными, промежуточными и конечными шлаками. В соответствии с этим улучшению протекания процессов перехода серы в шлак и получения малосернистого чугуна способствует перевод печей на полностью офлюсованный агломерат с полным выводом сырого известняка из шихты.

Данными, полученными в производственных условиях [3], подтверждается, что при переводе доменных печей полностью на агломерат основностью 1,10...1,12 наблюдается значительное повышение коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком. Этому же способствуют повышенный нагрев дутья, применение природного газа и кислорода в дутье и связанное с внедрением новой технологии снижение удельного расхода кокса. В результате опытных плавов, при полном выводе сырого известняка из шихты за счет повышения основности агломерата создается возможность еще больше повысить значение коэффициента распределения серы в печи и, наряду с дальнейшим снижением расхода кокса и повышением производительности печи, снизить содержание серы в чугуне.

Как показали результаты исследований [3,4], при работе доменных печей на офлюсованном агломерате, унос серы с колошниковым газом уменьшился, но увеличился переход серы в шлак на всем пути его формирования, что позволило получить более высокое значение коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном. Поэтому содержание серы в чугуне снизилось как из-за уменьшения ее прихода, так и увеличения коэффициента распределения серы.

Данные выводы были полностью подтверждены анализом производственных данных по доменному цеху завода «Запорожсталь» за годы освоения производства офлюсованного агломерата и применения его в доменной плавке [5].

Улучшение процесса удаления серы из чугуна [6] достигается за счет увеличения числа выпусков и увеличения, в связи с этим, количества нижнего шлака, лучше контактирующего с чугуном. Основным фактором, позволяющим снизить содержание серы в чугуне, является улучшение состава шлака, приводящее к увеличению его серопоглотительной способности.

В работе [7] И.С. Куликовым проведен наиболее полный термодинамический анализ десульфурации чугуна в доменных печах и разработаны практические меры по повышению серопоглотительной способности шлака в условиях выплавки маломарганцовистого чугуна.

Обеспечение хорошей подвижности шлака в результате повышения в нем содержания магнезии с 3,75 до 4,28 % улучшило серопоглотительную способность шлака, повышая коэффициент распределения серы во всем интервале основности от 1,28 до 1,45 [8].

*Целью работы* является исследование распределения серы в доменной печи между продуктами плавки путем составления балансов по сере.

*Основная часть исследования.* Расчет баланса серы позволяет не только исследовать поведение ее в доменной печи, но и выполнить анализ распределения серы между шихтой, газом и продуктами плавки по ходу доменного процесса. Для проведения анализа был выбран период работы доменной печи № 5 ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» с 1991 по 2008 г.г.

По характеру поставок сырьевых и топливно-энергетических ресурсов на ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» данное исследование делили на два периода: первый (1991-1997 г.г.) характеризовался нестабильными поставками сырьевых материалов и природного газа и второй (1998-2008 г.г.), для которого условия поставок сырья и энергоносителей улучшились.

В первом периоде исследований наблюдали повышенный расход кокса (565...633 кг/т чугуна), а, следовательно, и повышенный приход серы в доменную печь – от 9,8305 до 10,9163 кг/т чугуна (табл. 1).

**Таблица 1 – Баланс серы по годам**

Статьи прихода серы	Расход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы		Статьи расхода серы	Выход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы	
			кг	%				кг	%
1991 г.									
Кокс	585	1,560	9,1260	88,70	Чугун	1000	0,021	0,2100	2,00
Агломерат	1470	0,072	1,0584	11,20	Шлак	520	1,860	9,6720	94,00
Окатыши ПГОК	400	0,022	0,0880		Уловленная пыль	43	0,400	0,1720	4,00
Руда железная	5	0,050	0,0025		Неуловленная пыль	24	0,300	0,0720	
Известняк доломитиз.	35	0,040	0,0140	0,10	Колошниковый газ (по разности – 1,58 %)			0,1629	
Всего:			10,2889	100,0	Всего:			10,2889	100,0
1992 г.									
Кокс	530	1,600	8,4800	86,30	Чугун	1000	0,021	0,2100	2,10
Агломерат	1553	0,072	1,1182	11,40	Шлак	505	1,830	9,2415	94,00
Руда железная	23	0,050	0,0115		Уловленная пыль	50	0,400	0,2000	3,90
Известняк обычный и доломитиз.	31	0,090	0,0350	2,30	Неуловленная пыль	30	0,300	0,0900	
Доменный присад	26	0,800	0,2080		Колошниковый газ (по разности – 0,90 %)			0,0890	
Всего:			9,8305	100,0	Всего:			9,8305	100,0

Продолжение табл. 1

Статьи прихода серы	Расход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы		Статьи расхода серы	Выход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы	
			кг	%				кг	%
1993 г.									
Кокс	565	1,700	9,6050	88,0	Чугун	1000	0,021	0,2100	1,90
Агломерат	1761	0,072	1,2679	11,87	Шлак	530	1,940	10,2820	94,20
Руда железная	23	0,050	0,0115		Уловленная пыль	33	0,400	0,1320	3,90
Окатыши ПГОК	74	0,022	0,0163		Неуловленная пыль	23	0,300	0,0690	
Известняк доломитиз.	39	0,040	0,0156	0,13	Колошниковый газ (по разности – 2,0 %)			0,2233	
Всего:			10,9163	100,0	Всего:			10,9163	100,0
2006 г.									
Кокс	502	1,450	7,2790	88,0	Чугун	1000	0,022	0,2200	2,70
Агломерат	1559	0,050	0,7795	10,50	Шлак	455	1,680	7,6440	92,10
Окатыши ПГОК	189	0,045	0,0850		Уловленная пыль	25	0,560	0,1400	5,20
Руда железная	55	0,050	0,0275		Неуловленная пыль	20	0,400	0,0800	
Известняк обычный	37	0,051	0,0189	1,50	Колошниковый газ (по разности – 2,58 %)			0,2143	
Руда 21-22 класса	11	0,040	0,0044						
Шлак Si-Mn	13	0,800	0,1040						
Всего:			8,2983	100,0	Всего:			8,2983	100,0

Продолжение табл. 1

Статьи прихода серы	Расход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы		Статьи расхода серы	Выход материала, кг/т чугуна	Содержание серы в материале, %	Количество серы	
			кг	%				кг	%
2007 г.									
Кокс	523	1,400	7,3220	87,9	Чугун	1000	0,022	0,2200	2,6
Агломерат	1555	0,050	0,7775	10,4		Шлак	461	1,650	7,6065
Окатыши ПГОК	138	0,045	0,0621		Уловленная пыль	29	0,560	0,1624	6,1
Руда железная	60	0,050	0,0300		Неуловленная пыль	22	0,400	0,0880	
Известняк обычный	38	0,051	0,0194	1,7	Колошниковый газ (по разности – 3,0 %)			0,2513	
Руда 21-22 класса	73	0,040	0,0292						
Шлак Si-Mn	11	0,800	0,0880						
Всего:			8,3282	100,0	Всего:			8,3282	100,0
2008 г.									
Кокс	486	1,420	6,9012	88,3	Чугун	1000	0,024	0,2400	3,1
Агломерат	1604	0,050	0,8020	11,2	Шлак	455	1,580	7,1890	92,0
Окатыши ПГОК	51	0,045	0,0230		Уловленная пыль	16	0,560	0,0896	4,9
Руда железная	99	0,050	0,0495		Неуловленная пыль	26	0,400	0,1040	
Известняк обычный	28	0,051	0,0143	0,5	Колошниковый газ (по разности – 2,5 %)			0,1930	
Руда 21-22 класса	24	0,040	0,0096						
Шлак Si-Mn	2	0,800	0,0160						
Всего:			7,8156	100,0	Всего:			7,8156	100,0

Для обеспечения в этих условиях выплавки чугуна с низким содержанием серы выполняли следующие технологические мероприятия:

- повышали основность шлака ( $CaO/SiO_2$ ) от 1,21 до 1,24;
- увеличивали содержание оксида магния ( $MgO$ ) в шлаке до 4,8...5,29 % за счет использования доломитизированного известняка;
- поддерживали повышенный нагрев горна: содержание кремния в чугуне составляло 0,96...1,15 %.

Выполненные технологические мероприятия способствовали переходу в шлак большего количества серы: содержание серы в шлаке было 1,83...1,94 % при повышенном выходе шлака (до 570 кг/т чугуна).

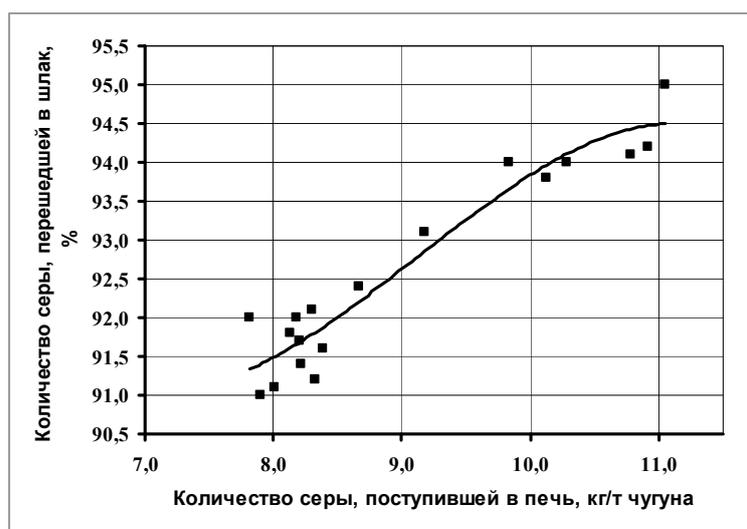
В условиях нестабильных поставок сырьевых и топливно-энергетических ресурсов при реализации перечисленных технологических мероприятий была обеспечена выплавка качественного чугуна: содержание серы в чугуне не превышало 0,020...0,023 %.

Второй период исследований (1998-2008 гг.) характеризуется более стабильными поставками сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. Поэтому для данного периода удельный расход кокса снизился до 486...523 кг/т чугуна.

В связи с этим приход серы в печь уменьшился до 8 кг/т чугуна, что способствовало уменьшению количества серы, перешедшей в шлак (91,2...92,1 %). Содержание серы в шлаке также уменьшилось до значений 1,58...1,68 %. В связи с выводом из состава шихты доменных печей доломитизированного известняка содержание  $MgO$  в шлаке уменьшилось до 3,97 %, что снизило его серопоглотительную способность и повлекло за собой рост содержания серы в чугуне до 0,022...0,024 %. Основность шлака была на уровне основности шлака первого периода исследований. Выход шлака во втором периоде снизился до 450...461 кг/т чугуна. Нагрев горна был нормальным: содержание кремния в чугуне - 0,77...0,88 %.

Таким образом, во втором периоде исследований условия удаления серы из чугуна были хуже, чем в первом, что объясняется снижением серопоглотительной способности шлака по вышеуказанным причинам.

На рис. 1 приведена зависимость изменения количества серы, переходящей в шлак, от общего количества серы, поступающей в доменную печь.



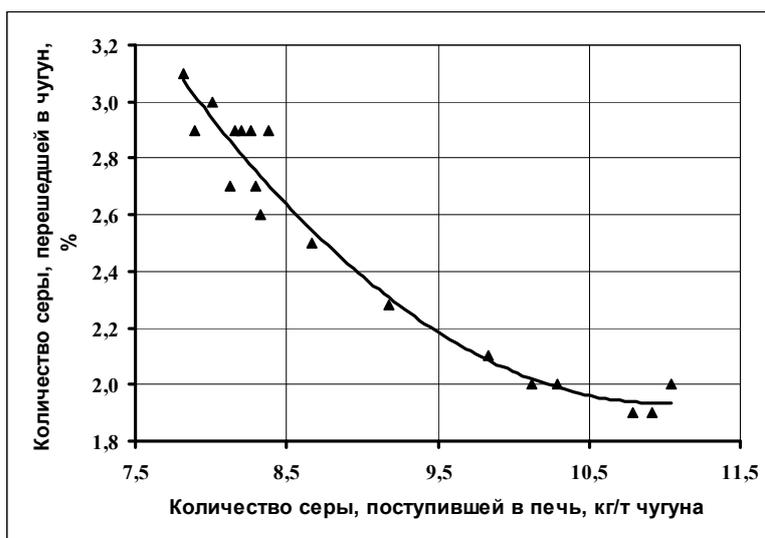
$$y = -0,1055 x^3 + 2,8843 x^2 - 24,99 x + 160,84; R^2 = 0,9196$$

Рисунок 1 – Зависимость количества серы, переходящей в шлак, от общего количества серы, поступающей в печь

Из данных рис. 1 видно, что чем больше серы вносится в доменную печь с шихтовыми материалами, тем больше ее переходит в шлак. Например, если количество серы, вносимой в печь, составляет до 9,0 кг/т чугуна, то в шлак переходит 91,0...92,0 % серы, а если в печь вносится 10,0...11,0 кг серы/т чугуна, то в шлак переходит 94 % серы.

На рис. 2 приведена зависимость количества серы, переходящей в чугун, от общего количества серы, поступающей в печь.

Следует отметить, что чем больше серы вносится в печь, тем меньше серы переходит в чугун, но с условием обязательного выполнения вышеперечисленных технологических мероприятий, повышающих серопоглотительную способность шлака.



$$y = 0,1127 x^2 - 2,4789 x + 15,564; R^2 = 0,9557$$

**Рисунок 2** - Зависимость количества серы, переходящей в чугун от общего количества серы, поступающей в печь

Характер кривой на рис. 2 подтверждает данные рис. 1: закономерности перехода серы в чугун зеркально отображают закономерности перехода ее в шлак.

При небольшом количестве серы, поступающей в доменную печь (7,8...8,4 кг/т), имеет место сравнительно резкое изменение характера кривой (рис. 2), что говорит об интенсивном уменьшении количества серы, перешедшей в чугун (с 3,0 до 2,6 %), то есть при увеличении прихода серы в печь на 1 % получено снижение количества серы, переходящей в чугун, на 0,05 %. При увеличении количества серы, вносимой в доменную печь с 10,4 до 11,0 кг, наоборот, наблюдается снижение интенсивности перехода серы в чугун - с 2,0 до 1,94 %. Следовательно, при увеличении прихода серы в печь на 1 % получено снижение количества серы, переходящей в чугун, на 0,01 %.

Таким образом, при небольшом поступлении серы в печь интенсивность снижения количества серы, перешедшей в чугун, в пять раз больше, чем при большем ее поступлении. Этим объясняется, во-первых, низкое содержание серы в чугуне (0,021 %), и, во-вторых, значительное насыщение шлака серой (до 1,94 %), чему способствовал переход серы в шлак в количестве 93,0...94,0 % за счет применения технологических мероприятий, позволяющих повысить серопоглотительную способность шлака.

#### *Выводы.*

1. Исследовано распределение серы в доменной печи между продуктами плавки путем составления балансов.

2. При поступлении в доменную печь с шихтовыми материалами более 9,0 кг серы/т чугуна необходимо осуществлять следующие технологические мероприятия в соответствии с ходом и состоянием печи:

- повышать основность шлака до 1,26;
- повышать содержание  $MgO$  в шлаке до 5,3 %;
- поддерживать повышенный нагрев горна.

Реализация перечисленных мероприятий при повышенном содержании серы в шихтовых материалах, поступающих в доменную печь, позволяет обеспечить выплавку передельного малосернистого чугуна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воловик Г. А.* Поведение серы в доменной печи. / Г. А. Воловик // Доменный процесс по новейшим исследованиям: сб. научн. трудов. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 184-201.
2. *Воловик Г. А.* Повышение эффективности ошлакования серы в доменной печи / Г. А. Воловик // *Металлургия и коксохимия*: темат. отрасл. сб. – К.: Техніка, 1968. – Вып. 13. – С. 93-99 (Металлургия чугуна).
3. *Воловик Г. А.* Снижение серы в передельном чугуне завода «Запорожсталь» в связи с совершенствованием технологии доменной плавки / Г. А. Воловик, Ю. М. Потебня // *Сталь*. – 1964. – № 4. – С. 296-299.
4. *Воловик Г. А.* Оценка действительного распределения серы между чугуном и шлаком в доменной печи / Г. А. Воловик // *Сталь*. – 1966. – № 5. – С. 398-404.
5. Поведение серы в доменной печи при полном выводе сырого известняка из шихты в условиях Юга / *Л. Д. Юрко*, Г. А. Воловик, Ю. М. Потебня, Е. П. Болкунов // *Сталь*. – 1965. – № 7. – С. 582-584.
6. Резервы повышения эффективности доменного производства / *Ю. М. Потебня*, В. Ф. Брагин, Р. Г. Рихтер [и др.] – Днепропетровск: Промінь, 1970. – 158 с.
7. *Куликов И. С.* Десульфурация чугуна / И. С. Куликов. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 306 с.
8. Дослідження знесірчувальної здатності шлаку доменної печі № 5 ВАТ «Запоріжсталь» / *С.А. Воденніков*, С.О. Гаврилко, І. А. Морозова [та ін.] // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2010. – № 4/1 (46). – С. 57-62.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2011 р.  
Рецензент, проф. М.Ф. Колесник