

**В.П.Корченко, Л.Г.Тубольцев, В.Ф.Поляков, А.С.Вергун, Н.И.Падун,
Т.С.Семькина, П.С.Лындя**

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ДЕСУЛЬФУРАЦИИ В КОНВЕРТЕРЕ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКИ

Определены и исследованы особенности процесса десульфурации, проведена оценка возможности кислородно–конвертерной плавки для обеспечения низкой концентрации серы в металле при переделе чугуна с содержанием серы до 0,010%.

Современное состояние вопроса.

Одной из технологических схем производства высококачественных сталей в кислородных конвертерах является сочетание предварительной десульфурации чугуна и последующего его передела [1]. При такой технологии возникают проблемы обеспечения на этапе конвертерной плавки содержания серы, достигнутого в результате предварительной обработки чугуна с одной стороны, а с другой стороны, создание условий для дальнейшей десульфурации металла в конвертере [2,3]. Для изучения особенностей процесса десульфурации металла в кислородном конвертере при переделе чугуна с низким содержанием серы на экспериментальной базе ИЧМ было проведено специальное исследование.

Методика исследований.

Исследовался вариант кислородно–конвертерной технологии с комбинированной продувкой кислородом сверху и подачей нейтрального газа через донные фурмы. Опытные плавки проводили в 1,5–т конвертере. Чугун расплавляли в 1,5–т дуговой электропечи. Известь вводили двумя добавками (с началом и по ходу продувки). Со второй добавкой извести вводили плавиковый шпат. Для подачи кислорода использовали односплоную верхнюю фурму с критическим диаметром сопла 8,3 мм. Для подачи нейтрального газа (азота) применяли трубчатые донные фурмы диаметром 3 и 4 мм в количестве 3–х штук. Положение верхней фурмы по ходу продувки составляло 800 мм от уровня спокойной металлической ванны. Пробы металла и шлака из конвертера отбирали зондом по ходу продувки либо при повалках. При отборе проб осуществляли измерение температуры металла.

Исследовались технологии конвертерной плавки с комбинированной продувкой, которые включали следующую совокупность заключительных этапов:

1. начало падения факела;
2. полное падение факела;
3. передув после полного падения факела;
4. продувка (промывка) металла нейтральным газом после передува;

5. продувка (промывка) металла нейтральным газом после полного падения факела.

Проводилось сравнительное исследование технологий, включающих заключительные этапы плавки 1→2→3→4 и 1→2→5. Начало падения факела определялось визуально с момента снижения интенсивности и светимости факела, т.е. является в некоторой степени субъективным параметром. Однако, название этого этапа плавки является общепринятым и широко используется в практике кислородно–конвертерного производства для оценки состояния конвертерной ванны. Полное падение факела определялось моментом исчезновения факела и бурного выделения черного дыма (этапа горения железа).

Длительность периода передувки после полного падения факела и периодов продувки нейтральным газом задавали в соответствии с планом проведения эксперимента. Время начала опытных плавки исчислялось с момента затопления донных фурм при подъеме конвертера.

Лабораторный конвертер характеризуется большими потерями тепла по ходу процесса, что учитывалось и при шихтовке плавки. Следует отметить, что в целом технологические процессы на всех исследуемых заключительных этапах проходили при таких значениях температурных параметров, которые являются характерными для реакций и кинетики сталеплавильных процессов.

Подробно особенности методики экспериментальных исследований представлены в опубликованной литературе [3].

Результаты исследований.

Одной из главных характеристик металла на заключительных этапах плавки является содержание углерода. Исходное содержание углерода в чугуна находилось в пределах 3,55–4,32%. Динамика изменения концентрации углерода в металле на заключительных этапах плавки представлена на рис. 1.

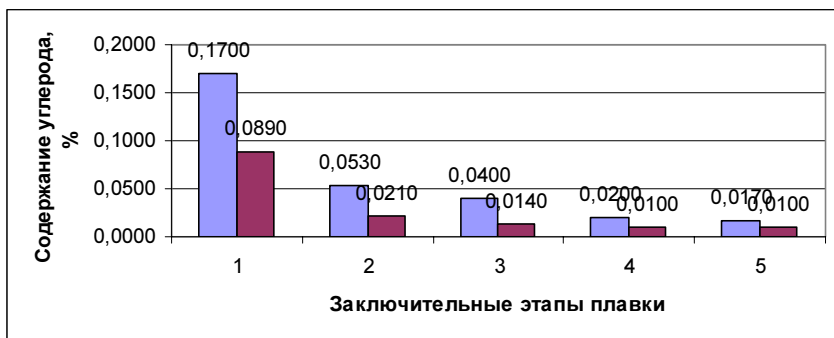


Рис.1. Изменение содержания углерода в металле по заключительным этапам плавки.

На всех представленных рисунках левый столбик обозначает максимальное значение из совокупности данных, а правый столбик – минимальное значение.

Следует отметить, что на заключительных этапах опытных плавков получены низкие содержания углерода в металле. В таких условиях процесс шлакообразования (растворение извести) полностью завершается, что обеспечивает наиболее благоприятные условия для процесса удаления серы из металла.

Динамика изменения концентрации серы в металле на заключительных этапах плавки представлена на рис.2.

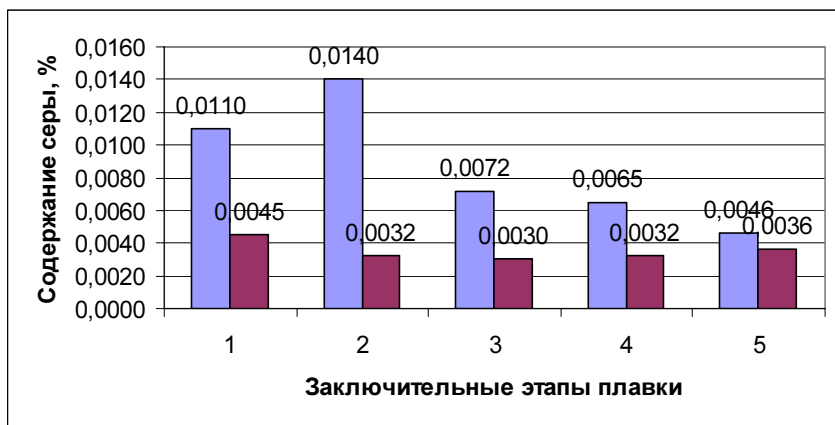


Рис.2. Изменение содержания серы в металле по заключительным этапам плавки.

В начале падения факела содержание серы в металле выше, чем в исходном чугуна (0,0045–0,0110 % против 0,0020–0,0093%). В период падения факела среднее содержание серы продолжает увеличиваться и при полном исчезновении факела находится в пределах 0,0032–0,0140%. В процессе передувки и продувки (промывки) металла нейтральным газом через донные фурмы без подачи кислорода сверху содержание серы в металле снижается до 0,0030–0,0072%.

В целом, в условиях эксперимента сера вносилась в конвертерную ванну с чугуном, металлоломом и известью. Содержание серы в используемой партии извести составляло 0,049%. Расход извести на опытных плавках был постоянным и составлял 100 кг на плавку. Таким образом, можно считать постоянным и количество серы, которое вносилось с известью.

Расход лома на большинстве плавков составлял 75 кг. На некоторых плавках он снижался до 40 кг или увеличивался до 100 кг. Лом состоял из разрезанных колесной выжимки и железнодорожных колес, обрезки толстого листа и труб. Максимальное содержание серы в таком металлоломе

не превышает 0,050%, и изменение расхода в пределах $\pm(25-35)$ кг не может оказать заметного влияния на количество серы, вносимой с ломом. Тем не менее, был проведен дополнительный анализ, который подтвердил, что зависимость содержания серы в металле от расхода лома не проявляется. Исходя из проведенного анализа принято допущение, что количество серы, вносимое с известью и ломом, является величиной постоянной. И, таким образом, динамика изменения критериев процесса десульфурации может проявиться только от содержания серы в чугуна.

К критериям процесса десульфурации (показателям процесса десульфурации) относится степень десульфурации, обычно выражаемая как

$$\Delta S, \% = ([S_{\text{чугуна}}], \% - [S_{\text{металла}}], \%) 100\% / [S_{\text{чугуна}}], \%;$$

и коэффициент распределения серы η_S (отношение концентрации серы в шлаке к содержанию серы в металле, т.е. $\eta_S = (S)/[S]$).

Динамика изменения степени десульфурации и коэффициента распределения серы на заключительных этапах плавки представлена на рис.3 и рис.4 соответственно.



Рис.3. Изменение степени десульфурации по заключительным этапам плавки.

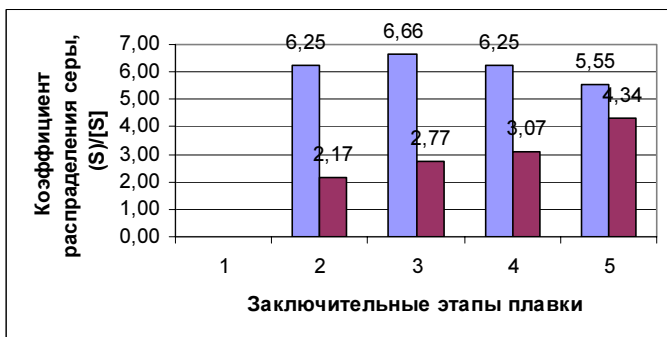


Рис.4. Изменение коэффициента распределения серы по заключительным этапам плавки.

В связи с поступлением серы из извести и металлолома на этапе начала падения факела и частично на этапах полного падения факела, и даже после передувания степень десульфурации находится в области отрицатель-

ных величин. Наиболее высокие значения степени десульфурации достигаются на этапах продувки (промывки) металла нейтральным газом.

Анализ совокупностей данных, приведенных на рис.3, показывает, что в области максимальных значений степени десульфурации в основном располагаются результаты плавов с содержанием серы в чугунах 0,0075–0,0093%, а в области минимальных значений – результаты плавов с содержанием серы в чугунах 0,0020–0,0053%. Анализ совокупностей, представленных на рис.4, четко подтверждает противоположное явление, а именно: расположение результатов плавов с содержанием серы в чугунах 0,0020–0,0053% в области максимальных величин коэффициентов распределения серы, а в области минимальных величин – результатов плавов с содержанием серы в чугунах 0,0075–0,0093%.

На рис.3, 4 отмечается значительный разброс представленных результатов, т.е. большие различия между максимальными и минимальными значениями. Одним из основных факторов, определяющих эти различия, является содержание серы в исходном чугуне.

Полученные зависимости содержания серы в металле, степени десульфурации и коэффициента распределения серы от содержания серы в исходном чугуне представлены на рис.5–7 соответственно.

Для всех заключительных этапов плавки содержание серы в металле тем ниже, чем меньше ее содержание в чугуне (рис.5). В верхней части области представленных данных находятся значения для этапов начала и полного падения факела, а в нижней части – для этапов передувки и продувки (промывки) металла нейтральным газом.

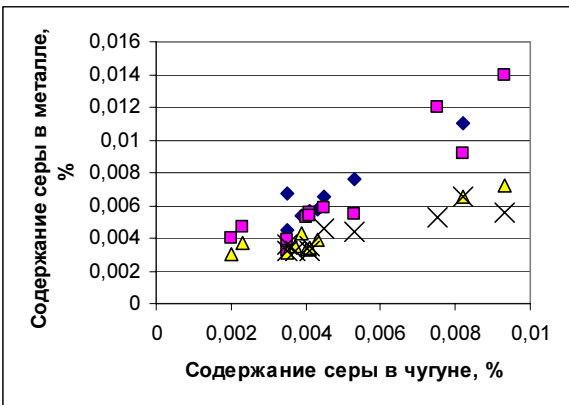


Рис.5. Зависимость содержания серы в металле от исходного содержания серы в чугуне.

◆ – начало падения факела; ■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; x – промывка.

Величина степени десульфурации для всех заключительных этапов плавки в среднем снижается с уменьшением содержания серы в чугуне (рис.6). Однако, в верхней части области представленных данных находятся значения для этапов продувки (промывки) металла нейтральным газом и передувки, а в нижней части – для этапов начала и полного падения

факела. Значительная доля представленных данных находится в области отрицательных значений степени десульфурации, т.е. в случаях, когда содержание серы в металле выше, чем в чугуна. Положительные значения величины степени десульфурации находятся в пределах 5–40%, что намного ниже, чем при переделе чугуна с традиционным содержанием серы (30–50%) [4].

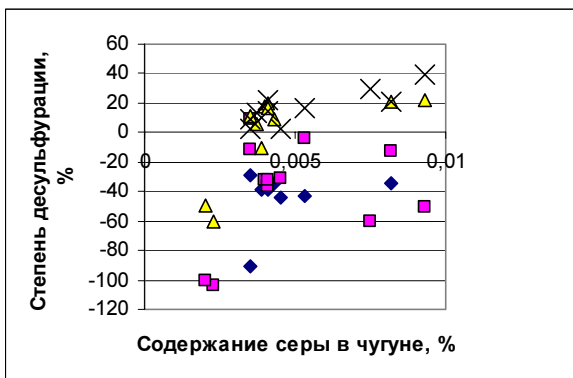


Рис.6. Зависимость степени десульфурации от исходного содержания серы в чугуне.

◆ – начало падения факела; ■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; x – промывка.

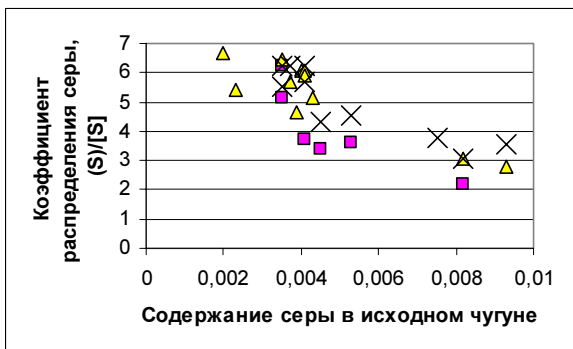


Рис.7. Зависимость коэффициента распределения серы от исходного содержания серы в чугуне.

■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; x – промывка.

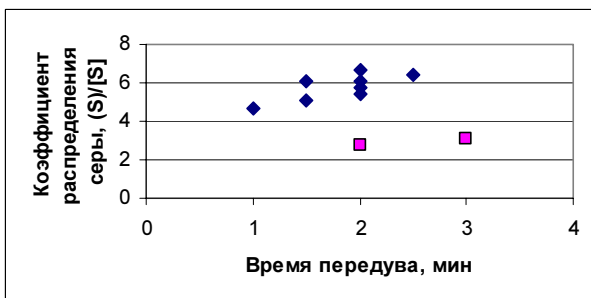


Рис.8. Зависимость коэффициента распределения серы от времени передова.

◆ – содержание серы в чугуне 0,0020–0,0053%; ■ – содержание серы в чугуне 0,0075–0,0093%;

Коэффициент распределения серы между шлаком и металлом в среднем снижается от 6,5 до 2,25 с увеличением содержания серы в чугуна от 0,0020 до 0,0093% (рис.7). Область представленных результатов более компактна, чем области данных зависимостей содержания серы в металле и степени десульфурации от содержания серы в чугуна (рис.5–6). Как и для зависимости степени десульфурации, в верхней части области приведенных значений коэффициента распределения серы находятся результаты этапов продувки (промывки) металла нейтральным газом и передувка, а в нижней – этапа полного падения факела.

По плану эксперимента длительность этапа передувка составляла от 1 до 3 мин. По результатам опытных плавки установлена зависимость коэффициента распределения серы от времени передувка (рис.8). Общий характер зависимости – это ожидаемый и подтвержденный экспериментально рост коэффициента распределения серы от увеличения времени передувка. Однако, установлено четкое разграничение значений коэффициента распределения серы от концентрации серы в чугуна, что подтверждает результаты анализа данных, представленных на рис.4. При содержании серы в чугуна в пределах 0,0020–0,0053% с увеличением времени передувка от 1 до 3 мин коэффициент распределения серы увеличивается от 4,5 до 6,5 ед. При содержании серы в чугуна в пределах 0,0075–0,0093 как абсолютные значения коэффициента распределения серы, так и его прирост примерно в 2 раза ниже.

Кроме содержания серы в чугуна, к другим весомым факторам, определяющим уровень десульфурации в кислородно–конвертерном процессе, относятся главные критерии шлакообразования – окисленность и основность шлака. Зависимость содержания серы в металле, степени десульфурации и коэффициента распределения серы от окисленности шлака представлена на рис.9 – 12 соответственно. Окисленность шлака оценивалась содержанием железа общего в шлаке ($Fe_{\text{общ}}$), т.е. суммарным содержанием железа в шлаковой фазе в составе (FeO) и (Fe_2O_3).

При общей оценке всей совокупности данных, представленных на рис.9, наблюдается тенденция увеличения содержания серы в металле с возрастанием окисленности шлака.

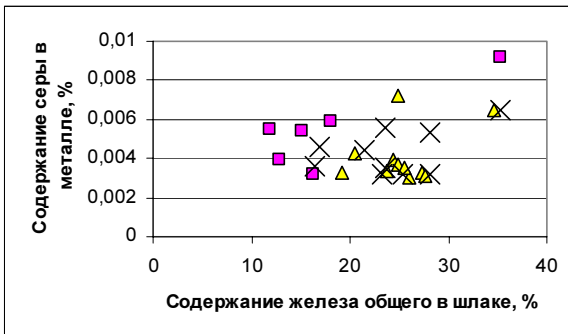


Рис.9. Зависимость содержания серы в металле от окисленности шлака. ■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; х – промывка.

Однако, при классификации результатов по содержанию серы в исходном чугунае проявляются другие закономерности. При содержании серы в чугунае в пределах 0,0075–0,0093% проявляется тенденция увеличения содержания серы в металле с возрастанием окисленности шлака, а при содержании серы в чугунае в пределах 0,0020–0,0053% наблюдается обратная закономерность (рис.10).

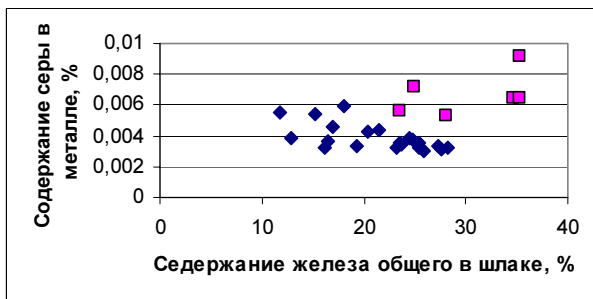


Рис.10. Зависимость содержания серы в металле от окисленности шлака.
 ◆ – содержание серы в чугунае 0,0020–0,0053%; ■ – содержание серы в чугунае 0,0075–0,0093%;

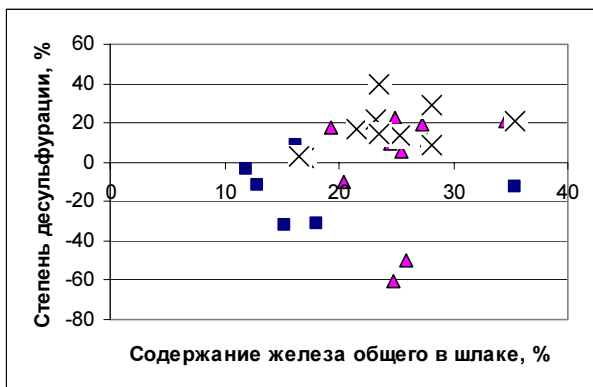


Рис.11. Зависимость степени десульфурации от окисленности шлака. ■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; х – промывка.

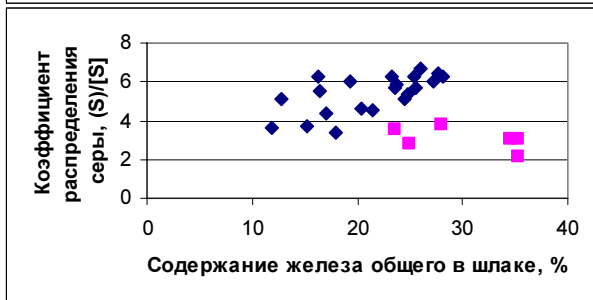


Рис.12.. Зависимость коэффициента распределения серы от окисленности шлака..
 ◆ – содержание серы в чугунае 0,0020–0,0053%; ■ – содержание серы в чугунае 0,0075–0,0093%;

Двойное влияние окисленности шлака на процесс распределения серы между шлаковой и металлической фазами известно и имеет обоснованное

объяснение для условий передела чугуна с традиционным содержанием серы [4,5]. Для объяснения закономерностей процесса десульфурации в связи с окисленностью шлака при низких концентрациях серы в чугуне, по-видимому, потребуются дополнительные экспериментальные исследования и теоретические проработки.

В зависимости степени десульфурации от окисленности шлака влияние содержания серы в исходном чугуне не наблюдается. В целом, отмечается рост степени десульфурации с увеличением окисленности шлака. (рис.11).

В зависимости коэффициента распределения серы от окисленности шлака четко обозначается влияние содержания серы в исходном чугуне (рис.12). При содержании серы в чугуне 0,0075–0,0093% коэффициент распределения серы находится в пределах 2,20–3,75 ед. и снижается с увеличением окисленности шлака. При содержании серы в чугуне 0,0020–0,0053% коэффициент распределения серы находится в пределах 3,40–6,60 ед. и возрастает с увеличением окисленности шлака.

Зависимость содержания серы в металле, степени дусульфурации и коэффициента распределения серы от основности шлака представлена на рис.13–15 соответственно.

При анализе данных, представленных на рис.13, четко определяется влияние содержания серы в исходном чугуне: данные плавок с содержанием серы в исходном чугуне в пределах 0,0020–0,0053% и в пределах 0,0075–0,0093% образуют четко различающиеся между собой области. Классификационные области находятся в таких же границах по содержанию серы в чугуне, как и при анализе влияния окисленности шлака. В целом, содержание серы в металле снижается с увеличением основности шлака, однако абсолютные величины концентрации серы в металле значительно различаются. Содержание серы в металле данных первой области находится в пределах 0,0030–0,0057%, а во второй – 0,0053–0,0092%.

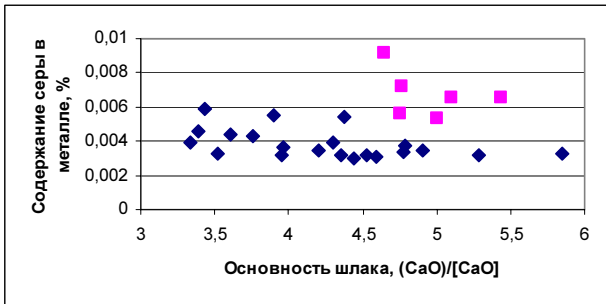


Рис.13.. Зависимость содержания серы в металле от основности шлака. ◆ – содержание серы в чугуне 0,0020–0,0053%; ■ – содержание серы в чугуне 0,0075–0,0093%;

В зависимости степени десульфурации от основности шлака, так же как и в зависимости от окисленности шлака, влияние содержания серы в

исходном чугуне не проявляется. В целом отмечается рост степени десульфурации с увеличением основности шлака (рис.14).

В зависимости коэффициента распределения серы от основности шлака четко обозначается влияние серы в исходном чугуне (рис.15). По приведенным результатам коэффициент распределения серы между шлаком и металлом в целом увеличивается с ростом основности шлака, однако абсолютные величины коэффициента распределения серы значительно различаются. Значения коэффициента распределения в первой области находятся в пределах 3,40–6,66 ед., а во второй – 2,20–3,75 единиц.

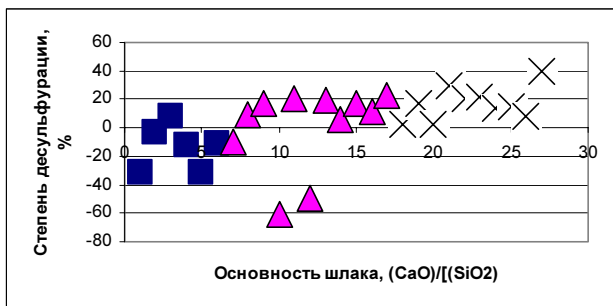


Рис.14. Зависимость степени десульфурации от основности шлака. ■ – полное падение факела, ▲ – передув после полного падения факела; x – промывка.

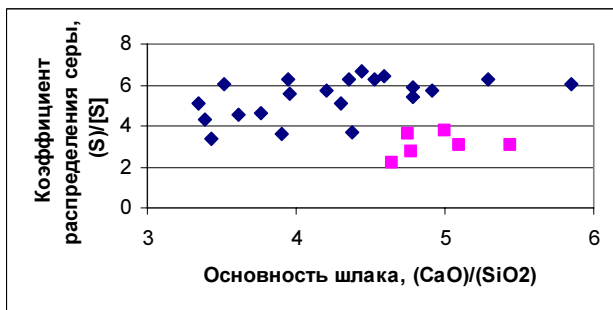


Рис.15. Зависимость коэффициента распределения серы от основности шлака. ◆ – содержание серы в чугунах 0,0020–0,0053%; ■ – содержание серы в чугунах 0,0075–0,0093%;

При обработке данных были также проанализированы зависимости содержания серы в металле, степени десульфурации и коэффициента распределения серы от основности шлака, выраженной отношением суммы $(CaO + MgO)$ к содержанию (SiO_2) . В результате были получены такие же аналогичные взаимосвязи, как и при оценке основности отношением (CaO/SiO_2) .

Выводы. В результате проведенных экспериментов установлены и исследованы особенности процесса десульфурации и возможности кислородно–конвертерной плавки с комбинированной продувкой кислородом сверху и подачей нейтрального газа через днище для обеспечения низкой

концентрации серы в металле при переделе чугуна с содержанием серы в пределах 0,0020–0,0093%.

Содержание серы в металле связано, в основном, с ее количеством, вносимым с шихтовыми материалами. Определена прямо пропорциональная зависимость концентрации серы в металле от содержания серы в чугуне. В прямой зависимости от содержания серы в чугуне, а также от окисленности и основности шлака находится степень десульфурации, которая является одним из важнейших критериев оценки процесса удаления серы.

Установлено, что совокупности полученных результатов, характеризующие взаимосвязи содержания серы в металле и коэффициента распределения серы от окисленности и основности шлака, четко классифицируются на две области в зависимости от содержания серы в чугуне: при концентрации серы в чугуне в пределах 0,0020–0,0053% и 0,0075–0,0093%.

Установлена обратная зависимость коэффициента распределения серы от содержания серы в чугуне, которая противоположна закономерности, характерной для условий передела чугуна с традиционной концентрацией серы (0,020–0,060%).

1. *Смирнов А.* Конвертерный прогресс. // *Металл.* – 2006. – №8. – С.32–37.
2. *Исследование* особенностей окисления примесей металла на конечных этапах кислородно–конвертерной плавки./ В.П.Корченко, Л.Г.Тубольцев, В.Ф.Поляков и др.// *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2006. – №7. – С.45–48.
3. *Исследование* вариантов технологии выплавки в конвертерах с комбинированной продувкой низко– и сверхнизкоуглеродистой стали. / В.П. Корченко, Л.Г.Тубольцев, В.Ф.Поляков и др. // *Фундам. и прикл. проблемы черн. метал.* Сб.научных трудов ИЧМ. – 2005. – Вып.10. – С.124–134.
4. *Баттизманский В.И.* Теория кислородно–конвертерного процесса. – М.:Металлургия, 1975. – 375 с.
5. *Левин С.Л.* Сталеплавильные процессы. – К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1963. – 404 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Э.В.Приходько