

Шевченко А. Ф. /д. т. н./, Двоскин Б. В. /к. т. н./,  
Маначин И. А., Кисляков В. Г. /к. т. н./,  
Шевченко А. М., Шевченко С. А. /к. т. н./,  
ИЧМ им. З. И. Некрасова НАН Украины

Башмаков А. М. /к. т. н./  
ООО «Титанпроект»  
Лю Дун Йе  
СК «Десмаг», г. Дашицзяо, КНР

## Модернизация технологии десульфурации чугуна с активизацией процесса взаимодействия магния с рафинируемым расплавом

Приведены результаты совершенствования процесса рафинирования чугуна вдуванием магния. В основу усовершенствований положены меры, направленные на создание более развитой массообменной зоны в ванне за счет рассредоточения вдуваемых реагентов. Задача решается применением двухсопловой фурмы и оптимизацией параметров вдувания. Показано увеличение массообменной зоны на 30-50 %.

Процесс реализован с обеспечением более высокого (на 10 %) усвоения магния, успокоения процесса барботирования в ковше, снижения удельного расхода магния на 0,1-0,15 кг/т чугуна, повышения интенсивности вдувания магния (до 14-25 кг/мин), повышения налива ковшей чугуном и сокращения вдвое продолжительности рафинирования чугуна. Обеспечивается особо глубокая десульфурация чугуна ( $\leq 0,001-0,002$  %) и снижение затрат на обработку на 2,2-4,7 долл. США/т чугуна. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

**Ключевые слова:** чугун, ковш, вдувание, зернистый магний, распределение потока, сера, показатели процесса

The results of improvement of iron refining process by magnesium injection are given. As the basis of the improvements the measures were taken, which are aimed to creating of more advanced mass transfer zone in the bath due to the dispersal of injected reagents. The problem is solved by using double-nozzle lance and optimization of the parameters of injection. Experiments have shown an increase in the mass transfer zone up to 30-50 %.

The process is implemented with providing higher (10 %) recovery of magnesium, calming of the bubbling process in the ladle, lowering the specific flow of magnesium up to 0,1-0,15 kg/t of pig iron, increasing the intensity of the injection of magnesium (up to 14-25 kg/min), increasing of ladle pouring by pig iron and halving the duration of iron refining. Particularly deep desulphurization ( $\leq 0,001-0,002$  %) and reduction of processing costs of 2,24-4,7 USA dollars/ton of pig iron is provided.

**Keywords:** pig iron, ladle, blowing, grain magnesium, flow distribution, sulfur, process performance

Процессы десульфурации чугуна вдуванием порошковых магнийсодержащих смесей и зернистого чистого магния (без разубоживающих добавок) получили широкое распространение в большинстве стран [1, 2]. Эти процессы обеспечили возможность глубокого очищения чугуна от серы и одновременного сокращения цикла операций внепечной десульфурации и обработки чугуна таким образом, что продолжительность внепечной подготовки чугуна стала соизмеримой, а в целом ряде случаев меньше цикла операций конвертерной плавки.

Модернизация сталеплавильного производства (особенно в последние годы) неразрывно связана с увеличением объема конвертеров, массы чугуна, сливаемого в конвертер, и существенным снижением содержания серы в готовой стали, в т. ч. до верхнего предела  $\leq 0,001-0,002$  % [3]. Это обусловило необходимость увеличения количества расходуемого реагента, что в свою очередь потребовало увеличения интенсивности ввода магния в чугун более 12-14 кг/мин с сокращением продолжительности цикла всех операций обработки чугуна (постановки ковша, отбора проб, замера температуры, вдувания магния, наклона ковша, скачивания шлака, уборки ковша).

Анализ сложившейся ситуации показал, что одной из основных причин ограничения интенсивности ввода магния в расплав чугуна является повышение активности барботажа чугуна до неприемлемых пределов, что в свою очередь обусловлено нерациональным распределением вводимого магния в ванне. Поэтому первый этап решения проблемы включал изыскание путей создания более развитой и активной тепло- и массообменной зоны в рафинируемой ванне за счёт параметров и метода ввода магнийсодержащего двухфазного потока в расплав чугуна.

При моделировании процесса вдувания двухфазного потока (на «холодной» физической модели) нами было подтверждено, что глубина внедрения потока в жидкость (длина струи) зависит от скорости потока, диаметра сопла фурмы и глубины погружения фурмы в ванну. Глубина проникновения струи в ванну увеличивается (и соответственно возрастает межфазная реакционная поверхность рафинирующей среды) с увеличением скорости потока и диаметра сопла фурмы.

Одновременно сопоставление экспериментальных данных с расчетными, по известным выражениям [4], показывает, что фактическая глубина вне-

дрения потока ( $L_{\text{эксп.}}$ ) меньше чем расчетная ( $L_{\text{расч.}}$ ), при этом абсолютная разница увеличивается с увеличением расхода газа и с уменьшением сечения канала фурмы. Соответственно отношение  $L_{\text{факт.}}/L_{\text{расч.}}$ , равное 1 при скорости потока около 40-50 м/с (рис. 1), уменьшается с увеличением скорости истекающего газосодержащего потока, и может быть определено из выражения:

$$K_K = \frac{L_{\text{эксп.}}}{L_{\text{факт.}}} = 3,4408 \cdot W_{\Gamma}^{-0,339} = \sqrt[3]{\frac{40,74}{W_{\Pi}}} \quad (1)$$

а фактическая глубина внедрения струи в жидкость соответствует расчетному по скорректированному выражению:

$$L_{\text{стр.}} = K_K \cdot W_{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \cdot D_K}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}) \cdot g}} \quad (2)$$

где  $W_{\Pi}$  – скорость потока;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа и жидкости соответственно;  $D_K$  – диаметр канала.

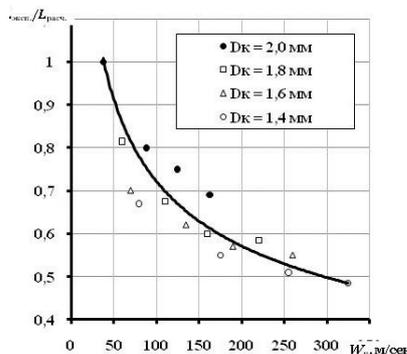


Рис. 1. Изменение отношения  $L_{\text{эксп.}}/L_{\text{расч.}}$  в зависимости от скорости истекающего потока ( $W_{\Pi}$ ) при различных диаметрах канала фурмы ( $D_K$ )

Основным технологическим направлением увеличения площади массообменной поверхности был принят комплексный метод организации вдувания магния в расплав чугуна – не через одно, а через несколько сопел (например, два) с одновременным отклонением сопел на выходе от вертикальной оси. В совмещенном варианте эти решения реализуются конструкцией двухсопловой фурмы с единым общим подводным каналом, который в оголовке фурмы разделяется на два равных канала (рис. 2).

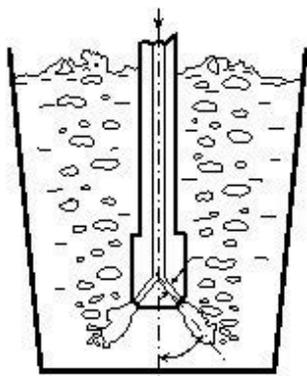


Рис. 2. Гидродинамическая обстановка в ковше при вдувании магния через двухсопловую фурму

Это решение позволяет при всех прочих равных условиях обеспечить предварительное разделение потока на два с одновременным повышением скорости потоков на выходе в расплав. Кроме этого наклонным вдуванием обеспечивается большее диспергирование среды в ванне и наибольшая площадь поверхности её в расплаве [2]. Такими решениями предусматривалось обеспечение наиболее развитой реакционной поверхности в расплаве.

Экспериментальные исследования (на физической модели) закономерностей вдувания двухфазных потоков через двухсопловую фурму показали, что переход от вдувания магния односопловой фурмой к вдуванию двухсопловой сопровождается увеличением площади массообмена на 35-50 % (рис. 3). Увеличение площади тепло-массообменной поверхности в расплаве чугуна улучшает условия усвоения магния расплавом, активизируя обменные процессы и позволяя увеличивать интенсивность подачи магния.

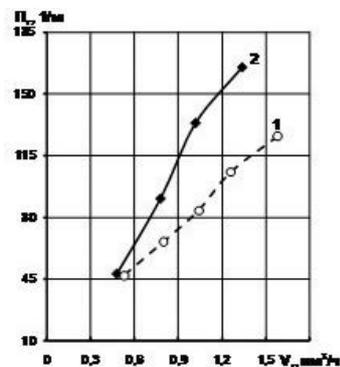


Рис. 3. Зависимость условной межфазной поверхности ( $\Pi_{\Gamma}$ ) пузырей газа в ванне от расхода газа ( $V_{\Gamma}$ ) при вдувании через двухсопловую фурму и эквивалентную ей односопловую фурму: 1 – вдувание через односопловую фурму; 2 – вдувание через двухсопловую фурму. Угол отклонения сопел на выходе от вертикальной оси ( $\alpha$ ) – 45°

Эти же исследования показали, что такие параметры как расход вдуваемого газа-носителя, скорость истечения потока из сопел двухсопловой фурмы, конструкция делителя одного потока на два (в оголовке фурмы), угол отклонения сопел фурмы от вертикальной оси, глубина погружения двухсопловой фурмы в рафинируемую ванну влияют на параметры образующейся барботируемой зоны и технологичность процесса обработки. По результатам исследований рекомендованы и предложены минимально допустимая скорость истечения потоков из сопел в расплав, величины предельных расходов газа-носителя и интенсивности подачи магния (в зависимости от типоразмера ковша), рациональные диаметры и сечения магниепроводов, разгонного канала и сопел фурмы.

Опытные и опытно-промышленные продувки чугуна зернистым магнием одноканальными и двухсопловыми фурмами проведены в различных заливочных ковшах с массой чугуна 98-280 т. Установлено, что переход от односопловой фурмы к двухсопловой в равных условиях сопровождается более устойчивым, рассредоточенным (по объёму ванны) и спокойным характером барботирования расплава в ковше.

Это позволило увеличить налив ковшей чугуном (уменьшив «свободный борт» вплоть до 0,10-0,15 м), повысить интенсивность вдувания магния до 14-25 кг/мин и сократить продолжительность операции вдувания магния в среднем с 8,1 до 5,4 мин.

В широких пределах исходных и конечных содержаний серы рассредоточенное и интенсифицированное вдувание магния через двухсопловую фурму обеспечивает более высокое усвоение магния. Так, например, при снижении содержания серы до  $S_{кон} = 0,003\%$  степень усвоения магния при вдувании двухсопловой фурмой в среднем на 10% больше, чем при продувках односопловой фурмой (рис. 4). Такие же закономерности получены и для других конечных значений серы в чугуне.

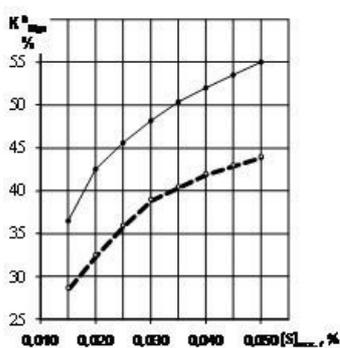


Рис. 4. Зависимость степени использования магния на удаление серы ( $\kappa_{Mg}^S$ ) от исходного содержания серы в чугуне ( $[S]_{исх}$ ). Конечное содержание серы в чугуне – 0,003%. Сплошные линии – вдувание магния двухсопловой фурмой. Пунктир – вдувание магния через односопловые фурмы

Вследствие этого, при снижении содержания серы в расплаве, например, до уровня 0,003%, удельные расходы магния на двухсопловой фурме меньше на 0,10-0,15 кг/т, чем на односопловой фурме (рис. 5), что является следствием лучшего рассредоточения вводимого магния и соответственно большего его усвоения при процессе вдувания магния через двухсопловую фурму. Такие же закономерности получены и для других конечных значений серы в чугуне (0,001%; 0,005% и 0,010%).

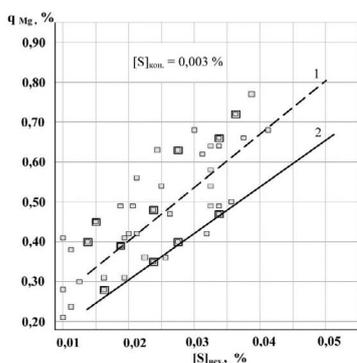


Рис. 5. Зависимость удельного расхода магния ( $q_{Mg}$ ) от исходного содержания серы в чугуне  $[S]_{исх}$  при вдувании через односопловую (1) и двухсопловую (2) фурмы. Содержание серы в чугуне после десульфурации – 0,003%. Масса чугуна в ковше – 150 т

Разработанный процесс рассредоточенного вдувания зернистого магния через двухсопловые фурмы освоен на ряде металлургических комбинатов, обеспечивая глубокую десульфурацию чугуна за более короткий промежуток времени – 4,3-7,6 мин (в среднем 5,4 мин), благодаря более высокой интенсивности вдувания магния – вплоть до 14-25 кг/мин, и высокой скорости удаления серы из чугуна – 11,6-17,4%/мин (табл. 1).

Необходимо обратить внимание, что разработанный метод ввода магния при более спокойном характере протекания процесса обработки позволил увеличить интенсивность ввода магния в ковши вплоть до 25 кг/мин, что позволяет вводить в ковш за одно погружение фурмы вплоть до 240 кг магния (табл. 1), что в свою очередь свидетельствует о повышении потенциальных возможностей процесса десульфурации чугуна. Из представленных объектов десульфурации чугуна (табл. 1) наиболее современной является установка десульфурации чугуна и скачивания шлака в заливочных ковшах сталзавода № 2 корпорации CSC (Тайвань). Имея 2 поста обработки чугуна, этот комплекс обеспечивает особо глубокую десульфурацию чугуна в объеме 6,4 млн т/год обессеренного чугуна. Диаграмма фактических удельных расходов магния при снижении серы до 0,001-0,005% представлена на рис. 6, которая свидетельствует о том, что на этом объекте удаление серы обеспечивается при самом низком удельном расходе магния (в сравнении со всеми другими мировыми аналогами) [5].

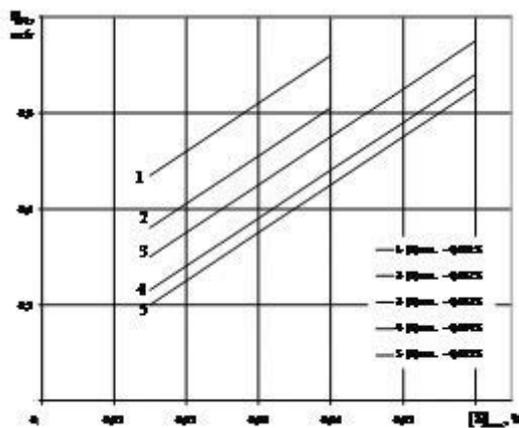


Рис. 6. Зависимость фактического удельного расхода магния ( $q_{Mg}$ ) от исходного содержания серы в чугуне ( $[S]_{нач}$ ) при вдувании через двухсопловые фурмы в заливочные ковши сталзавода № 2 концерна CSC (Тайвань). Цифры у линий – конечное содержание серы в чугуне (в тысячных %)

Снижение удельного расхода магния, успокоение процесса, сокращение продолжительности операции вдувания магния и возможность большего наполнения ковшей чугуном являются основными достоинствами нового процесса десульфурации. Сопоставление (в равных условиях) разработанного процесса с наиболее эффективными мировыми аналогами показывает [5], что вдувание зернистого магния через двухсопловые фурмы по украинской технологии обеспечивает целый ряд преимуществ и наиболее короткий процесс обработки, имеет наименьшие затраты (экономию – на 2,24-4,7 долл. США на каждой тонне обессеренного чугуна).

Таблица. Параметры вдувания магния через двухсопловые фурмы на различных металлургических комбинатах

№ п/п	Наименование предприятия Тип применяемых фурм Параметры, показатели	Тонгхуа МК	Дзилинь МК	Сяньмин МК	Тянцинь-Лянхэ МК	Тайвань МК (CSC)	Чуаньян МК	Пределы значения и средние параметры по группе комбинатов
		Двухсопловая, каналы изогнуты	Двухсопловая, каналы прямые	Двухсопловая, каналы прямые	Двухсопловая, каналы прямые	Двухсопловая, каналы изогнуты	Двухсопловая, каналы прямые	
1	Масса чугуна в ковше ( $G_v$ ), т	139-158 147	142-145 144	105-112 108	88-105 98	246-275 260	125-140 132	88-275 160
2	Высота свободного пространства в ковше ( $h_v$ ), м	0,3-0,7 0,46	0,15-0,50 0,35	н/д	0,25-0,5 0,42	0,35-0,7	0,10-0,40 0,25	0,1-0,7 0,40
3	Расход инжектирующего газа ( $V_i$ ), $\text{нм}^3/\text{ч}$	108	120	109	107	140-160	90	90-160 115
4	Расход магния:							
	- $Q_{Mg}$ , кг/ковш	51-121 89,8	36-83 54,6	43-54 46	36	43-240 120	27-93 47	27-240 65,6
	- $q_{Mg}$ , кг/т чугуна	0,61	0,38	0,42	0,37	0,46	0,21-0,70 0,36	0,42
5	Интенсивность вдувания магния ( $i_{Mg}$ ), кг/мин.	10-22 14,5	8-16 11,3	8-16 11	8-10 8	14-25 16	5-14 8,6	5-25
6	Длительность операции вдувания магния ( $\tau_{in}$ ), мин.	3,8-7,6 6,2	2,7-6,1 4,3	3,8-6,1 4,6	3,2-6,3 4,7	3,5-14,8 7,6	2,4-8,3 4,8	2,4-14,8 5,4
7	Скорость обессеривания чугуна (Ст. Д/ $\tau_{in}$ ), %/мин.	14,9	16,7	16,0	17,4	11,6	13,8	15,2

Примечание: в числителе – пределы значений, в знаменателе – среднее значение.

Результаты промышленного освоения технологии рассредоточенного вдувания зернистого магния через двухсопловые фурмы доказывают следующие достоинства модернизированного процесса:

- наименьший расход реагента;
- наименьшее дополнительное шлакообразование;
- наименьшие потери чугуна;
- наименьшее снижение температуры;
- самая короткая продолжительность обработки чугуна;
- самая низкая себестоимость обработки;
- наименьшие текущие затраты;
- наиболее высокая производительность;
- высокая надежность и безопасность процесса.

Это свидетельствует о том, что выполненная разработка по вдуванию магния двухсопловыми фурмами надежна, эффективна и перспективна.

### Выводы

1. Применение зернистого магния (без разубоживающих добавок), специальной системы надежного дозирования реагента, исключение пульсаций двухфазного потока, равномерное распределение зерен магния по сечению канала, деление потока на несколько равных потоков (в оголовке фурмы) и отклонение сопел на выходе из фурмы обеспечивают благоприятные условия для ввода магния в расплав чугуна и интенсификации процессов, протекающих в прифурменной зоне при ковшевом рафинировании чугуна магнием.

2. При обработке чугуна в различных ковшах вдуванием зернистого магния показано, что переход от односопловой (одноканальной) фурмы к двухсопловой сопровождается лучшим распределением вдуваемых сред в жидкой ванне, что соответственно успокаивает процесс барботирования расплава. Это позволяет увеличить заполнение ковшей с чугуном (уменьшение «свободного борта»), повысить интенсивность вдувания магния до 14-25 кг/мин (в зависимости от типоразмера ковша), сократить операцию ввода магния в среднем с 8,1 до 5,4 мин и общего цикла обработки до 16-24 мин.

3. Благоприятные условия взаимодействия магния с расплавом чугуна при вдувании через двухсопловые фурмы повышают степень усвоения магния в среднем на 10 % (абсолютных), сокращают удельный расход магния в среднем на 0,1-0,15 кг/т чугуна и уменьшают затраты на обработку на 2,2 - 4,7 долл. США/т чугуна (в сравнении с другими технологиями десульфурации чугуна).

### Библиографический список

1. Большаков В. И., Шевченко А. Ф., Башмаков А. М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах // Киев: Наукова думка. - 2011. - 207 с.
2. Су Тиан Сен Развитие технологии предварительной обработки чугуна и ее освоение в Китае // Сб. научн. Трудов XII Междунар. симп. по десульфурации чугуна и стали. - Вена, Австрия: Altmamet. - 19-22 сент. 2012. - С. 80-83.
3. Хюскен Р., Каппель Ю. Стратегия десульфурации в кислородно-конвертерном производстве стали // Металлургическое производство и технологии. Москва: изд. «Руда и металлы». - № 1 - С. 28-38.
4. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / Киев-Донецк, Вища школа. Головн. Вид. - 1979. - 280 с.
5. Шевченко А. Ф., Башмаков А. М., Маначин И. А., Двоскин Б. В., Вергун А. С., Шевченко А. М., Лю Дун Ие. Технико-экономическое сопоставление процессов внепечной десульфурации чугуна по результатам их промышленного освоения // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация», Москва. - 2013. - № 10 (1366). - С. 23-30.

Поступила 30.05.2014