

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ВЫБОРЕ И ОЦЕНКЕ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Приведен сопоставительный анализ технико–экономических показателей различных процессов внепечной десульфурации чугуна. В отличие от ранее применявшихся методик, проведена оценка по широкому перечню показателей. Показано, что затраты на реагент являются недостаточным показателем для оценки процесса, а необходимо учитывать все операции и составляющие внепечной подготовки чугуна. Наиболее приоритетным определен процесс вдувания зернистого магния без разубоживающих добавок, наиболее затратным –  $KR_{CaO}$  – процесс.

### Чугун, десульфурация, магний, технико–экономические показатели

**Состояние проблемы.** Происходящая в настоящее время активная модернизация сталеплавильного производства включает практически все технологические составляющие процессов подготовки, выплавки и разливки стали, в т.ч. процессы внепечной подготовки и десульфурации жидкого чугуна перед конвертерным переделом. Металлургия многих стран имеет значительный опыт и практику внепечной десульфурации чугуна, что позволяет достаточно всесторонне оценить имеющиеся технологические наработки в этой области с целью наиболее квалифицированного подхода при выборе рациональной технологии внепечного обессеривания чугуна.

**Постановочные задачи.** При выборе наиболее рациональной промышленной технологии внепечной подготовки чугуна к конвертерному переделу необходимо учитывать следующие стороны процессов:

1. Достигаемая глубина десульфурации чугуна в условиях работы современного конвертерного цеха (с производством не менее 2,5–3 млн. т/год стали).
2. Обеспеченность технологического процесса базой реагентов.
3. Продолжительность цикла операций и производительность комплекса внепечной обработки.
4. Технологические показатели процесса десульфурации чугуна и потенциальные возможности.
5. Потери, связанные с осуществлением технологии.
6. Капитальные затраты при создании комплекса десульфурации чугуна по реализуемой технологии.
7. Экология технологического процесса.
8. Уровень гарантий показателей процесса, технологического оборудования и комплекса в целом.
9. Себестоимость (затраты) сквозной технологии внепечной обработки чугуна.

Ниже приведен анализ наиболее конкурирующих в настоящее время технологий внепечной десульфурации чугуна на основе фактических и опубликованных данных промышленной эксплуатации комплексов десульфурации чугуна и скачивания шлака по предлагаемой методике комплексной оценки показателей.

**Решение задач.** С учетом приведенного выше перечня показателей технологии и оборудования внепечной десульфурации чугуна, к наиболее конкурирующим в настоящее время и на ближайшую перспективу можно отнести промышленные процессы десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния без пассивирующих добавок, вдувание магния в смеси с известью и KR–процесс на основе извести с добавкой плавикового шпата. Существо этих 3–х процессов заключается в следующем.

Вариант I. Десульфурация гранулированным магнием осуществляется вдуванием зернистого (0,5–1,6 мм) «чистого» магния (без любых пассивирующих добавок) через погружаемую фурму.

Вариант II. Десульфурация реализуется вдуванием магния в смеси с пассивирующей добавкой извести (в соотношении 1:3–1:4) через погружаемую фурму.

Вариант III. KR – процесс осуществляется предварительным удалением ковшевого шлака с последующей засыпкой в ковш извести и плавикового шпата и перемешиванием расплава погружаемой вращающейся (огнеупорной) мешалкой.

**Достижимая глубина десульфурации.** Инжекционные процессы вдувания «чистого» магния (вариант I) и магния в смеси с известью (вариант II) обеспечивают широкие возможности по степени и глубине десульфурации жидкого чугуна со снижением содержания серы вплоть до уровня  $\leq 0,002\%$  [1–7], а если необходимо, то до уровня  $\leq 0,001\%$  [3,6,8]. В силу изложенного, инъекционные процессы вдувания магниесодержащих реагентов получили наибольшее распространение [1–10,12,13].

Фактические данные работы ряда предприятий Тайваня [9] и Китая [10,11] свидетельствуют о том, что при KR<sub>CaO</sub> – процессе (с использованием в качестве основного реагента извести) содержание серы в чугуне снижают в основе до уровня ниже 0,010–0,015%. Количество чугуна с содержанием серы  $\leq 0,002\%$  получают нестабильно и только около 17%. К наиболее эффективным KR – комплексам десульфурации можно отнести установки десульфурации компании CSC (Тайвань) японской поставки, в регламентах которых наиболее низкое содержание серы после обработки определено величиной  $\leq 0,003\%$ . Более низкие пределы значений серы не оговорены, хотя при очень тщательном удалении исходного ковшевого шлака, увеличении расхода извести более 9 кг/т чугуна и при более длительной операции перемешивания (более 15 мин.) в ряде ковшей содержание серы в чугуне снижают до уровня  $\leq 0,002\%$  [9,10].

**Обеспеченность базой реагентов.** При десульфурации чугуна вдуванием магниесодержащих реагентов как по варианту I, так и по варианту II

применяется гранулированный из расплава [5,8,14] или зернистый [2,4,5,13,15] магнезий, который получают в настоящее время в основе методом виброфрезерования слитков [1,12,13] с последующей обработкой диспергированного магнезия с округлением частиц и пассивирующей добавкой кальций- и натрийсодержащих соединений. Диспергированный магнезий производится очень многими странами Европы, Азии и Америки и неограниченно поставляется в виде товарного на мировом рынке. Основным поставщиком магнезия на мировом рынке является Китай. Цена диспергированного магнезия колеблется в пределах 2500–3000 долл/т.

При десульфурации вдуванием магнезия в смеси с известью применяется высококачественная порошковая известь, для получения которой создается, как правило, новое специализированное производство молотого порошка с регламентированным фракционно-дисперсным составом извести, высоким (более 95%) содержанием  $\text{CaO}_{\text{акт.}}$ , низкой ( $\leq 1,5\%$ ) величиной потерь при прокаливании и отсутствием других примесей. Помол и приготовление этих порошков осуществляют в условиях исключения их увлажнения и с добавкой специальных поверхностно активных материалов для обеспечения высокой текучести извести [12,13]. Цена такой извести значительна и составляет 250 долл/т и выше [26].

При  $\text{KR}_{\text{CaO}}$  – процессе используется высококачественная обожженная металлургическая известь, производимая, как правило, в печах Мерца. Цена такой извести составляет в среднем 140 долл/т. Для повышения активности ковшевого шлака к извести добавляют (около 10%)  $\text{CaF}_2$  – содержащие материалы.

**Продолжительность цикла и производительность процесса.** Основные выполняемые операции, их продолжительность и полный цикл по анализируемым технологиям представлены в табл.1, из которой видно, что в основе большинство операций по различным способам совпадают, но имеются и существенные различия. Так, первое отличие – инжекционные процессы (вариант I и II) не требуют обязательного удаления ковшевых шлаков перед десульфурацией, а при  $\text{KR}_{\text{CaO}}$  – процессе эта операция является обязательной. Объясняется это тем, что процесс по варианту III осуществляется именно высокоактивным ковшевым шлаком на основе оксида кальция, а все другие примеси этому мешают. Если указанное требование не обеспечивается, то  $\text{KR}_{\text{CaO}}$  – процесс не обеспечивает требуемую десульфурацию чугуна.

Второе существенное отличие заключается в различной длительности операций десульфурации. Самая кратковременная операция – 4 мин, характерна для вдувания гранулированного или зернистого магнезия без добавок, что обусловлено наименьшим расходом обессеривающего реагента и высокой интенсивностью (до 22–26 кг/мин) вдувания магнезия [3,5,15]. По варианту II вдувание смеси магнезия и извести осуществляется с интенсивностью подачи смеси 70 кг/мин [1,7,10,12,13] и занимает в среднем 10 мин. При десульфурации  $\text{KR}_{\text{CaO}}$  –

процессом длительность перемешивания вращающейся мешалкой осуществляется в течение 17 мин [9].

Таблица 1. Составляющие расчетного цикла и продолжительности операций десульфурации чугуна и скачивания шлака в 300–тонных заливочных ковшах (на примере снижения содержания серы в чугуне с 0,020–0,025% до 0,002–0,003%)

№№ п/п	Наименование операции	Продолжительность операции при различных технологиях, мин.		
		Вариант I – вдувание гранулированного магния	Вариант II – вдувание магния в смеси с известью	Вариант III – $KR_{CaO}$ – процесс [9]
1.	Постановка ковша с чугуном на пост обработки.	1,5	1,5	91,5
2.	Отбор пробы чугуна и замер температуры.	1	1	1
3.	Наклон ковша и подготовка к предварительному скачиванию ковшевого шлака.	–	–	1
4.	Скачивание шлака перед десульфурацией.	–	–	5,5
5.	Возврат ковша в вертикальное положение.	–	–	1
6.	Подготовка к десульфурации.	1	1	1
7.	Выполнение операции десульфурации (вдувание магния, вдувание смеси, перемешивание мешалкой).	4	10	17
8.	Завершение десульфурации, подготовка к скачиванию шлака.	1,5	1,5	1,5
9.	Скачивание шлака из ковша после десульфурации.	5,0	5,5	6
10.	Возврат ковша в вертикальное положение.	1	1	1
11.	Отбор пробы чугуна и замер температуры.	1	1	1
12.	Выдача ковша с чугуном в позицию съема краном, съем ковша краном.	2	2	2
Итого		18	24,5	40,5

Различается также длительность операции удаления шлака после десульфурации: наименее продолжительная (5 мин) эта операция по вариан-

ту I, а наиболее продолжительная (6–7 мин) – при  $KR_{CaO}$  – процессе, что связано с наибольшим дополнительным шлакообразованием в результате десульфурации.

В итоге по варианту I – десульфурация гранулированным магнезиом, процесс является самым кратковременным с общим циклом всех операций 18 мин, а по варианту III –  $KR_{CaO}$  – процесс, является наиболее длительным – 40,5 мин, т.е. в 2,2 раза более продолжительным. Вдувание смеси магнезиома с известью занимает промежуточное положение. Как видим, инъекционные процессы (вариант I и II) по длительности имеют цикл меньше, чем цикл конвертерной плавки, а  $KR_{CaO}$  процесс более длительный. Это соответственно свидетельствует о производительности поста десульфурации по каждой технологии. При инъекционных процессах один пост обеспечивает работу конвертера, а при  $KR_{CaO}$  процессе требуются 2 поста десульфурации на каждый конвертер [9], что, соответственно, сопровождается двойными капитальными и текущими затратами.

**Технологические показатели процессов десульфурации.** Технологические показатели процессов включают значительное количество составляющих. Основные из них представлены в табл.2, в которой приведены опубликованные данные по различным технологиям. Из таблицы следует, что наиболее выигрышными является процесс вдувания магнезиома без разубоживающих добавок (вариант I), так как сопровождается наименьшим расходом магнезиома, например, при исходном содержании серы 0,020–0,023% и конечном 0,002–0,003% – 0,31 кг/т чугуна, самым коротким циклом обработки (18 мин, включая отбор проб, десульфурацию, скачивание шлака и др. операции), наименьшим расходом реагента на серу удаленную (1,72 кг/кг) и на всю обработку (86 кг/ковш), самой короткой операцией десульфурации (5 мин), наиболее высокой степенью усвоения магнезиома на серу (44% при исходной сере 0,020% и конечной 0,002%), наименьшим дополнительным шлакообразованием (0,62 кг/т чугуна), наименьшим снижением температуры ( $\leq 5^{\circ}C$ ) и незначительными потерями чугуна (0,28 кг/т) с дополнительно образующимся шлаком.

$KR_{CaO}$  – процесс (вариант III), в противоположность варианту I, имеет комплекс невысоких технологических показателей, основными из которых являются наибольший расход реагентов (более 5 кг/т чугуна [9,10,11]), необходимость предварительного скачивания шлака, большая длительность обработки (40 мин. и более), невысокая степень усвоения реагентов, значительное шлакообразование, большие потери температуры расплава (около  $40^{\circ}C$ ) и чугуна со шлаком (6,8 кг/т чугуна). Поэтому кажущаяся простота технологии  $KR_{CaO}$  – процесса и дешевизна реагента (известия) сопровождается весьма ощутимыми технологическими и техническими недостатками.

Таблица 2. Основные технологические параметры и показатели десульфурации чугуна по различным технологиям в 300–тонных заливочных ковшах

№№ п/п	Параметры, показатели	Вариант I – вдувание гра- нулированно- го магния [3,5,8,15]	Вариант II– совместное вдувание извести и магния [2,7,13,16]	Вариант III – KR <sub>CaO</sub> – про- цесс, смесь CaO+CaF <sub>2</sub> и перемешива- ние мешал- кой [9,11]
1.	Содержание серы в чу- гуне, % – исходное – после десульфура- ции	0,020 0,002	0,020 0,002	0,022 0,003
2.	Удельный расход реа- гентов, кг/т чугуна: – магния – извести – всего реагентов	0,31 – 0,31	0,49 1,55 2,04	– 6,2 6,9
3.	Длительность цикла операций десульфура- ции и скачивания шла- ка, мин.	18	24,5	40,5
4.	Расход реагентов на серу удаленную, кг/кг	1,72	11,3	36,3
5.	Расход реагентов на обработку (280 т чугу- на), кг/ковш	86	570	1932
6.	Длительность опера- ций скачивания шлака, мин	5	5,5	11
7.	Степень усвоения магния на серу удаленную, %	44	28	–
8.	Количество дополни- тельно образующегося в ковше шлака: – удельное, кг/т чу- гуна – общее, кг/ковш	0,62 175	4,08 1140	13,8 3860
9.	Снижение температуры чугуна, °С	≤5	6,7	35–42
10.	Потери чугуна с допол- нительно образующим- ся шлаком, кг/т чугуна	0,28	2,00	6,8

Вдувание магния в смеси с пассивирующей добавкой извести (вариант II) занимает промежуточное положение между вариантами I и III. При рассмотрении этого процесса необходимо обратить внимание на следующий ряд вопросов. Теоретическая и практическая полезность вдувания магния в смеси с известью не доказана. Наоборот, начиная с 80-х годов прошлого столетия, металлурги Украины показали [3,12,17] нерациональность и вред вдувания магния в смеси с наполнителями, поэтому был разработан ряд процессов вдувания «чистого» магния (без добавок) [3,12,17]. Впоследствии этот вывод был подтвержден широкой промышленной практикой на китайских меткомбинатах [1,3,8,11–13,18,19], в т.ч. на предприятиях гг. Ухань, Шаган и Тайюань, где вдувание смеси магния с известью было заменено украинской технологией вдувания гранулированного магния (без извести). Нерациональность совместного вдувания магния и извести отмечена также другими исследователями [20] по опыту работы установок десульфурации чугуна в 300-тонных заливочных ковшах Алчевского (технология «Simens–SVAI»), Новолипецкого (технология ESM) меткомбинатов, а также рядом других зарубежных специалистов [21].

Неубедительны также доводы ряда разработчиков [1,12,13] о необходимости совместной подачи магния и извести со смешиванием их в трубопроводе (метод коинжекции), так как в 70-е годы прошлого столетия украинскими исследователями было установлено [17], что качественная готовая порошковая смесь магния с известью не изменяет свои свойства при транспортировании и не отличается от смеси, полученной методом коинжекции. Кроме того, принцип коинжекции является более затратным в аппаратурном исполнении, достаточно сложным и не гарантирует однородность состава смеси. Этим можно объяснить применение готовых магниесодержащих смесей на ряде меткомбинатов Украины [17] и зарубежья [22]. Дополнительно необходимо обратить внимание на то, что использование метода коинжекции на установках десульфурации чугуна значительно увеличивает капитальные затраты [3] за счет большего объема технологического оборудования и средств автоматизации. По мнению автора настоящей публикации, применение метода коинжекции для вдувания магния в смеси с известью на установках десульфурации обусловлено в значительной степени коммерческими интересами поставщика и неумением разработчиков этого процесса обеспечить плавную нарастающую подачу порошковых реагентов через фурму, погруженную в расплав, и последующее устойчивое и надежное вдувание магния без разубоживающих добавок.

При объективном анализе применяемых технологий нужно учитывать фактические данные ряда исследований, которые свидетельствуют о том, что сульфидная емкость многих ковшевых шлаков меньше необходимой [17,23–25], а сера в шлаках после десульфурации магнием представлена сульфидами CaS и MnS [24], а не MgS. Этим обуславливается рациональность увеличения содержания CaO в шлаках. Изложенное выше явилось

обоснованием для разработчиков коинжекционных процессов десульфурации магнийсодержащими смесями осуществлять вдувание магния совместно с известью. С таким технологическим решением ввода магния в жидкий чугун нельзя согласиться. Безусловно, невысокая основность ковшевых шлаков (0,3–0,8) [17,24] указывает на целесообразность ввода оксида кальция в систему рафинирования чугуна магнием, но это нельзя осуществлять совместным вдуванием магния и извести, так как пассивирующая добавка извести ухудшает массообменные процессы магния с расплавом чугуна и сильно снижает степень усвоения магния [1,3,5,12,17,19], увеличивая его удельный расход.

Наиболее рациональным решением является вдувание магния без любых пассивирующих добавок, а СаО – содержащие материалы (в качестве корректирующей добавки) целесообразно загружать в ковш отдельно (без магния). Такая технологическая схема обеспечивает наиболее благоприятные условия для высокого усвоения вдуваемого магния и одновременно решает задачу увеличения сульфидной емкости ковшевого шлака и создания требуемого шлакового режима. В качестве корректирующей добавки в шлак по этой схеме могут применяться недефицитные дешевые материалы (с широкими пределами физико–химических свойств), в т.ч. из отходов обжига и утилизации СаО–содержащих материалов (а не высококачественная с особыми свойствами молотая известь). Технологический процесс десульфурации чугуна магнием по этой схеме проверен и реализован для ряда металлургических комбинатов [3,5,8,15].

При анализе технологических факторов различных процессов десульфурации дополнительно необходимо учитывать влияние собственно технологии десульфурации на физические свойства шлака с учетом последующей операции скачивания шлака из ковша. Обработка чугуна реагентами, содержащими оксид СаО, сопровождается увеличением вязкости ковшевых шлаков [13], повышением содержания  $Fe_{мет.}$  в шлаках до 50–60% и, соответственно, увеличением потерь чугуна с этими шлаками.

При обработке чугуна вдуванием магния без пассивирующих добавок (СаО, СаС<sub>2</sub>) физико–химические свойства ковшевых шлаков существенно не отличаются от исходных шлаков. Это обусловлено значительным количеством исходного ковшевого шлака перед десульфурацией (в основе больше 10–15 кг/т чугуна) и очень малым количеством (в среднем 0,6–1,0 кг/т чугуна) дополнительно образующегося в ковше шлака. В итоге ковшевой шлак после десульфурации магнием (обогащенный до 40% корольками чугуна и выделившейся графитовой спелью) является также весьма вязким. Тем не менее такие шлаки непосредственно после завершения десульфурации могут быть подвижными, что является следствием барботирования расплава в ковше и дробления шлакового покрова.

Анализ физико–химических свойств ковшевых шлаков, образующихся в промышленных условиях, показывает, что эти шлаки, как правило, не являются жидкими. Тем не менее для улучшения условий их удаления

рациональными являются добавки в ковш материалов для загущения шлаков (перед их скачиванием) и применение барботирования ванны азотом для перемещения шлакового покрова в сторону машины скачивания шлака [5,15]. Такие меры увеличивают степень очищения чугуна от шлака и снижают количество шлака, попадающего в конвертер со сливаемым чугуном.

Загущение ковшевых шлаков при десульфурации чугуна вдуванием смеси магнезия с известью и барботирование ванны азотом также осуществляются на ряде металлургических комбинатов [1,12,16,17], подтверждая рациональность этих технологических приемов при различных технологиях десульфурации чугуна, а также для условий, когда внепечная десульфурация не применяется.

**Потери при внепечной обработке.** Потери при внепечной десульфурации чугуна и скачивании шлака связаны в основе (табл.2) с потерями чугуна и снижением температуры расплава [11]. Величины этих потерь обусловлены в основе видом применяемого процесса десульфурации [3,5,10,11]. Как показали ранее выполненные исследования, наибольшие потери характерны для  $KR_{CaO}$  – процесса, при котором снижение температуры чугуна составляет около  $40^{\circ}C$  (табл.2), а потери металла –  $10,85$  кг/т обрабатываемого металла [11] (табл.3). Основными причинами столь больших потерь являются большой расход реагентов, большое дополнительное шлакообразование, значительная длительность операций, существенный недолив ковшей чугуном и значительное вращение поверхности расплава в период обработки.

Десульфурация чугуна вдуванием гранулированного магнезия (без разубоживающих добавок, вариант I) имеет (табл.3) наименьшие потери температуры ( $5^{\circ}C$ ) и чугуна –  $1,84$  кг/т чугуна (при обеспечении операций десульфурации и скачивания шлака из ковша). Десульфурация чугуна вдуванием магнезия в смеси с известью (вариант II) занимает промежуточное положение – потери при варианте процесса II меньше в 2,9 раза, чем при  $KR_{CaO}$  – процессе, но практически вдвое больше, чем при вдувании гранулированного магнезия по украинской технологии.

**Капитальные затраты на создание комплекса десульфурации.** Данные по капитальным затратам при строительстве комплексов десульфурации и скачивания шлака в настоящее время по понятным причинам не публикуются и не освещаются. Но по анализу структурного содержания комплексов по различным технологиям с учетом их пропускной способности можно констатировать, что при  $KR_{CaO}$  – процессе капитальные затраты самые высокие – в 1,5–2 раза больше, чем при инъекционных технологиях вдувания диспергированных реагентов.

Вдувание гранулированного магнезия без извести (вариант I) включает наименьшее количество оборудования и металлоконструкций и поэтому требует наименьших капитальных затрат.

Таблица 3. Потери чугуна при десульфурации по различным технологиям [11]

№№ п/п	Вид потерь чугуна	Вариант I – (украинский процесс) вдувание гранулированного магния	Вариант II – (процесс ESM, «Kt.Polysius», «Danielli») вдувание магния в смеси с известью	Вариант III – KR <sub>CaO</sub> – процесс, известь+CaF <sub>2</sub> , перемешивание мешалкой
1.	Потери чугуна за счет операции скачивания шлака перед десульфурацией, кг/т чугуна	0 (шлак не скачивается)	0 (шлак не скачивается)	1,28
2.	Потери чугуна со шлаком, образующимся при десульфурации, кг/т чугуна	0,28	1,82	7,65
3.	Потери чугуна при операции скачивания шлака после десульфурации, кг/т чугуна	1,56	1,91	1,92
	Суммарные потери чугуна по п.п. 1,2,3, кг/т чугуна	1,84	3,73	10,85

Вдувание магния в смеси с известью (вариант II) требует большего количества оборудования на приготовление смесей, более сложной и емкой системы автоматизации, а поэтому капитальные затраты по этой технологии больше, чем по варианту I (вдувание магния без разубоживающих добавок).

**Экология технологических процессов.** Рассматриваемые технологические процессы десульфурации реализуются со связыванием серы в твердые сульфиды кальция и магния. Образующиеся сульфиды в своей основе попадают в ковшевой шлак, изменяя (совместно с другими составляющими) его состав и частично физические характеристики. Образующиеся шлаки не являются токсичными и по своим характеристикам вписываются в применяемую на комбинатах схему утилизации доменных и конвертерных шлаков.

Выделяющийся из ковшей дым содержит газовую и пылевидную фазы, которые также не являются токсичными. Газовая фаза включает в основе подсасываемый воздух, за счет чего температура дыма снижается в газоходе до 160–300<sup>0</sup>С. Газовая фаза дыма включает: O<sub>2</sub> – 17÷20% , N<sub>2</sub> – более 79% , CO<sub>2</sub> – 0,2÷0,9% , содержание CO, SO<sub>2</sub> , NO<sub>2</sub> не превышает допустимые нормы.

Запыленность отходящих газов составляет 2–15 г/м<sup>3</sup>. Пылевая часть в основе содержит оксиды магния, кальция, кремния и железа – в сумме более 70%. Содержание спели достигает 26%.

По своему химическому составу выделяющийся из ковша дым (по всем трем вариантам технологий десульфурации) не является токсичным, но требует улавливания и очистки от пыли. Наиболее распространенный вариант очистки – сухая газоочистка с тканевыми фильтрами. При наличии на комбинате резервов выделяющийся дым может направляться в имеющиеся газоочистные сооружения.

Несмотря на различные реагенты и их удельные расходы сравниваемые процессы по пылегазовым выбросам можно принять равноценными.

**Потенциальный уровень гарантий технологий десульфурации.** Приведенные выше процессы десульфурации чугуна в своей основе реализуют различные механизмы массообменных процессов.  $KR_{CaO}$  – процесс реализует взаимодействие создаваемого ковшевого шлака с жидким чугуном при перемешивании системы металл–шлак вращаемой погружаемой мешалкой.

Инжекционные процессы (варианты I и II) реализуются за счет создания в объеме чугуна развитой и высокоактивной магнийсодержащей зоны, т.е. все процессы осуществляются в объеме расплава. Поэтому негативное влияние ковшевого шлака не играет решающего значения, вследствие чего имеющиеся ковшевые шлаки перед десульфурацией по вариантам I и II не скачивают.

В силу изложенного, сравнивая  $KR_{CaO}$ –процесс и инжекционные процессы (вариант I и II), следует заключить, что инжекционные технологии имеют более предпочтительный и приоритетный уровень гарантий, так как реализуют наиболее управляемый и стабильный физико–химический потенциал взаимодействия обессеривающей среды с рафинируемым расплавом.

Из двух инжекционных процессов (вариант I и II) наиболее выигрышным является украинский процесс дувания гранулированного магния (вариант I), так как реализуется через активное растворение магния в чугуне и последующее взаимодействие растворенного магния с серой чугуна [1,3,5,6,12,19].

Преимущества украинской технологии усиливаются исключением негативного влияния окружающей среды на эффективное усвоение магния чугуном.

**Себестоимость внепечной десульфурации.** При оценке затрат на десульфурацию чугуна по различным технологиям необходимо учитывать не только расходы реагентов и их цену, а все статьи расходов, связанных с реализацией процессов внепечной обработки. На примере оценки процессов по вариантам I, II и III выполнено такое сопоставление для условий обработки чугуна в 300–тонных заливочных ковшах при снижении серы с 0,020 до 0,002% (табл.4).

Таблица 4. Сопоставление основных затрат при десульфурации чугуна по разным технологиям (на примере снижения содержания серы с 0,020 до 0,002% в 300-тонных заливочных ковшах)

№№ п/п	Показатели	Вариант I – (украинский процесс) вдувание гранулированного магния	Вариант II – (процесс ESM, «Polysius-SVAL», «Danielli») вдувание магния с известью	Вариант III – KR <sub>CaO</sub> – процесс, известь+CaF <sub>2</sub> , перемешивание мешалкой
1.	Расход реагентов, кг/т чугуна – магний – известь молотая – известь + CaF <sub>2</sub> – всего реагентов	0,31 [3,8] – – 0,31	0,49 [2,16] 1,55 – 2,04	– – 6,9 [9] 6,9
2.	Стойкость фурмы (мешалки), количество обработок [26]	150	150	450
3.	Снижение температуры чугуна, °C [11]	5	7	42
4.	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком и при скачивании шлака, кг/т чугуна [11]	1,84	3,73	10,85
5.	Затраты при десульфурации, долл. США/т чугуна. 5.1. На магний [26]. 5.2. На молотую порошковую известь [26]. 5.3. На смесь фракционированной извести с плавиковым шпатом [9]. 5.4. На компенсацию потерь температуры чугуна [26]. 5.5. На фурму (мешалку) [26]. 5.6. Нам потери чугуна [11,26]. 5.7. Затраты на удаление и утилизацию ковшевого шлака [26]. 5.8. Расходы по переделу и все прочие расходы по обслуживанию комплекса десульфурации.	0,93 – – 0,15 0,056 0,575 0,30 0,42	1,47 0,388 – 0,20 0,056 1,044 0,50 0,51	– – 1,38 1,26 0,025 3,038 1,20 0,42
6.	Суммарные затраты по п.п. 3.1–3.8, долл. США/т чугуна	2,431	4,168	7,323
	Суммарные затраты в относительных единицах	1	1,72	3,01

Из табл.4 следует, что наибольшие затраты на обессеривающий реагент характерны для варианта II (вдувание смеси магния с известью). Самые высокие затраты, связанные на потерей чугуна, снижением температуры, удалением и утилизацией шлаков сопровождают KR<sub>CaO</sub> – процесс.

Расходы по переделу наиболее высокие при вдувании магния в смеси с известью.

В итоге самые низкие суммарные затраты характерны для процесса вдувания гранулированного магния без разубоживающих добавок – 2,431 долл. США/т чугуна, а самые высокие – 7,323 долл. США/т чугуна при  $KR_{CaO}$ –процессе. Вдувание магния в смеси с известью занимает промежуточное положение. В относительных единицах процессы вариантов I, II и III соотносятся 1:1,72:3,01 (см. табл.4). Необходимо отметить, что приведенные в таблице 4 затраты на потери чугуна (п.5.6) для всех технологий десульфурации включают одинаково около 0,5 долл/т с исходным ковшевым шлаком по вине доменщиков, не обеспечившим налив ковшей на выпуске из доменной печи без попадания шлака в ковши.

Сопоставление затрат по разным технологиям десульфурации чугуна свидетельствует о том, что, несмотря на то, что технологии по вариантам II и III применяют в составе реагентов более дешевую известь, затраты на их реализацию получаются наиболее высокие. Самым экономичным является процесс вдувания гранулированного (зернистого) магния без различных разубоживающих добавок, и прибыль от его применения в сравнении с процессом вдувания смесей составляет 1,72 долл. США/т чугуна, а в сравнении с  $KR_{CaO}$  – процессом – 4,89 долл. США/т чугуна. При увеличении количества удаляемой серы экономические преимущества технологии по варианту I увеличиваются.

**Заключение.** Таким образом, предложенный и приведенный метод комплексной оценки показателей процессов внепечной десульфурации чугуна позволяет более глубоко и всесторонне проанализировать различные технологические решения.

Показано, что несмотря на то, что магний значительно дороже извести, все процессы десульфурации с применением извести являются наиболее затратными, из которых  $KR_{CaO}$  – процесс является наиболее неэкономичным.

Инжекционные процессы вдуванием диспергированных магнийсодержащих реагентов являются более экономичными и рациональными, так как используют наименьшее количество реагентов и обладают большей степенью гарантий.

Из всех применяемых процессов внепечной десульфурации наиболее экономичным, рациональным и предпочтительным является украинский процесс внепечной десульфурации чугуна вдуванием диспергированного (зернистого, гранулированного) магния без разубоживающих добавок через погружаемые фурмы с применением специальной системы дозирования и инъекции.

1. *IX Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. – Галати, Румыния. – 2006. – 91 с.

2. *Освоение технологии производства сталей с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства* ОАО «Северсталь» / А.А.Степанов, А.М.Ламухин, С.Д.Зинченко и др. // Сб. трудов VIII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. Нижний Тагил / Россия. 2004. – С. 83–87.
3. *Создание и развитие рациональных технологий внепечной десульфурации чугуна* / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, Лю Дун Ие и др. // Сталь. – 2009. – № 4. – С.13–20.
4. *Кушнарев А.В.* Опыт использования инъекционных технологий внепечной десульфурации ванадийсодержащего чугуна – полупродукта в конвертерном цехе НТМК // Сб. трудов VIII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Нижний Тагил, Россия. – 2004. – С.5–11.
5. *Шевченко А.Ф., Вергун А.С., Двоскин Б.В.* Внепечная десульфурация чугуна магния в заливочных ковшах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. – № 7. – С.101–103.
6. *Процесс* особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния в условиях крупнопромышленного производства стали. / А.Ф.Шевченко, А.С.Вергун, А.С.Булахтин и др. // *Металл и литье Украины*. – 2006. – №1. – С.84–89.
7. *Сравнение* эффективности современных технологий внедоменной десульфурации чугуна. / А.М.Зборщик, С.В.Куберский, К.Е.Писмарев и др. // *Сталь*. 2010. – № 1. – С. 21–23.
8. *Большаков В.И., Шевченко А.Ф.* Технология особо глубокой десульфурации чугуна // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 6. – С.9–12.
9. *Технологические* регламенты на десульфурацию чугуна известьесодержащими материалами в заливочных ковшах сталзавода № 2 компании CSC (Тайвань) при обработке KR–процессом.
10. *Инь Жуй Ю.* Отечественное сталеплавильное производство – обзор состояния и развития технологий до 2010 г. // *Научно–техническая конференция по выплавке и непрерывной разливке стали*. Сб. докладов. – Ханчжоу / КНР.
11. *Влияние* внепечной подготовки чугуна на потери чугуна с ковшевым шлаком. / А.Ф.Шевченко, Лю Дун Ие, Л.П.Курилова и др. // *Черная металлургия*. Бюлл. НТЭ информации. – Москва. – 2009. – Вып. 2 (1310). – С.31–35.
12. *VII Международный симпозиум* по десульфурации чугуна и стали. Сб. докладов. Аниф / Австрия. // 2002. – 93 с.
13. *VIII Международный симпозиум* по десульфурации чугуна и стали. Сб. докладов. – Нижний Тагил, Россия. – 2004. – 87 с.
14. *Баранник И.А., Комелин И.М., Савенец Ю.И.* История и перспективы производства гранулированного магния. // *Цветные металлы*. – 2008. – №3. – С.66–71.
15. *Новый комплекс* особо глубокой десульфурации чугуна в большегрузных заливочных ковшах. / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, А.М.Башмаков и др. // *Металлург*. – 2010, – № 11. – С.34–37.
16. *Опыт работы* Череповецкого металлургического комбината по достижению ультранизкого содержания серы в чугуне с использованием крупнотоннажной установки десульфурации чугуна. / А.Н.Луценко, А.А.Немтинов, С.Д.Зинченко и др. // Бюл. «Черная металлургия». ОАО «Черметинформация». – Москва. – 2209. – № 7. – С.61–63.

17. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М., Металлургия, 1980. – 239 с.
18. *Применение* технологии десульфурации чугуна чистым гранулированным магнием на Уханьском металлургическом комбинате. / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун и др. // *Сталь*. – 2002. – № 4. – С.46–48.
19. *Создание* и промышленное применение современных аппаратурно-технологических комплексов десульфурации чугуна на металлургических комбинатах Китая. / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, В.А.Александров и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 4. – С.6–10.
20. *Сравнение* эффективности современных технологий внедоменной десульфурации чугуна. / А.М.Зборщик, С.В.Куберский, К.Е.Писмарев и др. // *Сталь*. – 2010. – № 1. – С.21–23.
21. *Корос П.И., Турунен М.Т.* Вдувание извести и магния для десульфурации металла // *Инжекционная металлургия*. Лулсо, Швеция. Пер. с англ. – М., Металлургия, 1981. – С.157–160.
22. *The Global Voice For Magnesium. International Magnesium Association. Prague / Czech Republic.* 1999. 173 p.
23. *Двоскин Б.В., Ткач Н.Т., Шеенко М.И. и др.* // *РЖМЕТ*. – 1987. – № 10. – С.18. – 10В126. Деп. Депонированные научные работы, № 4061–ЧМ87.
24. *Особенности* формирования шлака в ковше при внедоменной десульфурации инжестированием гранулированного магния. / А.С.Вергун, П.С.Лындя, А.Ф.Шевченко, А.Л.Руденко // *Металознавство та термічна обробка металів*. Сб. ДСНАУ, Днепропетровск. – 2007. – С.48–51.
25. *Особенности* структуры металлической и неметаллической фаз шлака, формирующегося в ковше при десульфурации чугуна магнием без добавок. / А.С.Вергун, А.М.Нестеренко, В.Г.Кисляков, А.Ф.Шевченко // *Теория и практика металлургии*. – Днепропетровск. – 2009, – С.86–90.
26. *Международная* научно-техническая конференция по выплавке и непрерывной разливке стали. Сб. докладов. – Ханчжоу / КНР. – 2008. – 468 с.

*Статья рекомендована к печати докт.техн.наук А.С.Вергуном*

### ***А.П.Шевченко***

#### **Комплексний підхід при виборі та оцінюванні технології позапічної десульфуратії чавуну**

Наведено аналіз техніко-економічних показників різних процесів позапічної десульфуратії чавуну. На відміну від методик, які раніш застосовувались, проведена оцінка по широкому переліку показників. Показано, що витрати на реагент є недостатнім показником для оцінки процесу, а необхідно враховувати усі операції і складові позапічної підготовки чавуну. Найбільш пріоритетним встановлено процес вдування зернистого магнію без збіднюючих добавок, найбільш витратним  $KR_{CaO}$  – процес.