

**В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, А.С.Булахтин, А.М.Башмаков,
Л.П.Курилова**

МАТЕРИАЛО – ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПРОЦЕСС ГЛУБОКОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Целью работы являлось сравнение основных технологических показателей промышленной работы комплексов на сталеплавильных заводах с мощностью от 2,1 до 6,0 млн.т/год, на которых достигнуто снижение серы в чугуне с 0,006–0,099 % до 0,0005–0,010 %. Показано, что разработанный и освоенный украинскими специалистами новый технологический процесс рафинирования чугуна дуванием магния без добавок обеспечивает глубокую и особо глубокую десульфурацию чугуна в условиях промышленного металлургического производства. Разработка проверена широкой промышленной практикой и рекомендуется для широкого применения на металлургических предприятиях.

десульфурация чугуна, технология, промышленные комплексы, металлургическое производство

Современное состояние вопроса. В связи с расширением производства стали с низким и особо низким ($\leq 0,005$ %) содержанием серы появилась и все время расширяется потребность конвертерного производства в жидком чугуне с низким ($\leq 0,006\%$) и сверхнизким ($\leq 0,001$ – $0,002\%$) содержанием серы. Опыт работы в современных конвертерных цехах показал, что требования сталеплавильщиков настолько жесткие, что при необходимом содержании серы в чугуне 0,001–0,002 % браковочным признаком считается даже содержание серы 0,003 %. Актуальность проблемы возрастает в связи с необходимостью обеспечения требований крупнопромышленного конвертерного производства и непрерывной разливки стали, что сопровождается значительными объемами потребления чугуна (8–16 тыс.т ежедневно), существенной массой металла в ковшах (более 140 т) и небольшим циклом (до 20–30 мин) подачи низкосернистого и очищенного от шлака чугуна в конвертер.

Анализ применяемых технологий показал, что они не отвечают в полной мере всем возросшим требованиям к внепечной обработке чугуна, поэтому необходимы были новые подходы и разработки в части технологии и техники ввода обессеривающего реагента в расплав чугуна. Оценка потенциальных возможностей, имеющиеся результаты исследований [1,2,3] и опыт внепечной обработки чугуна [4,5,6] свидетельствуют о том, что магний является достаточно эффективным и перспективным реагентом для обеспечения особо глубокой десульфурации чугуна в условиях крупнопромышленного производства. Он может достаточно хорошо растворяться в жидком чугуне (рис.1), чем создаются исключительно благоприятные условия для протекания массообменных процессов при внепечном рафинировании чугуна. Анализ зависимости возможного насыщения

чугуна магнием ($[Mg]_{\text{нас}}$) свидетельствует о его возрастании с уменьшением температуры и ростом давления.

Целью работы являлось сравнение основных технологических показателей промышленной работы комплексов на ряде сталеплавильных заводов с мощностью от 2,1 до 6,0 млн.т/год и снижением серы в чугуне с 0,006–0,099 % до 0,0005–0,010 %.

Изложение основных материалов исследования.

Используя имеющиеся экспериментальные данные по равновесным параметрам системы $[Mg] - [S]$, было получено уточненное выражение соотношения величин $[Mg]_{\text{равн.}}$ и $[S]_{\text{равн.}}$ в зависимости от температуры жидкого чугуна ($t_{\text{ж.ч.}}$):

$$[Mg]_{\text{равн.}} \cdot [S]_{\text{равн.}} = (0,00857 \cdot t_{\text{ж.ч.}} - 10,5979) \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

Расчеты по выражению (1) показывают, что снижение содержания серы в чугуне ниже 0,003 % (рис.2) и повышение температуры рафинируемого расплава сопровождаются резким увеличением равновесного содержания магния в чугуне. Номограммы рис. 1 и 2 послужили базой для разработки технологии и аппаратуры процессов глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна в условиях крупнопромышленного производства стали.

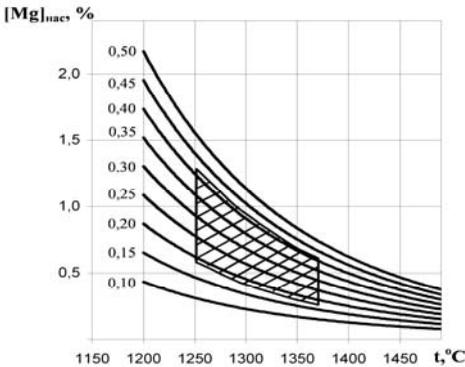


Рис. 1 Зависимость насыщения чугуна магнием ($[Mg]_{\text{нас}}$) в равновесном состоянии от температуры (t) в исследуемой зоне. Цифры у кривых – абсолютное давление в исследуемой зоне, МПа. Заштрихованная область – зона характерных параметров температуры и давления при внепечной обработке чугуна.

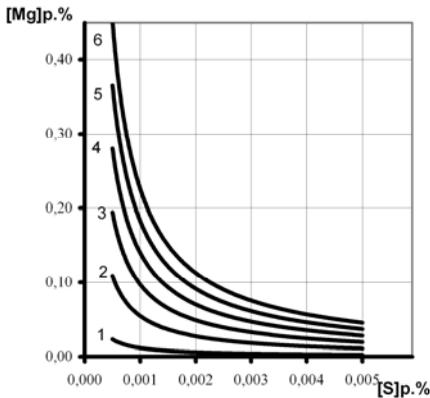


Рис. 2 Зависимость равновесного содержания магния ($[Mg]_{\text{р}}$) в жидком чугуне от содержания серы ($[S]_{\text{р}}$) при различных температурах
1 – 1250 °C; 2 – 1300 °C; 3 – 1350 °C; 4 – 1400 °C; 5 – 1450 °C; 6 – 1500 °C.

Выполненный расчетный анализ распределения усваиваемого чугуном магния показывает, что основными статьями расхода являются расход магния на взаимодействие с серой, на раскисление и на насыщение чугуна магнием. Доля каждого из них не постоянна и меняется в зависимости от начального и конечного содержания серы в чугуне, а также от температуры расплава. Особо глубокая десульфурация чугуна характеризуется большим расходом магния на серу и на насыщение (сумма 80–90 % от общего усваиваемого магния). Снижение температуры увеличивает долю магния, расходуемую на серу, что обусловлено меньшим расходом магния на насыщение чугуна и соответственно меньшим общим количеством необходимого магния. Последние положения явились основой выбора технологического места (в цепи процессов подготовки чугуна) организации суперглубокой десульфурации чугуна – в заливочных ковшах сталеплавильных цехов.

Особенности осуществления суперглубокой десульфурации чугуна определили необходимость пересмотра методов в реализации технологии вдувания магния в расплав (рис.3).

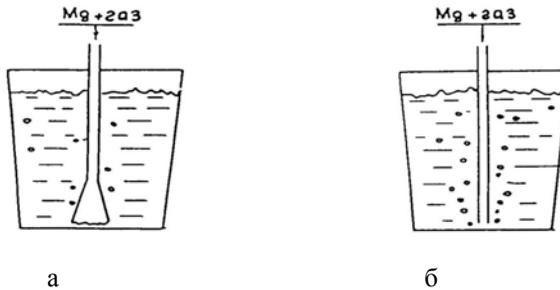


Рис.3 Принципиальные схемы вдувания зернистого (гранулированного) магния в ковш с жидким чугуном. а – вдувание магния через фурму с испарительной камерой на выходе (глубина расплава в ковше < 2,6 м); в – вдувание магния через фурму без испарительной камеры (глубина расплава в ковше >2,7–2,8 м).

Увеличение удельных расходов магния и соответственно увеличение длительности процесса его ввода в чугун явилось основной причиной изменения технологии и техники вдувания. Прежде всего, с целью обеспечения наиболее благоприятных условий усвоения обессеривающего реагента и наименьшего его расхода процесс реализуется вдуванием зернистого или гранулированного магния без всякого вида добавок.

Техника вдувания включает один из 2-х отличительных методов вдувания:

1. При глубине расплава в ковше меньше 2,6 м десульфурация осуществляется вдуванием магния через погружаемую фурму с испарительной камерой на окончании (рис.3,а) и низких скоростях (<30 м/с) потока.

2. При глубине расплава в ковше больше 2,7 м десульфурация осуществляется вдуванием магния через погружаемую фурму со специальным оголовком на выходе (рис.3,б) при скорости потока более 60 м/с и диспергировании его в прифурменной зоне.

Для стабилизации результатов рафинирования (в условиях переменных параметров обработки), исключения возможностей возврата серы в расплав даже при особо глубокой десульфурации чугуна и улучшения удаления сернистых шлаков после рафинирования предусмотрена корректировка состава ковшевых шлаков небольшой (1,5–2 кг/т чугуна) добавкой фракционированных материалов на основе недефицитных и дешевых отходов огнеупорно-металлургических производств.

По результатам опытных и опытно-промышленных обработок чугуна сформулированы основные составляющие и параметры технологии и аппаратурной схемы глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна в заливочных ковшах различного типоразмера. Разработан алгоритм аппаратурно-технологического комплекса глубокой десульфурации чугуна, включающий все составляющие технологии и операций, начиная от получения реагентов до вдувания магния и удаления шлака. Разработанная и доведенная аппаратурно-технологическая схема позволяет работать как в полностью автоматизированном, так и полуавтоматизированном пооперационном режиме. Система автоматизации обеспечивает функционирование как собственно комплекса десульфурации, так и в составе единой системы АСУ ТП завода. Глубокая десульфурация чугуна обеспечивается при наименьших расходах материалов и реагентов. Зависимость удельного расхода магния от начального содержания серы в чугуне при суперглубокой десульфурации (содержание серы после обработки $<0,002\%$) имеет практически линейный характер для ковшей различного типоразмера (рис.4). Технологический процесс обеспечивает также гарантированное получение чугуна практически без серы – содержание серы $\leq 0,001\%$ при наименьших материало-энергетических затратах.

Разработанный технологический процесс особо глубокой десульфурации чугуна прошел широкую промышленную проверку и освоен в составе комплексов десульфурации мощностью от 2 до 6 млн.т/год, обеспечивая заданное снижение содержания серы в чугуне. Основное применение этот процесс получил в составе модернизированных и новых мощностей по выплавке сталей меткомбинатов КНР. По состоянию на середину 2009 г. на комбинатах КНР по украинской технологии сооружено и эксплуатируется 59 комплексов десульфурации чугуна вдуванием магния с суммарной мощностью более 70 млн. т/год. Разработаны и выданы предложения на сооружение аналогичных комплексов десульфурации чугуна на меткомбинатах "Азовсталь", им. Ильича, "Запорожсталь", Енакиевском, "Криворожсталь" и им. Дзержинского. В таблице 1 приведены показатели работы наиболее характерных установок десульфурации.

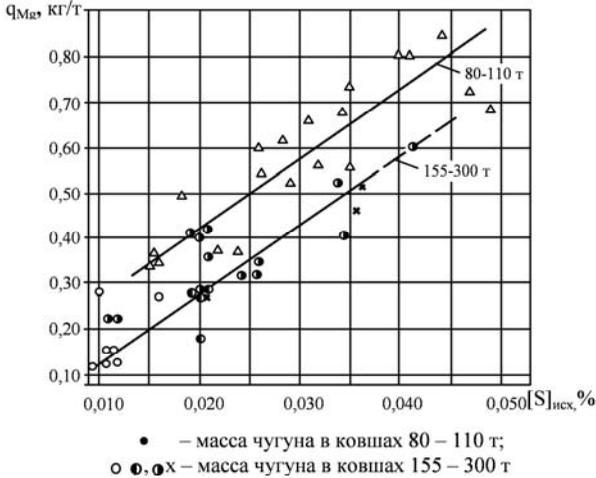


Рис. 4 Зависимость удельного расхода магния (q_{Mg}) для суперглубокой десульфурации (до 0,002 % серы) от исходного содержания серы ($[S]_{исх.}$). Цифры на диаграмме – масса чугуна в ковше.

В последнее время в связи с необходимостью интенсификации металлургического производства создан модернизированный вариант технологии рафинирования чугуна вдуванием магния, который при вдувании через одну фурму обеспечивает снижение содержания серы в чугуне до $<0,001 \div 0,002$ % при интенсивности ввода магния до 26 кг/мин и соответственно сокращении продолжительности процесса вдувания до 3–6 мин (при массе чугуна в ковше 140–300 т). Фурменное устройство не имеет испарительной камеры, а система дозирования обеспечивает заданные режимы подачи реагента с погрешностью менее 0,2 %. Сопоставление представленного выше украинского технологического процесса глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния с наиболее эффективными мировыми аналогами (рис.5) показывает, что вдувание чистого магния (кривые 1,6,7,8,9) обеспечивает самое высокое усвоение магния, наиболее низкие расходы как магния, так и реагента в целом. Затраты на обработку чугуна по представляемой украинской технологии ниже чем у наиболее экономичного зарубежного аналога на 1–2 долл./т чугуна и более (табл.2). Расположение комплекса глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния по украинской технологии в действующем современном конвертерном цехе представлено на рис.6.

Таким образом, представленный выше материал свидетельствует о том, что разработанный и освоенный украинскими специалистами новый технологический процесс рафинирования чугуна вдуванием магния без добавок обеспечивает глубокую и особо глубокую десульфурацию чугуна в условиях крупнопромышленного металлургического производства. Надежность, экономичность и эффективность процесса подтверждает его высокую рациональность и длительную перспективу применения. Разра-

ботка проверена широкой промышленной практикой и рекомендуется для широкого применения на металлургических предприятиях.

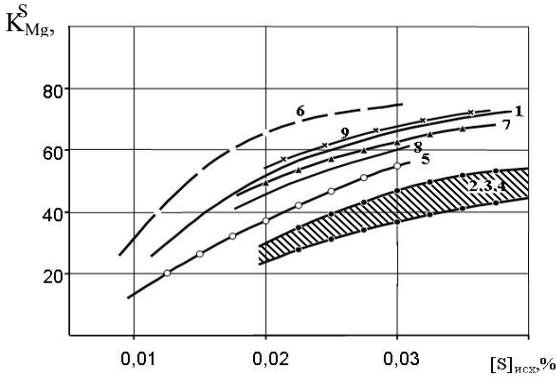


Рис.5 Зависимость степени усвоения магния на серу (K_{Mg}^S) от исходного содержания серы в чугуна ($[S]_{исх.}$) при конечном содержании серы после десульфурации 0,005 %. **1** – Процесс на концерне «Шоуган» (КНР); вдувание гранулированного магния азотом; Т - 1350 °С; масса чугуна 195; **2,3,4** – Процессы вдувания смеси CaO+Mg азотом; Т - 1300-1400 °С; масса чугуна 160-270 т.; **5** – Процесс ESM (США) на комбинате "Baosteel" (КНР); вдувание смеси CaC₂+Mg; Т - 1350 °С; масса чугуна 280 т.; **6** – Процесс на комбинате «Азовсталь»; вдувание гранулированного магния (без добавок) аргоном; Т - 1300 °С; масса чугуна 250 - 300 т.; **7** – Процесс на Уханьском меткомбинате (КНР); вдувание гранулированного магния азотом; Т - 1300 °С; масса чугуна 100 т.; **8** – Обработка гранулированным магнием на Сянтаньском меткомбинате (КНР); Тср - 1300 °С; масса чугуна 80 т.; **9** – Обработка гранулированным магнием на Тангшанском меткомбинате (КНР); Тср - 1320 °С; масса чугуна 154 т.

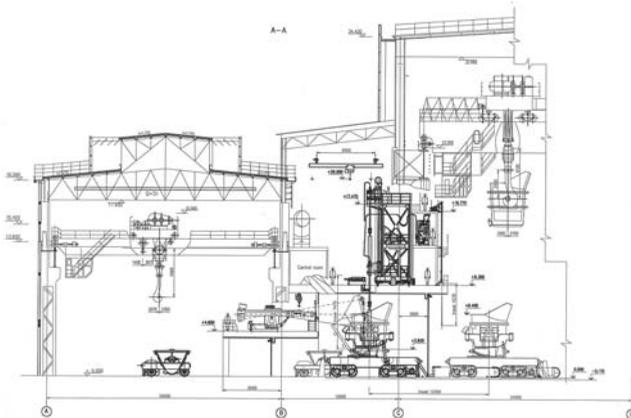


Рис. 6 Расположение типичного комплекса глубокой десульфурации чугуна в заливных ковшах.

Таблица 1. Показатели и параметры (средние) промышленных обработок чугуна гранулированным или зернистым магнием на ряде меткомбинатов Китая при вдувании магния через специальные фурмы (без испарительной камеры) в заливные ковши по украинской технологии

Наименование меткомбината	Мощность установки десульфурации, млн. т/год	Масса чугуна в ковше, т	Количество шлака в ковше перед десульфурацией, % от массы чугуна	Удельный расход магния, кг/т чугуна	Содержание серы в чугуне, %		Степень десульфурации чугуна, %		Расход магния на удаленную серу, β , кг/кг	Степень усвоения магния на серу, K_{Mg}^S , %
					Исходное	После десульфурации	Итоговая (Ст.Д)	Удельная (D)*		
Пекинский	2,8	195	1,35	0,25	0,014–0,058	0,002–0,010	74	29,2	1,26	60
Гангшаньский	3,0	155	1,80	0,36	0,020–0,099	0,002–0,010	74	21,3	1,25	62
Тайюаньский	2,1	160	1,41	0,32	0,017–0,043	0,002–0,005	77	22,5	1,70	46
Цяньянский	6,0	195	1,25	0,36	0,022–0,062	0,005–0,010	81	22,6	1,39	55
Уханьский	3,8	265	2,06	0,36	0,006–0,051	0,002–0,005	87	24,1	1,78	42
Шаганский	3,8	180	0,76	0,32	0,006–0,047	0,001–0,005	83	26,1	2,13	36
Баотуоский	2,2	96	1,60	0,53	0,021–0,096	0,001–0,007	89	17,2	1,46	52
Гонгхуанский	3,0	146	0,86	0,51	0,015–0,055	0,0005–0,005	93	18,6	1,90	40
Среднее по массиву**		$\frac{96}{265}$ 177	$\frac{0,76}{2,06}$ 1,46	$\frac{0,25}{0,53}$ 0,35	$\frac{0,006}{0,099}$ 0,031	$\frac{0,0005}{0,010}$ 0,005	81	22,1	1,38	50

* D – удельная степень десульфурации (%), приходящаяся на каждые 0,1 кг/т вдуваемого магния.

** – в числителе – пределы изменения средних величин, в знаменателе – среднее по всем установкам десульфурации чугуна.

Таблица 2. Сопоставление основных показателей десульфурации чугуна вдуванием магний–известковой смеси (процесс ESM) в 300-тонные ковши ОАО "Северсталь" и вдувание гранулированного магния без добавок (процесс Украины, ИЧМ) в 220–300-тонные ковши на меткомбинатах Китая (Ухань, Пекин, Тангшань и др.)

№	Показатели	Вдувание смеси CaO +Mg (процесс ESM), ОАО"Северсталь" (Череповец, Россия) [7]	Вдувание гранулированного магния (украинская технология), меткомбинаты Китая
1	Содержание серы в чугуне,%		
	– исходное	0,020	0,020
	– после десульфурации	0,002	0,002
2	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:		
	– магния	0,49	0,30
	– молотой извести	1,55	–
	– общий расход реагента	2,04	0,30
3	Расход реагента на обработку, кг/ковш (300 т чугуна в ковше)	612	90
4	Длительность вдувания магния, мин	6,5	7,5
5	Снижение температуры чугуна, °С	6,72	5
6	Дополнительные потери чугуна с образующимся шлаком, кг/т чугуна	1,84	0,27
7	Затраты на десульфурацию, долл.США/т чугуна:		
	а) на магний	1,225	0,750
	б) на молотую известь	0,295	–
	в) на потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком	0,276	0,040
	г) на потери температуры чугуна	0,134	0,100
	Суммарные затраты по пунктам "а", "б", "в", "г".	1,930	0,890
8	Прибыль (экономия затрат) от использования украинской технологии вдувания гранулированного магния по сравнению с вдуванием смеси извести с магнием (ESM), долл.США/т чугуна	–	1,04

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980.– 238с.
2. *Выбор рациональной технологии внепечной десульфурации чугуна в условиях современного металлургического производства.* / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, Л.В.Быков и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 5. – С.23–27.
3. *Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок.* / А.М.Зборщик, В.А.Курганов, Ю.Б.Бычков и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 129 с.
4. *Опытно-промышленное опробование производства чугуна с супернизким содержанием серы для выплавки в конвертерах чистой по сере стали.* / А.Ф.Шевченко, Н.Т.Ткач, Б.В.Двоскин и др // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1991. – № 3. – С.7 – 9.
5. *Создание и промышленное применение современных аппаратурно-технологических комплексов десульфурации чугуна на меткомбинатах Китая.* / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, В.А.Александров и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 4, 5. – С.6–11.
6. *Промышленное производство особо чистого по сере доменного чугуна.* / С.Т.Плискановский, Н.А.Воронова, А.Ф.Шевченко и др // Металлург. – 1980. – № 4. – С.19–21.
7. *Освоение технологии производства сталей с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь»* / А.А.Степанов, А.М.Ламукин, С.Д.Зинченко и др. // Сб. трудов VIII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. Нижний Тагил. – 20–24 сентября 2004. – С.83–87.
8. *Рациональный технологический процесс внепечной десульфурации чугуна.* В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, Лю Дун Ие и др. Техника предварительной обработки чугуна. Сб. тр. Всекитайской конференции. Сучжоу 15–18 апр. 2009 г. – С.81–99.

*Статья рекомендована к печати:
заместитель ответственного редактора
раздела «Внепечная обработка чугуна и стали»
докт.техн.наук А.С.Вергун*

В.І.Большаков, А.Ф.Шевченко, А.С.Булахтін, А.М.Башимаков, Л.П.Курілова
Матеріал – енергозберігаючий процес глибокої десульфуратії чавуну

Метою роботи є порівняння основних технологічних показників промислової роботи комплексів на сталеплавильних заводах з потужністю від 2,1 до 6,0 млн.т/рік, де досягнуто зниження сірки в чавуні з 0,006–0,099 % до 0,0005–0,010 %. Показано, що розроблений і освоєний українськими фахівцями новий технологічний процес рафінування чавуну вдуванням магнію без домішок забезпечує глибоку і особливо глибоку десульфуратію чавуну в умовах промислового металургійного виробництва. Розробку перевірено промисловою практикою та рекомендовано до широкого застосування на металургійних підприємствах.