

А.Ф. Шевченко, А.М. Башмаков, Л.П. Курилова, Н.Т. Ткач

РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДОМЕННОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЖИДКОГО ЧУГУНА В КОВШАХ ВДУВАНИЕМ ДИСПЕРГИРОВАННОГО МАГНИЯ

Институт черной металлургии НАН Украины

Приведены этапы разработки, освоения и развития процесса десульфурации чугуна вдуванием магния. Показаны объемы применения последних 5 лет и показатели работы отдельных комплексов десульфурации. Представлены результаты исследований отдельных сторон процесса внепечной обработки и пути развития.

8 января 2008 года исполнилось 100 лет со дня рождения З.И.Некрасова – одного из крупнейших ученых в области теории и практики металлургии чугуна, академика АН УССР, создателя и директора одного из больших научно–исследовательских центров – Института черной металлургии НАН Украины. Академик Некрасов З.И. был не только выдающимся доменщиком, но и весьма значимым ученым в области металлургии черных металлов, под руководством которого разрабатывался ряд новых научных направлений, которые в последующем вошли неотъемлемым звеном в технологическую цепь процессов выплавки и производства черных металлов. К одним из таких направлений относится комплекс процессов внепечной обработки жидкого чугуна.

В 60–х – начале 70–х годов научной школой профессора Н.А.Вороновой при активнейшей поддержке и помощи З.И.Некрасова были разработаны основы технологического процесса рафинирования жидкого чугуна в чугуновозных ковшах вдуванием диспергированного магния [1]. Более 40 лет назад по этим разработкам на опытно–промышленной установке металлургического комбината «Азовсталь» впервые в мировой практике проведены промышленные продувки чугуна в доменных ковшах вдуванием магнийсодержащих смесей на основе порошкового магния и извести [2]. После обработки был получен чугун с содержанием серы до 0,003–0,005% и кислорода до 0,002–0,003%.

На основе этого опыта были спроектированы и построены практически одновременно на 3–х металлургических комбинатах Украины («Азовсталь», им. Ильича и «Запорожсталь») промышленные установки десульфурации чугуна вдуванием порошкового магния с добавкой извести или обожженного доломита [1] мощностью 1–1,2 млн. т/год каждая, которые были введены в эксплуатацию в 1971–1972 гг. Это были первые в мире крупные промышленные объекты внепечной обработки чугуна, использующие технологию инжектирования диспергированного магния в расплав. На зарубежных предприятиях аналогичные установки начали применять

(вслед за Украиной) практически с середины 80-х годов, т.е. через 15–20 лет.

Дальнейшие разработки, исследования и практика показали [1,3–5], что вдувание магния в диспергированном виде позволяет решать вопросы регулируемого и управляемого его ввода в расплав чугуна, вследствие чего технологический процесс рафинирования по комплексу показателей опередил все другие ранее известные. Одновременно теоретически и экспериментально работами Института черной металлургии было установлено [1,4,5], что разубоживание магния добавкой твердых (например, извести) и газообразных (азота, воздуха и др.) составляющих во вдуваемый реагент может существенно снижать эффективность усвоения магния по прямому назначению (удаление серы, раскисление, рафинирование, модифицирование металла) за счет как более низкой активности рафинирующего реагента, так и за счет прямого химического взаимодействия с компонентами добавок [1,4]. На базе этих положений Институтом черной металлургии было принято кардинальное решение в направлении дальнейшего видоизменения процесса вдувания магния в жидкий чугун – предложен процесс инъекционного ввода в расплав чугуна магния в виде гранул или округленных (компактных) зерен без любых пассивирующих добавок.

Для реализации достаточно сложного процесса вдувания «чистого» (без добавок) магния в жидкий чугун были разработаны специальная дозирующая аппаратура, особая схема вдувания и соответственно огнеупорные погружаемые фурмы необычной конструкции [1,4,5]. В начале 70-х годов были проведены первые удачные обработки чугуна вдуванием магния в «чистом» виде [1], а в 1972–1973 гг. все работавшие ранее на Украине установки десульфурации чугуна вдуванием магниихвостков смесей были переоборудованы и переведены на технологию вдувания гранулированного магния без пассивирующих добавок. С этого времени в Советском Союзе и на Украине отечественные процессы реализовали практически только вдуванием гранул магния без добавок.

Последующая промышленная практика применения этого технологического процесса показала его весьма высокую эффективность. Так, например, в 1976 г. Советский Союз лишился возможности получать из Германии газопроводные трубы большого диаметра в северном исполнении, рассчитанные на большие давления газа и очень низкие температуры эксплуатации. Для обеспечения производства таких труб на базе металлургического производства комбината им.Ильича Институтом черной металлургии и меткомбинатом была реализована сквозная комплексная технология выплавки, разливки и проката трубных марок стали 17Г2АФ и 08Г2ФБ. Первым звеном этой технологии была глубокая десульфурация чугуна вдуванием гранулированного магния, что позволило обеспечить содержание серы в чугуне миксера на уровне 0,003–0,004%. Для мировой практики того времени (1976 г.) такой уровень обеспечения конвертеров глубоко обессеренным чугуном был новым и ранее не применявшимся.

В последующие годы Институтом черной металлургии совместно с Институтом титана, НПО «Инфоком» и другими соисполнителями был выполнен большой комплекс работ по исследованию, разработкам и совершенствованию технологии, оптимизации тепло– массообменных процессов, усовершенствованию аппаратурно–технологической схемы и оборудования, созданию новых принципиальных решений регулирования и поддержания нужных режимов инжекционно–дозировуемой системы, а также существенной оптимизации режимов вспомогательных операций и процессов. Это позволило создать надежную и устойчивую технологию вдувания диспергированного магния в ковши с различной массой чугуна (30–320 т) при широком диапазоне исходного содержания серы в чугуне (0,015–0,200%), любом заданном конечном содержании серы (вплоть до 0,001–0,002%) и больших объемах обработки чугуна.

Сооружаемые и действующие в настоящее время мощности десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния представляют собой современные автоматизированные и высокомеханизированные комплексы, обеспечивающие как заданную глубину десульфурации расплава, так и удаление высокосернистых и с низкой основностью ковшевых шлаков перед сливом чугуна в конвертера. Комплексы десульфурации имеют наименьшее потребление материало– энергоресурсов, что обусловлено высокой степенью усвоения магния – до 95% и выше.

Наибольшее распространение украинская технология десульфурации чугуна вдуванием магния в последнее время получила на металлургических комбинатах КНР в связи с активной модернизацией и реконструкцией сталеплавильного производства Китая. Здесь с 2002 г. сооружено и введено в эксплуатацию по технологии ИЧМ 47 новых технологических комплексов десульфурации чугуна и скачивания шлака (табл.1) с единичной мощностью каждого от 0,5 до 3,8 млн.т чугуна/год и суммарной мощностью более 53 млн.т/год. Кроме этого, завершается проектирование и сооружаются с вводом в эксплуатацию в 2008 г. еще 15 комплексов внепечной обработки чугуна.

Таблица 1. Работающие, строящиеся и проектируемые по украинской технологии комплексы десульфурации чугуна вдуванием магния и скачивания шлака на металлургических комбинатах Китая (за период 2002–2007 г.г.)

	Предприятие	№ комплекса десульфурации	Типоразмер ковша	Мощность комплекса, млн.т чугуна/год
	Сданы в эксплуатацию			
1	Уханьский меткомбинат, сталзавод № 2	№ 1	Заливочный, 100–150 т	1,2
		№ 2		1,2

2	Тайюаньский меткомбинат	№ 1 № 2 № 3	Заливочный, 90 т	0,9 1,0 1,0
3	Пекинский меткомбинат, стальной завод № 2	№ 1 № 2	Заливочный, 200 т	1,4 1,4
4	Сянтаньский меткомбинат, стальной завод № 2	№ 1 № 2	Заливочный, 85–95 т	1,2
5	Сянтаньский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1 № 2	Заливочный, 120–150 т	2,1
6	Ханданский меткомбинат	№ 1	Заливочный, 120 т	1,0
7	Тангшаньский меткомбинат, стальной завод № 2	№ 1 № 2	Заливочный, 160 т	3,0
8	Тангшаньский меткомбинат, стальной завод № 1	№ 1 № 2	Заливочный, 50–55 т	1,0
9	Тяньцзиньский меткомбинат	№ 1	Заливочный, 100 т	0,8
10	Циньянский меткомбинат	№ 1 № 2 № 3	Заливочный, 220 т	6,0
11	Циндаоский меткомбинат, стальной завод № 1	№ 1 № 2	Доменный, 50–60 т	0,5 0,5
12	Циндаоский меткомбинат, стальной завод № 2	№ 1 № 2	Заливочный, 90 т	0,5 0,5
13	Линьюаньский меткомбинат	№ 1 № 2	Доменный, 60 т	2,0
14	Тонгхуанский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1 № 2	Заливочный, 120–145 т	3,0
15	Саньминский меткомбинат	№ 1	Заливочный, 75–95 т	1,0
16	Уханьский меткомбинат, стальной завод № 3	№ 1	Заливочный, 300 т	3,8
17	Дачжоуский меткомбинат	№ 1 № 2	Доменный/заливочный, 80 т	2,3
18	Лючжоуский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1 № 2	Заливочный, 100/110 т	2,3
19	Ханчжоуский меткомбинат	№ 1 № 2	Доменный, 100 т	
20	Юаньлийский меткомбинат	№ 1 № 2	Доменный, 40–60 т	
21	Тайюаньский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1	Заливочный, 200 т	
22	Жичжаоский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1 № 2	Доменный, 110–130 т	

23	Сининский меткомбинат	№1	Заливочный, 60–65 т	
24	Баотоуский меткомбинат	№ 1	Заливочный, 90–110 т	
		№ 2		
25	Шаганский меткомбинат	№1 №2 №3	Заливочный, 170 т	
	Итого в эксплуатации	47 устано- вок	Ковши 40–300 т	
	Строится и проектируется			
1	Гуофэнский меткомбинат, новый стальной завод	№ 1 № 2	Заливочный, 110–130 т	
2	Хуайганский меткомбинат	№ 1 № 2	Заливочный, 90 т	
3	Лэншуйцзянский меткомбинат	№ 1 № 2	Доменный, 40–60 т	
4	Дзиньсийский меткомбинат, стальной завод № 1	№ 1 № 2	Заливочный, 50 т	
5	Жичжаоский меткомбинат (старый стальной завод)	№ 1, № 2, № 3, № 4	Доменный, 65 т	
6	Наньчанский меткомбинат	№ 1 № 2	Заливочный и доменный, 80 т	
7	Дзилинский стальной завод (Тонгхуанского меткомбината)	№ 1	Заливочный, 160 т	
	Итого строятся и проектируются с пуском в 2008 г.	15 устано- вок	Ковши 40–160 т	

Промышленная эксплуатация показала (табл.2), что технология и устройства вдувания гранулированного магния в условиях больших колебаний масс чугуна в ковшах (30–280 т), широких пределов температуры исходного чугуна (1178–1420 °С), высокого исходного содержания серы (вплоть до 0,099–0,150%), большого количества исходного ковшевого шлака (вплоть до 4,5–7,5% от массы чугуна), большого колебания глубины расплава в ковше и свободного пространства над расплавом (0,2–0,7 м) устойчиво обеспечивают снижение содержания серы в чугуне до ≤0,005%, ≤0,010% и ≤0,020% (требуемое заказчиком) в условиях напряженного промышленного обеспечения конвертеров низкосернистым чугуном.

Таблица 2. Технологические показатели комплексов десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния и скачивания шлака в заливочных ковшах ряда металлургических комбинатов

Место нахождения УДЧ	Масса чугуна в ковше, т	Температура чугуна перед обработкой, °С	Исходное содержание серы в чугуне (перед десульфурацией), %	Количество шлака в ковше перед обработкой, % от массы чугуна	Задаваемые программой конечные содержания в чермете, %	Высота свободного пространства в ковше при вдувании магния, м	Средняя продолжительность вдувания магния, мин	Среднее содержание серы в чугуне после десульфурации, %
Уханьский меткомбинат, сталзавод № 1	$\frac{98-106}{102}$	$\frac{1178-1402}{1300}$	$\frac{0,020-0,084}{0,029}$	$\frac{0,5-2,0}{1,1}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,5–0,7	7,2	0,002
Пекинский меткомбинат, сталзавод № 2	$\frac{180-206}{197}$	$\frac{1283-1396}{1350}$	$\frac{0,014-0,058}{0,027}$	$\frac{0,03-2,8}{1,35}$	$\leq 0,015$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$	0,3–0,4	6,4	0,007
Сянганьский меткомбинат, сталзавод № 2	$\frac{74-88}{80}$	$\frac{1250-1358}{1300}$	$\frac{0,018-0,035}{0,021}$	$\frac{0,8-3,3}{1,7}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,5–0,6	4,5	0,005
Тайюаньский меткомбинат, сталзавод № 2	$\frac{51-85}{77}$	$\frac{1273-1390}{1330}$	$\frac{0,015-0,061}{0,034}$	$\frac{0,5-3,5}{1,62}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,3–0,6	7,1	0,003
Таншаньский меткомбинат, сталзавод № 1	$\frac{127-168}{154}$	$\frac{1238-1370}{1320}$	$\frac{0,020-0,099}{0,040}$	$\frac{0,4-4,5}{1,83}$	$\leq 0,015$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,2–0,3	9,9	0,01
Тяньзиньский меткомбинат	$\frac{92-98}{96}$	$\frac{1302-1391}{1345}$	$\frac{0,026-0,060}{0,040}$	$\frac{0,6-2,9}{1,87}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,35–0,5	8,3	0,006

Цянъяньский стальзавод	$\frac{205-223}{214}$	$\frac{1290-1389}{1349}$	$\frac{0,022-0,062}{0,032}$	$\frac{0,8-2,2}{1,27}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$	0,6	10,2	0,008
Уханьский меткомбинат, стальзавода № 3	$\frac{245-281}{265}$	$\frac{1255-1364}{1324}$	$\frac{0,006-0,051}{0,023}$	$\geq 0,9$	$\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,4-0,7	11,2	0,003
Таншаньский меткомбинат, стальзавод № 2	$\frac{30-50}{39,2}$	$\frac{1217-1368}{1307}$	$\frac{0,013-0,079}{0,032}$	$\frac{0,9-5,8}{2,4}$	$\leq 0,015$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$	0,35-0,5	4,0	0,008
Сянганьский меткомбинат, стальзавод № 3	$\frac{115-127}{119}$	$\frac{1278-1361}{1315}$	$\frac{0,010-0,029}{0,020}$	$\frac{0,6-2,3}{1,32}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,003$	0,4-0,6	5,6	0,006
Тонхуанский меткомбинат	$\frac{126-142}{133}$	$\frac{1233-1337}{1286}$	$\frac{0,019-0,076}{0,033}$	$\frac{0,4-1,9}{0,86}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,35-0,6	11,8	0,005
Ханданский меткомбинат	$\frac{100-110}{106}$	$\frac{1271-1378}{1317}$	$\frac{0,014-0,063}{0,026}$	$\frac{0,7-3,0}{1,6}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$	0,4-0,7	5,5	0,006
Ханчжоуский меткомбинат	$\frac{64-88}{81}$	$\frac{1247-1363}{1316}$	$\frac{0,016-0,069}{0,032}$	$\frac{2-12}{5}$	$\leq 0,020$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,3-0,7	5	0,007
Лючжоуский меткомбинат	$\frac{98-108}{103}$	$\frac{1295-1355}{1320}$	$\frac{0,014-0,054}{0,027}$	$\frac{0,25-1,89}{1,0}$	$\leq 0,020$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,4-0,6	5,1	0,007

Баотоуский меткомбинат	$\frac{92-103}{97}$	$\frac{1233-1363}{1300}$	$\frac{0,021-0,096}{0,041}$	$\frac{0,5-7,5}{1,6}$	$\leq 0,015$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,35-0,7	7,5	0,005
Тайюаньский меткомбинат (новый стальной завод)	$\frac{145-180}{157}$	$\frac{1295-1347}{1320}$	$\frac{0,017-0,049}{0,026}$	$\frac{0,6-2,4}{1,4}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,4-0,8	7,3	0,006
Тонхуанский меткомбинат (вторая очередь стальзавода)	$\frac{127-156}{140}$	$\frac{1261-1409}{13236}$	$\frac{0,013-0,053}{0,030}$	$\frac{0,95-4,37}{2,9}$	$\leq 0,015$ $\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,003$	0,2-0,65	9,0	0,006
Шаганский меткомбинат	$\frac{166-179}{177}$	$\frac{1256-1423}{1331}$	$\frac{0,006-0,047}{0,018}$	$\frac{0,47-1,42}{0,76}$	$\leq 0,010$ $\leq 0,005$ $\leq 0,002$	0,3-0,7	9,2	0,004

Из приведенного перечня предприятий (табл.2) особо показателен опыт Уханьского, Тайюаньского, Пекинского, Баотоуского и Шаганского меткомбинатов, которые ранее работали на других технологиях десульфурации, а в последствии перешли на украинскую технологию вдувания гранулированного или зернистого магния. Так, на Шаганском меткомбинате ранее применялись технология и оборудование поставки из Германии (г. Дортмунд) десульфурации чугуна вдуванием смеси порошковой извести с магнезиом, поставленные также из Германии (г. Дортмунд). Процесс и работа установки не удовлетворили Шаганский меткомбинат ввиду недостаточной стабильности показателей десульфурации, большой длительности процесса, ненадежности работы и ряда других недостатков. Переоборудование 3-х имевшихся установок на украинскую технологию обеспечило снижение содержания серы в обессеренном чугуне с 0,009% до 0,004% (таблица 3), сократило длительность процесса вдувания в 1,5 раза и улучшило другие технико-экономические показатели.

Таблица 3. Показатели серий контрольных продувок чугуна гранулированным магнезиом (процесс ИЧМ) и вдуванием порошковой смеси извести с магнезиом (технология «Крупн Полизаус») на Шаганском меткомбинате

Применяемый процесс	Масса чугуна в ковшах, т	Температура чугуна перед десульфурацией, °С	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна		Длительность процесса вдувания, мин.	Содержание серы в чугуне после десульфурации, %	Степень десульфурации чугуна	
			магний	известь			Степень десульфурации суммарная, D, %	D удельная, при вдувании 0,1 кг магнезиома/т чугуна
Вдувание порошковой смеси извести и магнезиома	178	1345	0,43	0,62	14,0	0,009	65	15,8
Вдувание гранулированного магнезиома	177	1335	0,33	–	9,3	0,004	80	24,2

Сопоставление показателей различных процессов десульфурации чугуна, в т.ч. вдувание гранулированного магнезиома, вдувание смесей магнезиома с известью, вдувание смесей на основе карбида кальция, ввод порошковой магнезиома содержащей проволоки и ряда других, показывает, что при вдувании гранулированного магнезиома по технологии ИЧМ обеспечивается самое высокое усвоение магнезиома (рисунок) и самый низкий удельный расход реа-

гентов. Это предопределяет наибольшую экономичность и рациональность такого процесса [6].

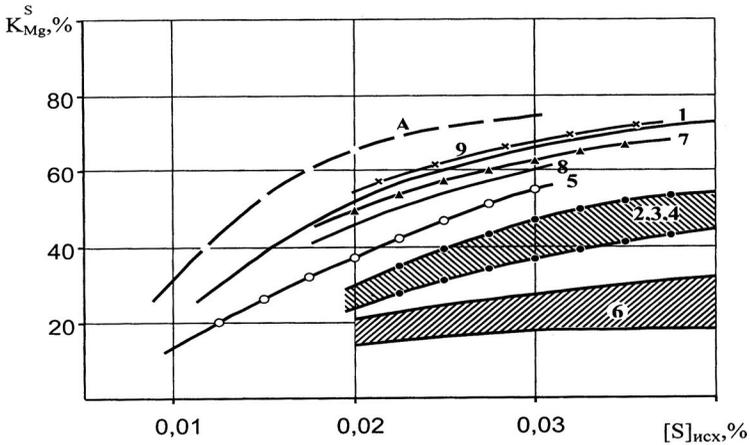


Рисунок. Изменение степени усвоения магния на серу (K_{Mg}^S) при десульфурации чугуна в ковшах по различным технологиям ($S_k = 0,005-0,007\%$) А – Процесс ИЧМ на комбинате «Азовсталь»; вдувание гранулированного магния (без добавок) аргоном; $T - 1300\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 250 – 300 т. 1– Процесс ИЧМ на концерне «Шоуган» (КНР); вдувание гранулированного магния азотом; $T - 1350\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 195 т. 2,3,4 – Процессы компаний «Rossborough» (США), «Remasog» (США), «Rossborough» – «Hugovens» (Голландия); вдувание смеси $\text{CaO}+\text{Mg}$ азотом; $T - 1300-1400\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 160– 270 т. 5– Процесс ESM (США) на комбинате «Baosteel» (КНР); вдувание смеси CaC_2+Mg ; $T - 1350\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 280 т. 6– Обработка порошковой магниевой проволокой на комбинате им. Дзержинского; $T - 1240-1300\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 200 т. 7– Процесс ИЧМ на Уханьском меткомбинате (КНР); вдувание гранулированного магния азотом; $T - 1300\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 100 т. 8– Обработка гранулированным магнием на Сянтяньском меткомбинате (КНР); $T - 1300\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 80 т. 9– Обработка гранулированным магнием на Тангшанском меткомбинате (КНР); $T_{cp} - 1310\text{ }^\circ\text{C}$; масса чугуна 154 т.

Для оценки распределения серы в продуктах десульфурации (чугун, шлак, отходящий из ковша дым) нами были исследованы характеристики жидкого чугуна, отходящего дыма и ковшевых шлаков, образующихся в процессе десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния. Результаты исследований показали, что наиболее характерными параметрами чугуна, шлака и отходящего дыма являются следующие:

1. Содержание серы в чугуне – $0,001 - <0,010\%$.
2. Химический состав ковшевого шлака после десульфурации (% по массе):

<u>SiO₂</u>	<u>CaO</u>	<u>MgO</u>	<u>FeO</u>	<u>MnO</u>	<u>S</u>
38 ÷ 49	22 ÷ 41	6,4 ÷ 17,1	0,7 ÷ 2,2	0,4 ÷ 1,8	1,6 ÷ 4,2

3. Количество отходящего из ковша дыма – 15000–20000 нм³/ч.

4. Запыленность отходящего дыма – 10–20 г/нм³.

5. Химический состав газовой фазы дыма (% объемный):

<u>CO₂</u>	<u>O₂</u>	<u>CO</u>	<u>SO₂</u>	<u>NO₂</u>	<u>N₂</u>
0,2–1,6	18–20	нет	нет	0,001–0,003	остальное

6. Химический состав пыли, отходящей из ковша (% по массе, средний):

<u>C</u>	<u>Fe₂O₃</u>	<u>MgO</u>	<u>CaO</u>	<u>Al₂O₃</u>	<u>SiO₂</u>	<u>S</u>
37,1	29,3	15,9	4,7	1,8	1,3	0,42

Приведенные данные свидетельствуют о следующем:

1. Удаляемая из чугуна сера перемещается в основе в ковшевой шлак.

2. Количество серы, удаляемой из системы рафинирования с отходящим дымом, как правило, не превышает 0,5% (относительных) от общего количества серы, удаляемого из чугуна.

3. Образующийся после десульфурации чугуна магнием ковшевой шлак имеет пониженную основность и не всегда достаточную сульфидную ёмкость [4,7,8].

Из изложенного следует вывод о том, что при десульфурации чугуна очень важно не только обеспечить низкое содержание серы в чугуне, но и не допустить попадания высокосернистого ковшевого шлака в сталеплавильный агрегат. Поэтому все создаваемые комплексы десульфурации чугуна нами оснащаются средствами удаления шлака. Последующая промышленная эксплуатация показала, что обычные методы удаления шлака, например, современные гидравлические машины скребкового типа практически могут обеспечить степень удаления шлака не более 95% (даже при двойном скачивании шлака), что недостаточно для обеспечения современных требований сталеплавильного передела, особенно когда необходимо выплавлять стали с низким и особо низким ($\leq 0,006\%$) содержанием серы. Для решения этой проблемы, создаваемые в последнее время Институтом черной металлургии, Институтом титана и СК «Desmag» комплексы десульфурации чугуна и скачивания шлака оснащаются чугуновозами с гидрокантованием ковшей, устройствами барботирования расплава в ковшах при скачивании шлака и оборудованием для корректировки (в случае необходимости) состава ковшевого шлака засыпкой небольшого количества фракционированных материалов (из образующихся на меткомбинате или в огнеупорном производстве отходов).

Такое технологическое решение позволяет практически полностью удалить шлак из ковша (остатки шлака не превышают 20–30 кг/ковш) и не допускать прихода серы в конвертер с ковшевым шлаком.

Таблица 4. Технико-экономическое сопоставление различных процессов десульфурации чугуна при внепечной обработке в ковшах с массой чугуна 105–125 т со снижением содержания серы в чугуне с 0,040 до 0,005%

№	Показатели	Вдувание гранулированного магния (Процесс ИЧМ-ИТ)*	Вдувание порошковой смеси извести с магнием (*,[11])	Вдувание порошковой смеси карбидов кальция с магнием**	Вдувание карбидов кальция [9,10,13]	Засыпка извести с перемешиванием вращающейся мешалкой*	Ввод порошковой магнезитовой проволочки [12,14]
1	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна	0,45	0,72	0,40	–	–	1,2
	– магния	–	2,88	–	–	8	–
	– извести	–	–	2,00	10	–	–
	– карбидов кальция	–	–	2,40	10	8	–
2	– всего реагентов	0,45	3,60	4,80	20,0	16,0	7,50***
	Количество дополнительно обрабатываемого чугуна	0,90	7,20	2,400	9,0	7,2	3,375
3	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,405	3,240	2,400	9,0	42	25
4	Снижение температуры чугуна при вводе реагентов, °С	9	15	12	22	12	19
5	Длительность процесса ввода реагентов в ч/г, мин.	6	12	9	9	12	19
6	Затраты при десульфурации, долл. США/т чугуна	1,125	1,800	1,000	–	–	–
	а) на магний	–	0,547	–	–	0,800	–
	б) на известь	–	–	0,900	4,500	–	–
	в) на карбид кальция	–	–	–	–	–	–
	г) на порошковую проволоку	–	–	–	–	–	10,010
	д) на огнеупорные футры	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	–

	е) на потери чугуна с дополнительным шлаком	0,113	0,907	0,672	2,52	2,016	0,945
		ж) на потери температуры чугуна	0,180	0,300	0,240	0,440	0,840
	з) на удаление и утилизацию шлака	0,300	0,600	0,950	1,200	1,200****	0,650
		и) расходы по переделу и все прочие	0,42	0,46	0,48	0,48	0,36
	по обслуживанию средств десульфурации*						
		Суммарные затраты на десульфурацию	2,228	4,704	4,332	9,210	
7	Затраты на относительные (по отношению к наиболее дешевому способу десульфурации)						
		1	2,11	1,95	4,13		
8	Увеличение затрат в сравнении с наиболее дешевой технологией десульфурации, долл. США/т чугуна	0	2,476	2,104	6,982		

Примечания к таблице 4:

* – опыт работы меткомбинатов КНР 2002–2007 гг.

[11] – тех. предложения компании "Remasore" (США) для меткомбината "Азовсталь".

** – опыт работы меткомбинатов КНР, Индии.

[9] – Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Гулыга Д.В. и др. Внедоменная десульфурация чугуна различными реагентами. Сталь. 1986. – № 2. – С. 17–19.

[10] – Емельянов И.Я., Шевченко А.Ф., Новиков В.Н. и др. Десульфурация чугуна карбидом кальция в чугуновозных ковшах.

Металлург. 1986. № 3. – С. 16–19.

[13] – Определение технологических параметров ввода карбида кальция в чугуновозные ковши на опытно-промышленной установке НЛМК. Отчет ИЦМ. г. Днепропетровск. 1983 г. 143 с.

*** – В состав проволоки входит магний, огнеупорный пассиватор и стальная оболочка. Стальная лента растворяется в чугуне, магний и пассиватор образует дополнительный шлак.

[12] – Дюдкин Д.А., Кисленко В.В., Онщук В.П. и др. Внепечная десульфурация чугуна порошковой магнийсодержащей проволокой. // Сталь. 1998. – № 5. – С. 16–18.

**** – из учета расход Mg 1,2 кг/т чугуна и 132 кг/ковш. расход проволоки 3771 м/ковш; интенсивность ввода проволоки 2,0 м/с;

***** – Скарчивание шлака осуществляется дважды (перед и после десульфурации).

[14] – Зборщик А.М. Экономическая эффективность различных способов внедоменной десульфурации чугуна. Металл и литье Украины. 2001. № 3–4. – С. 11–13.

Цены материалов и реагентов:

- магний гранулированный – 2500 долл./т (*, **)
- Карбид кальция молотый – 450 долл./т (**)
- Известь обожженная, качественная (для десульфурации) – 190 долл./т (х)
- Известь фракционированная обожженная – 100 долл./т (*)
- Проволока магнийсодержащая порошковая – 1100 долл./т [14]
- Магний в порошковой проволоке – 8017,5 долл./т [14]
- Чугун передельный – 280 долл./т
- Фурма огнеупорная погружаемая – 1000 долл./шт (*)

Таким образом, современный комплекс внепечной десульфурации чугуна вдуванием магния обеспечивает за 5–9 мин. снижение содержания серы в чугуне до заданных пределов (вплоть до $<0,001–0,002\%$) в ковшах различного типоразмера (30–320 т) и при производительности в соответствии с потребностью производства (вплоть до обеспечения полного объема выплавки стали – 4–8 млн. т/год). Оборудование комплексов десульфурации чугуна многокомпонентными устройствами для удаления и корректировки состава ковшевых шлаков исключает приход серы в конвертер как с чугуном, так и со шлаком. Последнее позволяет сталеплавильщикам не только выплавлять стали с очень низким содержанием серы, но и широко варьировать условия шихтовки и выплавки различных марок стали.

В табл.4 приведено технико–экономическое сопоставление различных технологических процессов десульфурации чугуна на примере обработки чугуновозных ковшей с массой металла 105–125 т со снижением содержания серы в чугуне с 0,040 до 0,005%. Из таблицы следует, что наименее затратным и наиболее экономичным является технологический процесс вдувания диспергированного (гранулированного или зернистого) магния по украинской технологии, что в основе обусловлено наименьшим расходом обессеривающего реагента.

Институтом черной металлургии и Институтом титана продолжают и развиваются дальнейшие исследования и разработки, направленные на регулирование распределения магния в рафинируемой системе, на снижение нерациональных расходов магния, на увеличение интенсивности вдувания магния при обеспечении высокого его усвоения, на сокращение продолжительности процесса обработки, на большую рационализацию шлаковых режимов и на дальнейшее улучшение технико–экономических показателей процесса внепечной обработки чугуна.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 237 с.
2. *Исследование* некоторых параметров процесса глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния / Н.А.Воронова, С.Т.Плискановский, А.К.Теслюк и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность. –1969. – № 3. – С.8–12.
3. *Шевченко А.Ф.* Исследование процесса внепечной десульфурации жидкого чугуна вдуванием порошковых реагентов. Кандидатская диссертация. г.Днепропетровск. ИЧМ. – 1969. – 175 с.
4. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. Докторская диссертация. г. Днепропетровск. – ИЧМ. 1997. – 252 с.
5. *Десульфурация* чугуна вдуванием магния в чугуновозные ковши / Н.А.Воронова, С.Т.Плискановский, А.Ф.Шевченко и др. //Сталь. – 1974. – № 4. – С.297–302.
6. *Аппаратурно–технологический* комплекс нового поколения десульфурации чугуна в заливных ковшах вдуванием гранулированного магния /

- А.Ф.Шевченко, Б.В.Двосикн, В.А.Александров и др. //Сталь. – 2003. – № 8. – С.21–25.
7. *Особенности* шлакообразования в ковшах с жидким чугуном / Н.Т.Ткач, А.Ф.Шевченко, Д.В.Костенко, П.С.Лындя // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. ИЧМ. – Днепропетровск. – 2004. – Вып.8. – С.168–175.
 8. *Оценка* качества серы, вносимой в конвертер с чугуном и шлаком при применении десульфурации чугуна / Н.Т.Ткач, П.С.Лындя, А.Л.Руденко, // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. ИЧМ. – Днепропетровск. – 2005. – Вып.10. – С.104–108.
 9. *Внедоменная* десульфурация чугуна различными реагентами / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, Д.В.Гулыга и др. // *Сталь*. – 1986. – № 2. – С.17–19.
 10. *Емельянов И.Я., Шевченко А.Ф., Новиков В.Н.* Десульфурация чугуна карбидом кальция в чугуновозных ковшах // *Металлург*. – 1986. – № 3. – С.16–19.
 11. *Технические* предложения компании "Remacore" (США) на десульфурацию чугуна вдуванием смеси извести и магнезия в 140–тонные доменные ковши. 1998 г.
 12. *Внепечная* десульфурация чугуна порошковой магнийсодержащей проволокой / Д.А.Дюдкин, В.В.Кириленко, В.П.Онищук и др. // *Сталь*. 1998. – № 5. – С.16–18.
 13. *Определение* технологических параметров ввода карбида кальция в чугуновозные ковши на опытно–промышленной установке НЛМК. Отчет ИЧМ. г. Днепропетровск, 1983. – 143 с.
 14. *Зборщик А.М.* Экономическая эффективность различных способов внедоменной десульфурации чугуна // *Металл и литье Украины*. – 2001. – № 3–4. – С.11–13.

Сведения об авторах:

Шевченко Анатолий Филлипович, докт.техн.наук, зав.отделом внепечной обработки чугуна Института черной металлургии НАН Украины;

Бармаков Александр Михайлович, канд.техн.наук, главный специалист, Институт титана (г.Запорожье);

Курилова Людмила Порфировна, мл.научн.сотр., Институт черной металлургии НАН Украины;

Ткач Нина Тимофеевна, канд.техн.наук, Институт черной металлургии НАН Украины.