

**А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.В.Остапенко, С.А.Шевченко,  
А.М.Башмаков**

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВДУВАНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО И ЗЕРНИСТОГО МАГНИЯ БЕЗ ДОБАВОК В КОВШИ С ЖИДКИМ ЧУГУНОМ**

Приведены фактические результаты промышленной проверки разработанной технологии и оборудования при десульфурации чугуна в заливочных ковшах. Показано, что исследования и разработки по усовершенствованию процесса и оборудования для внепечной десульфурации чугуна в большегрузных ковшах обеспечили вдувание магния в расплав с увеличенной интенсивностью его подачи до 26 кг/мин.

**Современное состояние вопроса.** Мировой практикой подтверждено, что рациональным и экономически обоснованным путем повышения конкурентоспособности металлургического производства и получения высококачественной металлопродукции является внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Наиболее широкое распространение в последние годы для производства низкосернистого и особо чистого по сере чугуна для конвертерного передела получил разработанный в Украине технологический процесс десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния без добавок [1,2]. Активное внедрение украинской технологии десульфурации чугуна магниевым реагентом без добавок обеспечивается её высоким научно-техническим уровнем и существенными технико-экономическими преимуществами по сравнению с другими технологиями десульфурации чугуна:

- наиболее высокая степень усвоения реагента (95% и выше);
- самый низкий расход реагента;
- гарантированная стабильность достигаемых результатов;
- возможность получения любого заданного конечного содержания серы, вплоть до 0,001% и ниже;
- возможность реализации процесса в ковшах ёмкостью 0,5–350 т;
- отсутствует необходимость в применении пассивирующих добавок (CaO, CaC<sub>2</sub> и др.);
- наименьшее количество дополнительного шлакообразования в ковше;
- возможность обработки ковшей с большим наливом чугуна (свободное пространство до 0,3 м);
- наименьшие потери температуры чугуна;
- аппаратурная простота и долговечность оборудования;
- малая продолжительность процесса обработки;
- безопасность и отсутствие вредных токсичных отходов;
- высокий уровень автоматизации и большая надежность аппаратурно-технологического комплекса десульфурации;

невысокая материалоемкость оборудования;  
самые низкие капитальные и текущие эксплуатационные затраты;  
высокий уровень окупаемости затрат.

С использованием украинской технологии за период с 2000 г. по 2008 г. в Китае построено 56 комплексов десульфурации чугуна и очистки его от шлака, количество которых превышает число всех других вместе взятых установок десульфурации, сооруженных за этот период с использованием других технологических процессов.

**Постановка задачи.** Несмотря на вышеуказанные преимущества технологии десульфурации диспергированным магнием без добавок, в ряде случаев, её применение сдерживается при коротком цикле (менее 20 мин) выделенном на операции обработки. В условиях инжестирования магния в расплав с интенсивностью 11–13 кг/мин для ковшей с наливом чугуна более 130 т и при производстве особо чистого по сере чугуна ( $[S]_{\text{кон}} \leq 0,002\%$ ) обеспечить заданный цикл обработки в ряде случаев было достаточно сложно. Увеличение интенсивности вдувания магния до 15–20 кг/мин, опробованное на 140-тонных доменных ковшах с использованием фурм традиционной конструкции, показало, что процесс протекал нетехнологично, с высокой бурностью и выплесками чугуна. При использовании фурм с испарительными камерами наблюдалось интенсивное зарастание подколокольного пространства, что увеличивало трудоёмкость его обслуживания. Поэтому требовалось совершенствование технологии и конструкции фурм в направлении повышения равномерности распределения образующихся в объеме расплава парогазовых потоков и интенсификации процесса вдувания магния.

**Изложение основных материалов исследования.** Для решения этой задачи был выполнен комплекс работ и исследований. Целью работ по интенсификации процесса инжестирования магния (без добавок) в чугун являлась разработка решений по обеспечению интенсивности вдувания магния в расплав 20–25 кг/мин. Такая интенсивность позволяет сократить продолжительность операции вдувания магния в расплав до 3–6 мин. При этом необходимо было сохранить большие наливы чугуна в ковши и эффективность процесса десульфурации без снижения степени использования магния.

В качестве объекта исследований была принята фурма без испарительных камер, которая была разработана для вдувания магния в большегрузные ковши с большой глубиной ванны (более 2,5 м) [2]. Особенностью работы фурмы без испарительной камеры является высокая (до 165 м/с) скорость потока на выходе из фурмы, чем обеспечивается перенос всех тепло- массообменных процессов непосредственно в расплав чугуна. Газодинамические параметры инжестивно-дозировочной системы при таких фурмах обеспечивали устойчивое вдувание магния в расплав на глубину до 4 м при расходах инжеструющего газа менее 130 м<sup>3</sup>/ч и интенсивности подачи реагента до 15 кг/мин.

На первом этапе исследований было проведено холодное моделирование по изучению газожидкостного взаимодействия и его структурных особенностей [3,4]. В качестве жидкости моделирующей чугуна использовалась вода. Размеры модели и чугуновозного ковша имели соотношение 1:10. Величина внутреннего диаметра фурмы модели определялась из условия обеспечения газодинамических параметров соответствующих натурной фурме. Достаточно удовлетворительное гидродинамическое подобие модели и натуры обосновывалось близостью значений модифицированного числа Рейнольдса ( $Re_{\text{mod модели}} = 1,3(3) \cdot 10^{-3}$ ,  $Re_{\text{mod натуры}} = 1,846 \cdot 10^{-3}$ ).

По результатам холодного моделирования были разработаны рекомендации по обеспечению наилучших параметров газожидкостного взаимодействия, в том числе степени диспергирования, всплывающих пузырей и развитию массообменной зоны в объеме ванны. Было определено, что инжекционные каналы фурменных устройств рационально размещать под углом 30–60° относительно вертикали фурменных устройств.

При создании фурм с широкими пределами интенсивности вдувания магния в расплав чугуна (3–30 кг/мин), кроме рекомендаций, полученных при холодном моделировании, были также разработаны конструктивные решения по подготовке двухфазного потока в холодном состоянии (перед внедрением потока в расплав), с целью его лучшего распределения в объеме расплава. Конструкция фурм для опытно-промышленных исследований предусматривала также возможность варьирования их геометрических параметров.

При разработке технологии десульфурации чугуна с интенсификацией процесса инжектирования (до 30 кг/мин) стремились сохранить и рационализировать инжекционные системы в сторону повышения надежности их работы. Это достигалось за счет варьирования параметрами магниепроводов, типом и расходами газоносителя, концентрацией твердой фазы в газообразной. Технологический процесс с высокой интенсивностью вдувания магния потребовал также модернизации существовавшего технологического оборудования, так как кроме увеличения (более чем вдвое) производительности дозирующего устройства возросло также рабочее давление в инжекционной системе.

Для проверки в промышленных условиях разработанной технологии десульфурации чугуна с высокой интенсивностью подачи магния, фурменных устройств принципиально новой конструкции и модернизированного технологического оборудования была подготовлена опытно-промышленная установка, на которую чугун подавался в 150-тонных заливочных ковшах, имевших следующие геометрические параметры:

- внутренний диаметр ковша с верхней части – 3,0 м;
- высота от дна ковша до верхнего среза – 3,77 м;
- глубина жидкой ванны – 3,30–3,45;
- высота свободного пространства –  $\geq 0,3$  м.

В качестве газоносителя использовались осушенные сжатые азот и аргон. В процессе отработки параметров инжектирования с использованием магниепроводов с различными характеристиками было установлено, что на созданной опытно-промышленной установке обеспечивается устойчивое и технологичное вдувание гранулированного магния в расплав чугуна с интенсивностью до 22 кг/мин. Следует отметить, что разработанные фурменные устройства и модернизированная инжекционно-дозировочная система позволили одновременно с увеличением более чем вдвое концентрации реагента в газоносителе, сократить его расход при подаче магния в струе аргона до 95 нм<sup>3</sup>/ч, а при подаче в струе азота до 115 нм<sup>3</sup>/ч. При этом каналы фурм оставались чистыми и практически не требовали обслуживания.

Фактические данные по ряду контрольных обработок чугуна магнием в 150-тонных ковшах фурмами усовершенствованной конструкции с увеличенной интенсивностью подачи реагента приведены в таблице 1. Во всех проведенных обработках было обеспечено вдувание в расплав заданного количества реагента. Обработки протекали технологично, без выплесков чугуна, несмотря на то, что свободное пространство в части поданных на обработку ковшей составляло 0,3-0,4 м, а внутренний диаметр ковша не превышал 3 м. По результатам опробованной интенсивности подачи магния в пределах 14-22 кг/мин получены рациональные параметры рафинирования чугуна при высоте свободного пространства до 0,3 м и интенсивности вдувания магния до 25 кг/мин.

Анализ эффективности процесса десульфурации чугуна проведенных серий контрольных обработок показал стабильность процесса при вдувании и высокую эффективность десульфурации. Так в среднем за 5,9 мин вдувания магния содержание серы в чугуне снижено с 0,029 до 0,0016% и обеспечена очень высокая – 94%, степень десульфурации чугуна. Во многих обработках получен жидкий чугун с содержанием серы 0,001% и ниже. Расход магния на серу изменялся в пределах 1,3–3,2 кг/кг, а в среднем составил 2,2 кг/кг, что свидетельствует о высоком усвоении магния (при столь глубокой десульфурации чугуна). Содержание серы в чугуне после десульфурации получено значительно ниже – 0,0016%, чем задано (0,0032%) программой.

Проведенное промышленное опробование усовершенствованной технологии десульфурации чугуна и модернизированного технологического оборудования показало, что при этом сохраняются преимущества разработанного процесса десульфурации чугуна диспергированным магнием, обеспечена самая высокая степень усвоения реагента и наименьший его расход, наименьшее шлакообразование и минимальные потери чугуна со шлаком, наименьшие потери температуры чугуна, высокая стабильность и надежность работы аппаратуры и оборудования.

Таблица 1. Результаты ряда отработок чугуна вдуванием магния в 150-тонные ковши с увеличенной интенсивностью вдувания магния по усовершенствованной технологии рафинирования.

№№ пп	Высота свободного пространства в ковше, мм	Температура чугуна, °С	Расход магния, кг/т	Длительность вдувания магния, мин.	Интенсивность ввода реагента, кг/мин	Содержание серы в чугуне, %			Степень десульфурации чугуна, %	Расход магния на серу, кг/кг
						исходное	конечное заданное программой	конечное фактическое		
1	400	1340	0,38	6,0	10-12	0,026	0,005	0,0020	92	1,6
2	400	1335	0,67	8,0	10-12	0,026	0,002	0,0005	98	2,6
3	500	1328	0,32	4,0	12-14	0,020	0,005	0,0020	90	1,7
4	500	1361	0,55	6,8	12-14	0,020	0,002	0,0010	95	3,0
5	400	1388	0,32	3,8	14-16	0,020	0,005	0,0020	90	1,7
6	400	1388	0,61	6,0	16-20	0,020	0,002	0,0010	95	3,2
7	400	1292	0,54	4,6	18-22	0,018	0,002	0,0010	94	3,2
8	300	1324	0,68	7,0	14-18	0,054	0,005	0,0030	94	1,3
9	400	1287	0,69	6,9	14-18	0,055	0,005	0,0030	95	1,3
10	500	1293	0,41	5,7	12-14	0,028	0,005	0,0040	86	1,7
11	500	1330	0,55	5,7	12-16	0,020	0,002	0,0010	95	2,9
12	500	1296	0,54	6,5	14-17	0,028	0,002	0,0020	93	2,4
13	500	1365	0,49	5,0	14-18	0,015	0,002	0,0010	93	3,5
14	400	1291	0,47	5,0	14-18	0,032	0,005	0,0030	91	1,6
15	500	1293	0,56	5,6	14-18	0,028	0,003	0,0010	96	2,1
16	500	1367	0,56	6,2	14-18	0,028	0,003	0,0010	96	2,1
17	500	1367	0,68	8,0	14-18	0,047	0,003	0,0020	96	1,5
18	500	1374	0,53	5,6	14-18	0,025	0,003	0,0005	98	2,1
19	400	1372	0,55	5,8	14-18	0,041	0,005	0,0035	94	1,4
20	400	1366	0,73	7,6	14-18	0,037	0,002	0,0005	99	2,3
21	500	1354	0,70	6,5	14-18	0,034	0,002	0,0010	97	2,2
22	400	1330	0,50	5,4	14-18	0,020	0,002	0,0003	99	2,5
23	400	1370	0,49	6,5	14-17	0,020	0,002	0,0010	95	2,6
24	300	1379	0,50	5,3	14-17	0,026	0,002	0,0020	92	2,3
Среднее:	450	1341	0,54	5,9	10-22	0,029	0,0032	0,0016	94	2,2

Новая конструкция фурм обеспечивает инжективное магния в расплавах с увеличенной практически вдвое интенсивностью подачи реагента. По результатам проведенного промышленного опробования разработаны режимы подачи и дозирования магния с интенсивностью в пределах 14–26 кг/мин которые закладываются в проекты отделений десульфурации чугуна для большегрузных заливочных ковшей с массой чугуна до 350 т.

### **Заключение**

Выполненные и отработанные в опытно-промышленных условиях разработки позволили создать более рациональный технологический процесс и оборудование для выпечной десульфурации чугуна в ковшах ёмкостью до 350 т с глубиной десульфурации вплоть до 0,001–0,002% серы, высокой интенсивностью вдувания магния (14–26 кг/мин) и небольшой продолжительностью обработки (3–6 мин.).

Процесс обеспечивает наиболее высокое усвоение магния, наименьший расход реагента, незначительное снижение температуры, наименьшие потери чугуна со шлаком, характеризуется стабильностью и кратковременностью обработки.

1. *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.
2. *Развитие* и освоение современного процесса десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния. / А.М.Башмаков, А.Ф.Шевченко, В.А.Александров и др. // Тр. IX международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. Румыния, Галатси, 18–21 сент. 2006 г. - С.81–91.
3. *Оценка* параметров проникновения истекающей из фурмы магнийсодержащей струи в расплав чугуна. / С.А.Шевченко, А.Ф.Шевченко, В.И.Елисеев и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ, вып.13. – 2006.– С. 48–51.
4. *Оценка* влияния угла инжективного затопленной струи на гидрогазодинамику барботируемой ванны./ С.А.Шевченко, А.П.Толстопят, Т.А.Рузова и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ, вып.14. – 2007.– С. 132–139.

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