

Посвящается 100-летию выдающегося учёного–металлурга, основателя научной школы внепечной обработки чугуна, научного руководителя разработок процесса внедоменного рафинирования чугуна магнием, создателя отдела внепечной обработки чугуна Института чёрной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины Вороновой Наталье Александровне.

УДК 669.162.267.642.083.133

**А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун, А.В.Остапенко,
И.А.Баранник, А.М.Башмаков, Л.П.Курилова, Н.Т.Ткач,
Е.А.Костицын, А.Л.Руденко, С.А.Шевченко, А.С.Булахтин,
В.Г.Кисляков**

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВНЕПЕЧНОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Представлены результаты исследований и разработок рационального процесса десульфурации чугуна и их сравнение с другими технологиями. Изучены и проверены различные технологические варианты. Представлены самые последние разработки, в т.ч. с высокой интенсивностью рафинирования до содержания серы в чугуне 0,001–0,002% и продолжительности обработки 3–6 мин. Технико–экономическим сопоставлением подтверждена наибольшая рациональность разработанного в ИЧМ процесса в сравнении с лучшими аналогами.

Современное состояние вопроса. До 70–х годов прошлого столетия процессы внепечной десульфурации чугуна базировались на использовании таких немагниевого реагентов, как обожженная известь, карбид кальция, кальцинированная сода и различные композиции на их основе. Промышленная практика применения этих процессов выявила ряд существенных недостатков, основные из которых следующие:

1. Значительные расходы реагентов (6 – 20 кг/т чугуна).
2. Большое количество дополнительно образующегося шлака (вплоть до 10–40 кг/т чугуна).
3. Значительные потери чугуна с образующимся ковшевым шлаком (в среднем 45% от массы шлака).
4. Ограниченные возможности достижения глубокой десульфурации чугуна.
5. Большая длительность процесса десульфурации (как правило, более 10 мин).
6. Недостаточная стабильность результатов десульфурации.
7. Отрицательное влияние на экологию и водный бассейн.
8. Значительные затраты и экономические издержки от промышленного применения процессов десульфурации.

Указанные недостатки явились причиной поиска металлургами разных стран более совершенных методов внепечной десульфурации чугуна.

Революционное решение было предложено в 60-х годах металлургами Украины, когда профессором Вороновой Н.А., научной школой Института черной металлургии и специалистами металлургического комбината «Азовсталь» [1–4] был реализован технологический процесс десульфурации чугуна в доменных ковшах регулируемым вдуванием диспергированного магния через погружаемую огнеупорную фурму.

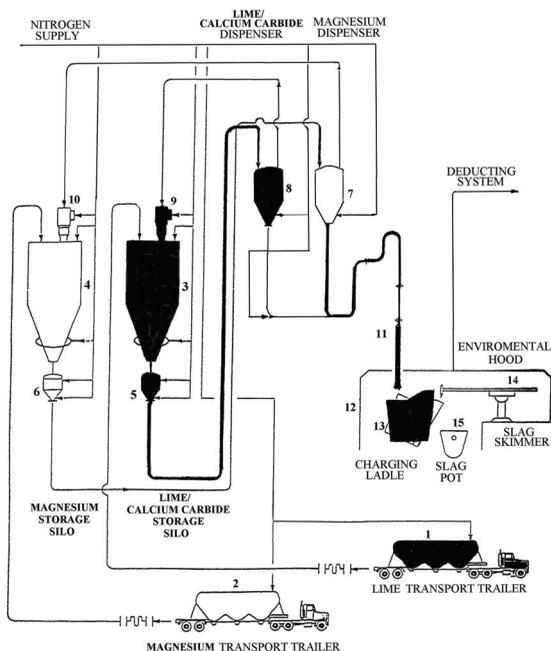
Ввод магния в расплав осуществляли в смеси с порошковой известью. Содержание магния в смеси варьировали в пределах от 5 до 50%. Опробовали как вдувание готовой магний–известковой смеси, так и одновременную подачу магния и извести из дозирующих бункеров со смешиванием материалов в пневмотранспортном материалопроводе (коинжекция). При исследованиях не было установлено влияния метода подготовки смеси на результаты десульфурации, поэтому для промышленной реализации был принят как наиболее надежный и менее затратный процесс вдувания готовой порошковой смеси магния с известью.

По этой технологии в 1969–1971 гг. на металлургических комбинатах Украины («Азовсталь», им. Ильича, «Запорожсталь») были сооружены и введены в эксплуатацию 3 промышленные установки десульфурации чугуна в 80–140-тонных чугуновозных ковшах вдуванием порошковых магнийсодержащих смесей, которые приготавливали непосредственно на установках в специальных аэросмесителях. Это были первые в мировой практике промышленные объекты десульфурации чугуна магнием [6] мощностью каждый 0,8–2,2 млн.т/год. Содержание серы в чугуне уменьшали до 0,003–0,010%.

В других странах процессы десульфурации чугуна вдуванием порошковых магнийсодержащих композиций начали применять спустя 15–25 лет. Отличием зарубежной практики явилось лишь то, что в основе их применена принципиальная схема коинжекционного вдувания магния и извести (карбида кальция) (рис.1), оснащенная современной системой управления и контроля параметров. Как видно из рис.1, схема установки десульфурации на смесях достаточно емкая и сложная. Порошки магния и добавок поступают в автоцистернах 1 и 2, из которых перегружаются в силосы 3 и 4. Из силосов с помощью специальных перегрузочных бункеров 5 и 6 магний и известь (карбид кальция) под давлением перегружают в дозирующие бункеры 7 и 8, из которых производится вдувание реагентов в жидкий чугун. Смешивание материалов осуществляется в трубопроводе, подключенном к фурме, а состав смеси определяется интенсивностью подачи магния и извести (карбида кальция).

При работе установки десульфурации по технологии вдувания порошковых магнийсодержащих смесей, т.е. с использованием порошкообразного фрезерованного магния (который содержит мелкодисперсные взрывоопасные фракции порошка <100 мкм), изготовление оборудования и составляющих

комплекса десульфурации должно быть обеспечено в гарантированном взрывобезопасном исполнении. Это требование усиливается и расширяется в случае применения в смесях молотого карбида кальция – источника активного образования ацетилена от взаимодействия с влагой.



скачивания шлака; 15 – шлаковая чаша

Достаточно глубокие и обширные исследования процесса десульфурации чугуна вдуванием порошковых магнийсодержащих смесей, выполненные в 1969–1972 гг. при промышленной проверке технологии на ряде металлургических комбинатов Украины, показали, что вводимые к магнию добавки (CaO , CaC_2) практически не участвуют в процессе десульфурации, а лишь пассивируют вдуваемый магний и обеспечивают устойчивость процесса истечения магния из канала фурмы в расплав чугуна. В расплаве чугуна эти наполнители (в смеси с магнием) ухудшают условия тепло–массообменных процессов между магнием и жидким чугуном. Кроме того, происходит нерациональное расходование магния на взаимодействие с карбонатами (недопал), влагой и гидратами извести, что увеличивает его потери. В итоге процесс десульфурации чугуна вдуванием порошковых магнийсодержащих смесей сопровождается следующими недостатками [4–7].

1. Низкое (20–50%) усвоение магния.

Рис. 1. Принципиальная схема установки десульфурации чугуна (одного поста) смесями извести (карбида кальция) с порошковым магнием вдуванием методом коинъекции.

1 – цистерна с известью; 2 – цистерна с магнием; 3 – силос извести; 4 – силос магния; 5 – перегрузочный бункер извести; 6 – перегрузочный бункер магния; 7 – дозирующий бункер магния; 8 – дозирующий бункер извести; 9 – осадитель извести; 10 – осадитель магния; 11 – фурма; 12 – камера обработки; 13 – ковш с чугуном; 14 – машина

2. Необходимость применения нескольких реагентов.
3. Повышенный (в 1,3–1,5 раза) удельный расход магния.
4. Значительный (до 3–4 кг/т чугуна) удельный расход реагентов.
5. Значительное (до 6–10 кг/т чугуна) дополнительное шлакообразование в ковше.
6. Большие (2,5–4,5 кг/т чугуна) потери чугуна со шлаком.
7. Недостаточная стабильность результатов десульфурации.
8. Трудность осуществления десульфурации чугуна в ковшах с массой металла менее 80–100 т и небольшой глубиной ванны (менее 1,8–2,0 м).
9. Сложность аппаратурной схемы и установки десульфурации, большое количество оборудования и большие капитальные затраты.
10. Ненадежность системы дозирования и управления в реальных промышленных условиях.
11. Особые требования по взрыво- и пожаробезопасности в исполнении оборудования и установки.
12. Значительные текущие и эксплуатационные затраты.

Изложение основных материалов исследования.

Изложенное послужило основанием активных поисков и разработок процесса внепечной обработки чугуна вдуванием магния без пассивирующих добавок, т.е. реализации самой простой принципиальной схемы инъекционной технологии (рис.2). При разработке этого процесса Институт черной металлургии (г.Днепропетровск) и Институт титана (г.Запорожье) решили ряд новых технологических и технических задач, которые принципиально отличаются от известных и применяющихся аналогов. Основа этих решений включает следующее:

1. Вдувание магния в чугун осуществляется без пассивирующих, разубоживающих и другого типа добавок. Вдуваемый реагент представляет собой зернистый или гранулированный магния (или магниевый сплав). Он состоит из частиц диаметром 0,5–1,6 мм и не содержит взрывоопасных фракций магния (<0,1 мм), материал имеет хорошую текучесть и сыпучесть, не нуждается в псевдоожижении.

2. Инжектирование производится в струе безокислительного нейтрального газа с большой концентрацией магния в газе (более 15 кг/м³) и с обеспечением высокого парциального давления магния в массообменной зоне.

3. Вдувание магния осуществляется при управляемой, плавной, регулируемой и гарантированно дозированной подаче материала с допустимым отклонением фактической массы реагента от заданной не более 0,5%, а фактическая интенсивность вдувания магния (масса магния в единицу времени, в т.ч. мгновенная) отличается от заданной не более, чем на 2%.

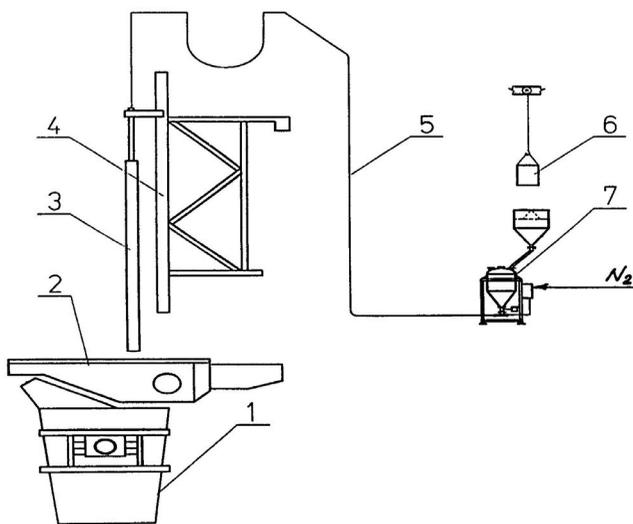


Рис.2. Принципиальная схема установки десульфурации чугуна вдуванием зернистого (гранулированного) магния (без пассивирующих добавок)
 1 – ковш с чугуном; 2 – зонд аспирации; 3 – фурма; 4 – устройство перемещения фурмы; 5 – материалопровод магния; 6 – контейнер с магнием; 7 – дозирующий бункер магния

4. Обеспечиваются условия рассредоточенного испарения всего вдуваемого магния у дна ковша с последующим активным (более 80% от вводимого) насыщением магнием рафинируемого чугуна.

5. Обеспечиваются гарантированные условия, исключающие возврат серы из шлака в чугун, в т.ч. при содержании серы в обессеренном чугуне $\leq 0,001-0,002\%$. При необходимости (в отдельных случаях) производится корректировка физико-химических свойств ковшевого шлака.

6. Выполнение операций и поддержание заданных параметров осуществляется в автоматическом режиме.

7. Удельные расходы материалов, реагентов, энергоносителей и затраты на десульфурацию наименьшие (в сравнении со всеми другими аналогами).

В зависимости от условий рафинирования (глубины ванны расплава в ковше, массы чугуна, температуры расплава, исходного и конечного содержаний серы и др.) вдувание магния может осуществляться по 2-м вариантам (рис.3):

- через погружаемую фурму с испарительной камерой на выходе (при малых скоростях потока в канале фурмы – менее 30 м/с);

- через погружаемую фурму без испарительной камеры на выходе, но при специальной конструкции оголовка фурмы и специальных режимах вдувания.

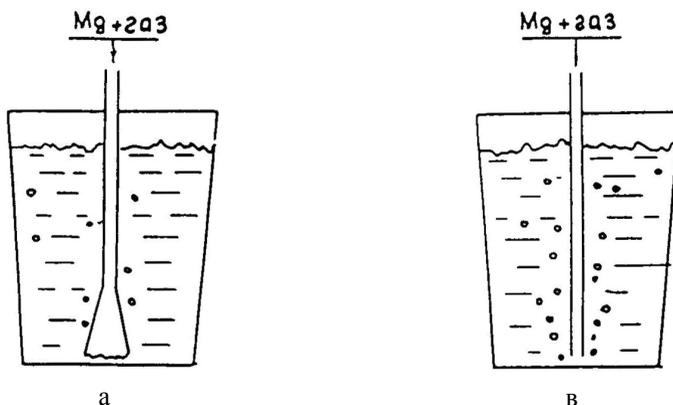


Рис.3. Принципиальные схемы вдувания зернистого (гранулированного) магния в ковш с жидким чугуном: а – вдувание магния через фурму с испарительной камерой на выходе (глубина расплава в ковше <math><2,6-2,7\text{ м}</math>); в – вдувание магния через фурму без испарительной камеры (глубина расплава в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

С частичным выполнением изложенных требований и с применением фурм с испарительной камерой на выходе уже в 1972–1973 г. три промышленные установки десульфурации чугуна меткомбинатов «Азовсталь», «Запорожсталь» и им. Ильича были переоборудованы и переведены на работу на гранулированном магнии без различных добавок [4,6]. Эта модернизация уменьшила расход реагентов, повысила усвоение магния, увеличила глубину десульфурации, снизила потери при обработке, повысила пропускную способность установок и снизила затраты на десульфурацию [4,5]. Полученный существенный положительный эффект явился основанием для строительства и ввода в эксплуатацию новых мощностей по десульфурации чугуна гранулированным магнием на металлургических комбинатах Украины, России и Финляндии («Азовсталь», «Криворожсталь», НЛМК, «Свободный Сокол», Раахесский металлургический завод).

В последующем, в 2002–2008 г., аналогичный эффект был получен на ряде металлургических комбинатов Китая, где вдувание порошковых магниесодержащих смесей было заменено процессом вдувания зернистого или гранулированного магния [8–10]. К середине 2008 г. на 20 металлургических комбинатах КНР было создано и эксплуатировалось 37 комплексов десульфурации чугуна и скачивания шлака в различных ковшах по технологии вдувания зернистого или гранулированного магния через фурмы с испарительной камерой на выходе. Содержание серы в чугуне можно уменьшать до 0,002–0,010%. Средние показатели промышленных продувок чугуна текущего производства по ряду меткомбинатов приведены в табл.1, из которой следует, что при удельном расходе магния 0,33–0,63 кг/т чугуна содержание серы в чугуне снижают в среднем с 0,027–0,040% до 0,002–0,008%.

Количество исходного шлака в ковше составляет 1,0–5,0% (от массы чугуна); скачивание шлака перед обработкой не производят. Количество удаляемой серы (степень десульфурации) из чугуна составляет 76–93%. Наиболее глубокая десульфурация чугуна по этой технологии в ковшах с массой чугуна менее 120 т обеспечивается на металлургических комбинатах Уханя, Тайюаня и Сянтаня, где значительную часть чугуна обрабатывают гранулированным магнезиом целевым назначением для уменьшения содержания серы до 0,001–0,002%. Интенсивность ввода магния на этих заводах изменяют в пределах 6–10 кг/мин. Исключительная управляемость и равномерность подачи магния позволяют обрабатывать ковшки с достаточно большим наполнением – высота свободного пространства в ковше вплоть до 0,3 м.

Номограмма зависимости удельных расходов магния от исходного и конечного содержания серы в чугуне при десульфурации в ковшах среднего объема (75–120 т чугуна) вдуванием магния через фурму с испарительной камерой на выходе приведена на рис.4, из которой следует, что для удаления серы из чугуна расходуется очень малое количество магния. Обусловлено это высокой степенью усвоения магния и малым расходом магния на удаляемую серу (таблица 1). Эта же технология вдувания применяется для десульфурации чугуна в ковшах небольшого объема (масса чугуна менее 65 т) с тем отличием, что процесс осуществляется при других параметрах обработки, а интенсивность ввода магния, как правило, не превышает 7 кг/мин.

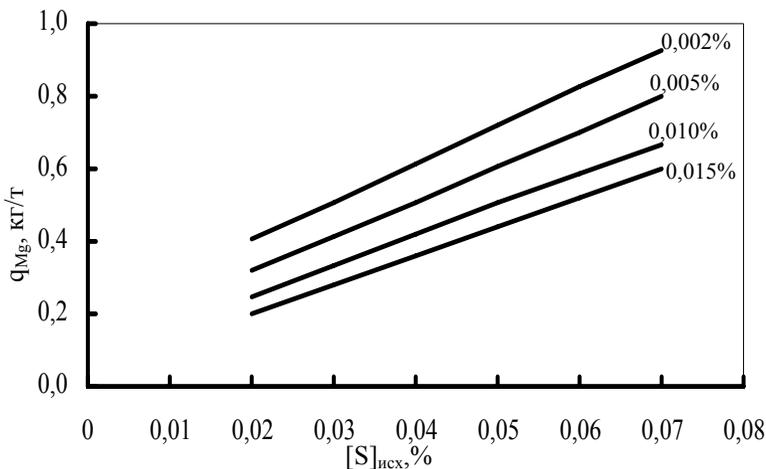


Рис.4. Диаграмма зависимости удельного расхода магния (q_{Mg}) от исходного содержания серы в чугуне ($[S]_{исх}$) при вдувании магния через фурму с испарителем в ковше с массой чугуна 75–120 т.

Цифры у кривых – конечное содержание серы в чугуне.

Таблица 1. Показатели и параметры (средние) промышленной десульфурации чугуна гранулированным или зернистым магнием на ряде меткомбинатов Китая при вдувании магния через фурму с испарительной камерой на выходе по украинской технологии

Наименование меткомбината	Мощность установки десульфурации, млн.т/год	Масса чугуна в ковше, т	Температура чугуна перед десульфурацией, °С	Количество шлака в ковше перед десульфурацией, % от массы чугуна	Удельный расход магния, кг/т чугуна	Содержание серы в чугуне, %		Итого-вая (Ст.Д)	Степень десульфурации чугуна, % (D)*	Расход магния на серу удаленную, β, кг/кг	Степень усвоения магния на серу, K·S, % K·Mg, %
						Исходное	После десульфурации				
Уханьский	2,4	100–110	1180–1400	1,50	0,53	0,038	0,003	91	17,3	1,51	50
Уханьский	2,4	107	1260	1,56	0,52	0,029	0,002	93	17,9	1,92	41
Тайюаньский	1,2	80	1270–1390	1,62	0,63	0,039	0,003	90	14,3	2,07	38
Гяньзиньский	1,0	96	1305–1390	1,87	0,52	0,040	0,006	85	16,3	1,53	50
Ханчжоуский	2,6	80	1250–1360	5,0	0,33	0,029	0,007	76	23,1	1,50	51
Яньганьский	2,1	126	1280–1360	1,32	0,40	0,027	0,005	82	20,5	1,81	42
Ляочжоуский	2,3	102	1290–1360	1,0	0,35	0,027	0,0058	81	23,2	1,75	44
Хуайганьский	2,6	87	1260–1420	1,76	0,44	0,039	0,008	81	19,8	1,64	54
Гуофаньский	2,8	119	1320–1390	1,20	0,41	0,029	0,006	79	19,3	1,80	43
Среднее по всем установкам десульфурации чугуна		100	1315	1,87	0,45	0,033	0,005	84	19,1	1,72	46

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

Фурма с испарительной камерой на выходе была проверена в работе при десульфурации чугуна в большегрузных 350-тонных заливочных ковшах меткомбината «Азовсталь». Промышленная проверка этой технологии в новых условиях (глубина погружения фурмы 3,0–3,6 м) показала, что при расходе инжектирующего газа (азот, аргон) 90–100 $\text{нм}^3/\text{ч}$, давления в системе энергообеспечения 0,6 МПа и высокой интенсивности подачи магния – вплоть до 13–14 $\text{кг}/\text{мин}$ обеспечивается достаточно устойчивый ввод магния в расплав чугуна. Несмотря на относительно невысокое исходное содержание серы в чугуне (в опытах в среднем 0,015%) и относительно небольшом удельном расходе магния (0,14 $\text{кг}/\text{т}$ чугуна), содержание серы было уменьшено до 0,001–0,006%, а в среднем – до 0,005%. Расход магния на удаленную серу (показатель β) составил 1,75 $\text{кг}/\text{кг}$, а удельная степень десульфурации (D) была достигнута очень высокая – 34% на каждые 0,1 $\text{кг}/\text{т}$ вдуваемого магния, степень десульфурации (СтД) – 90%.

При достаточно высокой эффективности применения фурмы с испарителем для вдувания магния в большегрузные ковши (с большой глубиной ванны – более 2,8 м) был отмечен ряд отрицательных явлений (для этих условий). Так, установлено, что в ряде случаев наблюдалось неполное испарение магния в испарительной камере, поэтому приходилось снижать интенсивность его подачи. Ввиду возросшего общего расхода магния (на ковш), более высокого давления в испарительной камере и, соответственно, более низкой интенсивности испарения магния при глубине его ввода в расплав более 2,8 м происходило более активное зарастание внутренней полости испарителя. Последнее приводило к уменьшению работоспособности и пропускной способности поста десульфурации чугуна. Выявленные недостатки послужили основанием разработки принципиально новой технологии и системы вдувания магния на большие глубины расплава.

В отличие от условий рафинирования чугуна при небольшой глубине ванны расплава (менее 2,5 м) (вдувание осуществляется при скорости потока, как правило, менее 30–40 $\text{м}/\text{сек}$, а процессы нагрева, плавления и испарения частиц магния завершаются до непосредственного его внедрения в расплав чугуна), новый технологический процесс для большегрузных ковшей с большой глубиной ванны ориентирован на исключение испарительной камеры в конструкции фурмы, на увеличение скорости потока, на перенос всех тепло–массообменных процессов в расплав чугуна и на создание более развитой реакционной зоны для улучшения тепло–массообмена между вдуваемым двухфазным магнийсодержащим потоком и жидким чугуном.

Большой комплекс исследований и поисков, включая эксперименты на «холодных» и «горячих» моделях, позволил разработать технологические составляющие и аппаратное исполнение надёжного и экономичного процесса вдувания диспергированного магния в большегрузные ковши

через фурму без испарительной камеры и без пассивирующих добавок к вдуваемому магнию. Газодинамические параметры инжекционно–дозировочной системы обеспечивают устойчивое вдувание магния на глубину расплава вплоть до 4 м при расходах инжектирующего газа менее $130 \text{ нм}^3/\text{ч}$. При обеспечении удельной степени десульфурации (D) около 30% (на каждые 0,1 кг/т вдуваемого магния) расход магния на серу удаленную (β) составляет в среднем 1,5 кг/кг. Процесс гарантированно обеспечивает заданное уменьшение содержания серы в чугуне, в т.ч. до 0,010%, 0,005%, 0,002% и 0,001%. Номограмма удельных расходов магния при десульфурации чугуна в большегрузных ковшах с применением фурм новой конструкции без испарительной камеры приведена на рис.5. Сопоставляя данные диаграмм рис.4 и 5, видим, что в последнем случае (вдувание магния в большегрузные ковши) требуются более низкие удельные расходы магния, т.е. в новой технологии вдувания магния реализованы положительные и приоритетные свойства магниевого реагента (без пассивирующих добавок CaO и CaC_2) при рафинировании большой ванны чугуна.

Разработанная технология десульфурации чугуна с вдуванием магния через фурму без испарительной камеры на выходе освоена на меткомбинатах Китая и передана на ряд металлургических предприятий Европы и Азии для ковшей с массой чугуна от 135 до 350 т. В таблице 2 приведены средние показатели на ряде комбинатов КНР промышленного применения вдувания магния по новой технологии без добавок (в «чистом» виде) в большие заливочные ковши через фурмы без испарительной камеры, из которой видно, что при небольшом расходе магния обеспечивается достаточно эффективная десульфурация чугуна, в т.ч. со снижением содержания серы в среднем до 0,003% по всему массиву обработок чугуна, а для отдельного сортамента сталей – до 0,001–0,002%. Средняя степень десульфурации обеспечена на уровне 81%, удельная (D) – 22,1%. Интенсивность вдувания магния по отдельным установкам изменяется от 7 до 13 кг/мин при высоте свободного пространства в ковшах вплоть до 0,2–0,3 м. Снижение температуры чугуна за период вдувания магния составляет в среднем $4\text{--}5^\circ\text{C}$. При среднем конечном содержании серы в чугуне 0,006% обеспечена средняя степень использования магния на серу 52%, а суммарная – 87%, что является достаточно высоким показателем для продувок текущего промышленного производства.

При промышленном освоении нового технологического процесса десульфурации чугуна гранулированным магнием в больших заливочных ковшах наряду с рядом достоинств (в сравнении со всеми другими технологиями десульфурации) была отмечена недоработка – периодически появляющееся ограничение интенсивности вдувания магния величиной 13–15 кг/мин. При превышении указанной интенсивности процесс вдувания магния протекал весьма активно, с увеличением динамических нагрузок на фурменное устройство и появлением разбрызгивания жидкого чугуна. Наши исследования показали, что основной причиной этих негативных

процессов является недостаточная рациональность метода вдувания и системы инжектирования. Поэтому, обеспечивая в общем устойчивый ввод магния в расплав чугуна, реализованная система не создавала рационального диспергирования вдуваемого двухфазного магнийсодержащего потока в ванне чугуна. Указанный негативный эффект проявлялся в тем большей степени, чем меньше была глубина погружения фурмы в расплав и меньше его масса.

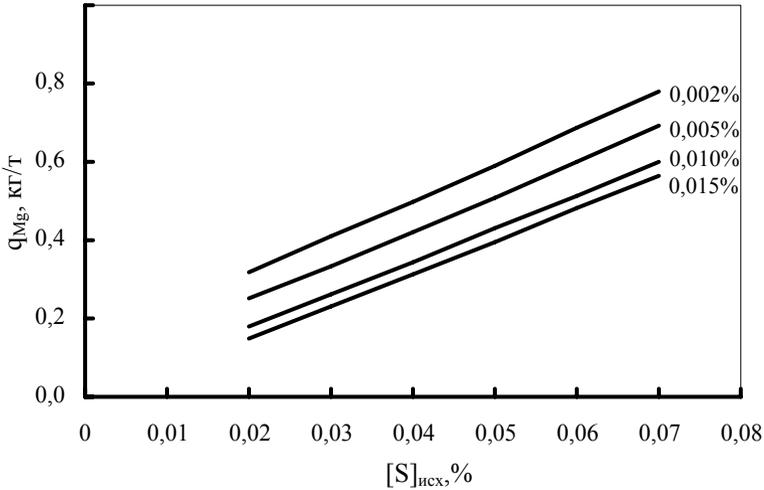


Рис.5. Диаграмма зависимости удельного расхода магния (q_{Mg}) от исходного содержания серы в чугуне ($[S]_{исх}$) при вдувании магния через фурму специальной конструкции (без испарительной камеры) в ковши с массой чугуна более 130–140 тонн. Цифры у кривых – конечное содержание серы в чугуне.

Для устранения выявленного недостатка были проведены обширные исследования и изыскания рациональных условий и режимов организации вдуваемого магнийсодержащего потока как перед его внедрением в расплав чугуна, так и непосредственно в расплаве. В итоге была разработана и освоена более рациональная технология вдувания магния, а инжекционная система подачи магния обеспечивала преобразование газо–магниевого потока как в холодном состоянии (перед внедрением потока в расплав), так и его лучшее распределение в массообменной реакционной зоне расплава, т.е. после истечения из фурмы.

Таблица 2. 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 заливочные ковшки по украинской технологии

Наименование меткомбината	Мощность установок десульфурации, млн.т/год	Масса чугуна в ковше, т	Температура чугуна перед десульфурацией, °С	Количество шлака в ковше перед десульфурацией, % от массы чугуна	Удельный расход магния, кг/т чугуна	Содержание серы в чугуне, %		Итоговая (Ст.Д)	Степень десульфурации чугуна, %		Расход магния на серу удаляемую, β, кг/кг	Степень усвоения магния на серу, K_{Mg}^S , %
						Исходное	После десульфурации		Удельная (D)*	Удельная (D)*		
Пекинский	2,8	195	1290–1400	1,35	0,25	0,027	0,007	74	29,2	1,26	60	
Гангшаньский	3,0	155	1250–1350	1,80	0,36	0,041	0,010	74	21,3	1,25	62	
Тайюаньский	2,1	160	1300–1350	1,41	0,32	0,026	0,006	77	22,5	1,70	46	
Цзяньянский	6,0	195	1210–1350	1,25	0,36	0,032	0,006	81	22,6	1,39	55	
Уханьский	3,8	265	1260–1380	2,06	0,36	0,023	0,003	87	24,1	1,78	42	
Шаганский	3,8	180	1260–1420	0,76	0,32	0,018	0,003	83	26,1	2,13	36	
Баотоуский	2,2	96	1220–1370	1,60	0,50	0,042	0,005	89	17,2	1,46	52	
Среднее по всем установкам десульфурации чугуна		177	1328	1,46	0,35	0,031	0,006	81	22,1	1,48	52	

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

Основные промышленные параметры и показатели модернизированного процесса десульфурации чугуна зернистым или гранулированным магнием следующие.

Масса жидкого чугуна в ковше, т	– не ограничивается
Высота свободного пространства в ковше, м	– вплоть до 0,2–0,3
Температура чугуна, °С	– не ограничивается
Количество исходного шлака в ковше	– по условиям Заказчика
Исходное содержание серы в чугуне, %	– не ограничивается
Требуемое гарантированное содержание серы в чугуне после десульфурации, %	– любое заданное Заказчиком, вплоть до 0,001
Расход инжектирующего газа, $\text{нм}^3/\text{час}$	– менее 110
Давление инжектирующего газа в подающем трубопроводе, МПа	– 0,7–0,8
Тип фурменного устройства	– без испарительной камеры
Интенсивность вдувания магния в жидкий чугун, кг/мин	– 8–26.
Длительность процесса вдувания магния в жидкий чугун, мин.	– 3–6.

Фактические данные по промышленным продувкам чугуна магнием в большегрузных ковшах с фурмами усовершенствованной конструкции и увеличенной интенсивности ввода магния в сопоставлении с процессами фирм ESM (США) и «Polysius–SVAI» представлены в табл.3 и 4, из которых следует, что новая технология десульфурации гранулированным магнием (процесс «Украина–Desmag») сохраняет преимущества применяющихся украинских процессов десульфурации чугуна вдуванием магния в части самой высокой степени усвоения реагента и соответственно наименьшего его расхода, наименьшего дополнительного шлакообразования и минимальных потерь чугуна со шлаком, наименьших потерь температуры чугуна, высокой стабильности и надежности в эксплуатации и, вместе с этим, обеспечивает лучшее диспергирование вдуваемого магния и увеличение практически вдвое интенсивности его ввода, за счет чего длительность процесса вдувания сокращается до 3–5 мин., т.е. уменьшается в 2–3 раза. Этим обеспечиваются широкие возможности применения технологии десульфурации чугуна в современных конвертерных цехах. Так, например, в условиях крупнотоннажных конвертерных цехов с конвертерами 300–350 т при снижении содержания серы в чугуне до 0,002% вдувание гранулированного магния осуществляется при интенсивности его подачи 22–26 кг/мин и продолжительности процесса вдувания 3–5 мин. Очень важным достоинством нового способа вдувания магния является то, что процесс вдувания магния в ковше протекает более спокойно и устойчиво, одновременно увеличивается надежность работы фурменного устройства.

Таблица 3. Сопоставление показателей десульфурации чугуна в большегрузных заливочных ковшах вдуванием зернистого магния по новой технологии (процесс Украина – Desmag) и смеси магния с известью по методу ESM

Показатель, параметр		Вдувание зернистого магния. Процесс «Украина – Desmag». Тонгхуанский и др. меткомбинаты КНР	Вдувание смеси Mg+CaO. Процесс ESM. МК «Северсталь» Череповец, Россия [11,12]
1	Масса чугуна в ковше, т	150–320	300–320
2	Содержание серы в чугуне,%:		
	– перед обработкой	0,020	0,020
	– после десульфурации	0,002	0,002
3	Интенсивность вдувания магния в чугун, кг/мин	10–26	13–25
4	Расход магния:		
	– удельный, кг/т чугуна	0,31	0,49
	– общий, кг/ковш	46–99	147–157
5	Расход извести (высококачественной молотой):		
	– удельный, кг/т чугуна	не применяется	1,55
	– общий, кг/ковш	не применяется	465–496
6	Длительность вдувания реагента, мин	3–5	6,5
7	Снижение температуры чугуна, °С	≤5	6,72
8	Расход реагентов, кг/кг удаленной серы:		
	– магния	1,75	3,11
	– извести высококачественной молотой	не применяется	8,61
9	Количество дополнительно образующегося шлака в ковше:		
	– удельное, кг/т чугуна	0,62	4,08
	– общее, кг/ковш	93–198	1224–1306
10	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,28	1,84
11	Степень усвоения магния на серу удаленную,%	44	28
12	Степень десульфурации чугуна,%:		
	– общая	90	90
	– удельная (на каждые 0,1 кг/т вдуваемого магния)	29,0	18,4

Таблица 4. Сопоставление показателей десульфурации чугуна в большегрузных заливочных ковшах вдуванием зернистого магния по новой технологии (процесс Украина – Desmag) и продувка смесью магния с известью по методу «Polysius–SVAI»

Показатель, параметр		Вдувание зернистого магния. Процесс «Украина – Desmag». Тонгхуанский и др. меткомбинаты КНР	Вдувание смеси Mg+CaO. Процесс «Polysius–SVAI». Нижнетагильский меткомбинат [13,14]
1	Масса чугуна в ковше, т	150–170	164
2	Содержание серы в чугуне,%:		
	– перед обработкой	0,026	0,026
	– после десульфурации	0,005	0,005
3	Интенсивность вдувания магния в чугун, кг/мин	10–26	5–10
4	Расход магния:		
	– удельный, кг/т чугуна	0,30	0,506
	– общий, кг/ковш	45–51	83
5	Расход извести (высококачественной молотой):		
	– удельный, кг/т чугуна	не применяется	2,60
	– общий, кг/ковш	не применяется	426
6	Длительность вдувания реагента, мин	3–5	8–20
7	Снижение температуры чугуна, °С	≤5	10
8	Расход реагентов, кг/кг удаленной серы:		
	– магния	1,43	2,41
	– извести высококачественной молотой	не применяется	12,38
9	Количество дополнительно образующегося шлака в ковше:		
	– удельное, кг/т чугуна	0,60	6,212
	– общее, кг/ковш	90–102	1019
10	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,27	2,795
11	Степень усвоения магния на серу удаленную,%	53,0	31,5
12	Степень десульфурации чугуна,%:		
	– общая	81	81
	– удельная (на каждые 0,1 кг/т вдуваемого магния)	26,9	16,0

Таблица 5. Сопоставление основных затрат при десульфурации чугуна по новой модернизированной технологии вдувания (с диспергированием струи, без испарительной камеры) по методу «Украина – Desmag» в сравнении с процессом ESM и «Polysius–SVAI» при вдувании магния в смеси с известью

№	Показатель, параметр	Обработка чугуна в 250–350 т ковшах. Снижение серы в чугуне с 0,020 до 0,002%		Обработка чугуна в 150–170 т ковшах. Снижение серы в чугуне с 0,026 до 0,005%	
		Вдувание гранулированного магния (процесс «Украина–Desmag»). Меткомбинаты КНР.	Вдувание смеси Mg+CaO. Процесс ESM. МК «Северсталь», Череповец, Россия	Вдувание гранулированного магния (процесс «Украина–Desmag»). Меткомбинаты КНР.	Вдувание смеси Mg+CaO. Процесс «Polysius–SVAI». Нижнетагильский меткомбинат.
1	Расход реагентов, кг/т чугуна:				
	– магния	0,31	0,49	0,30	0,506
	– извести	–	1,55	–	2,600
	– всего реагентов	0,31	2,04	0,30	3,106
2	Количество дополнительно образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	0,62	4,08	0,60	6,212
3	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,279	1,818	0,27	2,795
4	Снижение температуры чугуна при вдувании реагентов, °С	5	6,7	5	10
5	Затраты при десульфурации, долл. США/т чугуна:				
	а) на магний	1,395	2,205	1,350	2,277
	б) на известь	–	0,388	–	0,650
	в) на потери чугуна с дополнительным шлаком	0,140	0,909	0,135	1,398
	г) на потери температуры чугуна	0,100	0,134	0,100	0,200
	Суммарные затраты по пунктам а), б), в), г)	1,635	3,636	1,585	4,525
6	Прибыль (экономия затрат) от использования украинской технологии вдувания гранулированного магния по сравнению с вдуванием смеси извести с магнием, долл. США/т чугуна.	2,001	нет прибыли	2,94	нет прибыли

В табл.5 приведено экономическое сопоставление нового технологического процесса дувания гранулированного магния (с высокой интенсивностью дувания при специальных режимах) и технологии дувания смеси порошков магния и извести на меткомбинате «Северсталь» (процесс ESM) [12,14] и Нижнетагильском меткомбинате (процесс «Polysius-SVAI») [13,14], из которой следует, что дувание гранулированного магния сопровождается меньшими затратами – ниже на 2–3 долл/т чугуна (при всех изложенных выше других преимуществах и достоинствах), а длительность процесса обработки – наименьшая (3–5 мин), в т.ч. по сравнению с методом ESM. В таблице не учтена экономия от более низких других эксплуатационных и капитальных затрат при дувании магния без добавок извести.

Выводы. Приведенное выше свидетельствует о том, что модернизированный процесс десульфурации чугуна зернистым или гранулированным магнием с диспергированием дуваемых потоков специальными фурменными устройствами является наиболее передовым и экономичным технологическим решением, обеспечивающим высокую скорость дувания магния (до 26 кг/мин), небольшую продолжительность процесса дувания магния (3–6 мин) и наименьшие затраты на рафинирование. Процесс может применяться для ковшей различного типоразмера, но особенно целесообразно его применение в большегрузных ковшах, когда ввиду большой массы металла необходимо обеспечить существенный общий (кг/ковш) расход реагента при наименьшей продолжительности рафинирования (менее 6 мин).

Выполненные разработки позволили создать наиболее рациональный технологический процесс внепечной десульфурации чугуна с широкими возможностями варьирования глубины десульфурации (вплоть до 0,001–0,002% серы), массы чугуна в ковшах, интенсивности дувания магния (10–26 кг/мин) и продолжительности рафинирования (3–6 мин).

Процесс обеспечивает лучшее высокое усвоение магния, наименьший расход реагентов, наименьшее снижение температуры и наименьшие потери чугуна со шлаком. В итоге суммарные затраты при рафинировании получаются наименьшими.

Технологический процесс проверен и освоен в промышленной практике. Он наиболее рационален в настоящее время и на длительную перспективу.

1. *Исследование* некоторых параметров процесса глубокой десульфурации чугуна дуванием порошкового магния / Н.А.Воронова, С.Т.Плискановский, А.К.Теслюк и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1969. – № 3. – С. 8–12.
2. *Шевченко А.Ф.* Исследование процесса внепечной десульфурации жидкого чугуна дуванием порошковых реагентов. Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1969. – 175с.

3. *Zebzowski G.R.* A love Affair With Sulfur. The International Desulfurization Seminar. Praga. Gzech Republic. – 21 october 1999. – P.4–11.
4. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 237 с.
5. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. Дис. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. – Днепропетровск, 1997. – 252 с.
6. *Десульфурация чугуна вдуванием магния в чугуновозные ковши / Н.А.Воронова, С.Т.Плискановский, А.Ф.Шевченко и др. // Сталь. – 1974. – №4. – С.297–302.*
7. *Шевченко А.Ф.* Выбор оптимального процесса рафинирования жидкого чугуна реагентами на основе магния. // *Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – № 4. – С.6–9.*
8. *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.6–11.*
9. *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.*
10. *Совершенствование и промышленное применение украинской технологии десульфурации чугуна вдуванием магния. / В.И.Большаков, А.М.Башмаков, А.Ф.Шевченко и др. // Труды IV-го международного конгресса сталеплавателей. – Китай, Пекин. – Апрель 2006. – С.164–172.*
11. *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. научных трудов VIII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Нижний Тагил. – 20–24 сентября 2004. – С.83–87.*
12. *Перспективы десульфурации чугуна на ОАО «Северсталь» с использованием реагентов на основе магния. / А.М.Ламухин, С.Д.Зинченко, В.Г.Ордин и др. // Сб. научных трудов VIII международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Анин. Австрия. – 26–27 сентября 2002. – С.32–33.*
13. *Кушнарев А.В.* Опыт использования инжекционных технологий внепечной десульфурации ванадий содержащего чугуна – полупродукта в конвертерном цехе НТМК. // Сб. научных трудов VIII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. 20–24 сентября 2004. Нижний Тагил. С.5–11.
14. *Аршанский М., Эхельмайер А.* Возведение и пуско-наладочные работы на новой установке десульфурации полупродукта на ОАО «НТМК». // Там же. С.78–8

*Статья рекомендована к печати
чл.-корр.НАН Украины В.И.Большаковым*