

**А.Ф.Шевченко, А.М.Башмаков, А.С.Булахтин, Б.В.Двоскин,
Л.П.Курилова, А.В.Остапенко**

РАЗВИТИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА КОВШЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ ЧУГУНА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ МАГНИЕМ

Целью исследования является дальнейшее развитие украинской технологии десульфурации чугуна вдуванием гранулированного или зернистого магния, обеспечение устойчивого снижения содержания серы в чугуне до 0,001–0,002% в условиях крупного промышленного производства стали. Приведены расчетные и экспериментальные параметры изменения величин системы $[Mg] - [S]$ в условиях вдувания гранул магния при обеспечении глубокой ($\leq 0,005\%$ серы) и особо глубокой ($\leq 0,002\%$) десульфурации чугуна. Освещены условия процесса и его технико-экономические преимущества.

десульфурация чугуна, гранулированный магний, условия процесса, совершенствование, технико-экономические преимущества

Постановка задачи. В условиях возросшей в последние годы конкуренции на мировом рынке металлопродукции металлургам приходится решать все больше новых проблем, связанных с кардинальным повышением качества чугуна и стали, а также снижением материало- и энергоемкости технологических процессов их получения. К одной из таких актуальных проблем относится необходимость выплавки в больших объемах кислородно-конвертерного производства стали с очень низким содержанием серы – вплоть до 0,010–0,003%. Получение стали с таким экстранизким содержанием серы требует не только модернизации и совершенствования всех технологических процессов выплавки, внепечной обработки и разлива стали, но и применения особо чистых по содержанию серы шихтовых материалов, к которым в первую очередь относится жидкий чугун. Если ранее содержание серы в сливаемом в конвертер жидком чугуне 0,010–0,020% удовлетворяло требованиям сталеплавильщиков [1–10], то впоследствии нижний предел по содержанию серы в чугуне снизился до 0,005% [3,4,10,11–16].

Активное развитие энергодобывающих, перерабатывающих и химических производств обусловило дальнейшее ужесточение требований к качеству стали, в т.ч. по содержанию серы, что, в свою очередь, обусловило необходимость применения в конвертерной плавке чугуна с очень низким содержанием серы – $\leq 0,001$ –0,003% и вплоть до 0,0005% [5–7,17–19]. При этом существенной особенностью явилось то, что, с учетом больших объемов производства и разлива стали на машинах непрерывного литья, плавки с особо низким содержанием серы стали не единичными, а серийными, что обеспечивает непрерывную подачу готовой стали на разливу. Для обеспечения этих новых условий в зарубежной практике были применены имевшиеся процессы внепечной десульфурации чугуна

вдуванием порошковых смесей карбида кальция или извести с добавкой порошкового магния [4–7,10]. Отличием явилось то, что удельные расходы реагентов для обеспечения содержания серы в чугуне на уровне <0,003% были существенно увеличены. Результаты промышленной практики показали, что использование такой технологии существенно увеличило нестабильность получения экстранизких содержаний серы (особенно ≤0,001–0,002%), а затраты на десульфурацию чугуна значительно возросли.

В этой связи весьма актуальна необходимость дальнейшего развития украинской технологии десульфурации чугуна вдуванием гранулированного или зернистого магния [4,10,14], которая успешно конкурирует с другими технологиями десульфурации [5,7,8,10], но решить проблему нужно было на новом уровне – обеспечить устойчивое и надежное снижение содержания серы в чугуне до 0,001–0,002% и вплоть до 0,0005% в условиях крупнопромышленного непрерывного производства стали.

Изложение основных материалов исследования.

Предварительные расчеты по выведенному нами [17] выражению (1)

$$[Mg]_p \times [S]_p = (0.00857 \cdot t_{ж.ч.} - 10,5979) \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

показывают (рис.1), что особо глубокая десульфурация чугуна до содержаний серы менее 0,001–0,002% сопровождается резким увеличением остаточного равновесного содержания магния в чугуне $[Mg]_p$ до уровня более 0,025% и вплоть до 0,20–0,30% (в зависимости от конечного содержания серы в чугуне и от температуры жидкого чугуна). Следовательно, глубокая и особо глубокая десульфурация чугуна требует увеличения расхода магния как на взаимодействие с удаляемой серой, так и на насыщение чугуна магнием, чем обеспечивается устойчивость системы рафинирования [10].

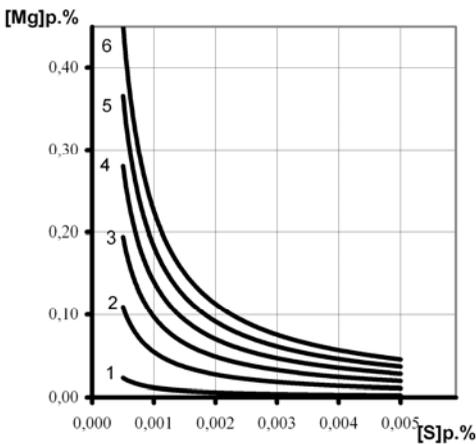


Рис.1. Зависимость равновесного содержания магния ($[Mg]_p$) в жидком чугуне от содержания серы ($[S]_p$) при глубокой и особо глубокой десульфурации: 1 – температура 1250 °C; 2 – 1300 °C; 3 – 1350 °C; 4 – 1400 °C; 5 – 1450 °C; 6 – 1500 °C

Зависимость растворенного в чугуне магния $[Mg]_p$ от температуры жидкого чугуна в условиях особо глубокой десульфурации имеет линей-

ный характер (рис.2), при котором $[Mg]_p$ уменьшается со снижением температуры рафинируемого расплава, т.е. устойчивость системы рафинирования и её рациональность возрастают со снижением температуры жидкого чугуна. По этим причинам глубокую ($\leq 0,005\%$ серы) и особенно суперглубокую десульфурацию чугуна ($\leq 0,002\%$) рационально осуществлять именно в заливочных ковшах, а не в транспортных доменных, где температура чугуна, как правило, на $50-120^{\circ}C$ выше, чем в заливочных ковшах.

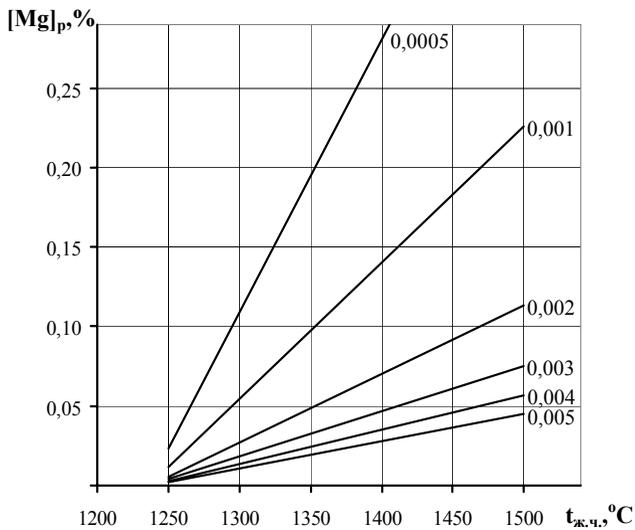


Рис.2. Зависимость равновесного содержания магния в чугуне ($[Mg]_p$) от температуры металла ($t_{ж.ч.}$) при особо глубокой десульфурации. Цифры у линий – содержание серы в чугуне, %.

Выполненный Институтом черной металлургии анализ [20] показал, что

при десульфурации чугуна магнием расходование реагента в основном связано с удалением серы, раскислением чугуна, насыщением чугуна магнием и потерями магния. На примере особо глубокой десульфурации чугуна при температуре $1300^{\circ}C$ видно (табл.1), что в зависимости от исходного содержания серы на связывание с удаляемой серой расходуется 27–55% усваиваемого магния, на раскисление чугуна – 12–19%, а на насыщение чугуна магнием – 33–54%. Из табл.1 следует также, что при особо глубокой десульфурации чугуна в состоянии равновесия количество расходуемого магния на взаимодействие с серой и на насыщение чугуна являются практически соизмеримыми величинами.

Основные параметры и показатели процесса глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна были получены и отработаны при экспериментальных, опытных и промышленных продувках чугуна зернистым или гранулированным магнием в ковшах с массой чугуна от 60 до 300 т. В качестве несущего газа использовали осушенный азот. Вдувание магния в чугун осуществляли без пассивирующих, разубоживающих и другого типа добавок.

В зависимости от условий рафинирования (глубины расплава в ковше, массы чугуна, исходного содержания серы и др.) вдувание магния в расплав осуществляли по 2-м вариантам:

1. При массе чугуна менее 110–120 т и глубине расплава менее 2,6 м применяли фурмы с испарительной камерой на выходе [18].

2. При массе чугуна более 140 т и глубине расплава более 2,7–2,8 м применяли фурмы без испарительной камеры на выходе [18].

Этот же принцип в последующем сохранён при освоении технологического процесса в серийном промышленном производстве.

Таблица 1. Расчетные величины расходов магния по статьям рафинирования при снижении содержания серы в чугуне до 0,002%. Температура чугуна 1300°C.

Статьи расходования магния*	Исходное содержание серы в чугуне, ([S] _{исх.}), %				
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
На удаляемую серу ($q_{Mg}^{\Delta[S]}$), кг/т чугуна /%	<u>0,137</u> 27,1	<u>0,213</u> 36,7	<u>0,289</u> 44,0	<u>0,365</u> 49,8	<u>0,441</u> 54,5
На раскисление чугуна ($q_{Mg}^{\Delta[O]}$), кг/т чугуна /%	<u>0,097</u> 19,2	<u>0,097</u> 16,7	<u>0,097</u> 14,8	<u>0,097</u> 13,2	<u>0,097</u> 12,0
На магний растворенный ($q_{Mg}^{[Mg]}$), кг/т чугуна /%	<u>0,271</u> 53,7	<u>0,271</u> 46,6	<u>0,271</u> 41,2	<u>0,271</u> 37,0	<u>0,271</u> 33,5
Суммарный требуемый расход магния (q_{Mg}^{Σ}), кг/т чугуна /%	<u>0,505</u> 100	<u>0,581</u> 100	<u>0,657</u> 100	<u>0,733</u> 100	<u>0,809</u> 100

*Числитель – расход магния по статье, кг/т чугуна;
знаменатель – % от суммарного расхода.

При продувках чугуна магнием было получено фактическое подтверждение увеличения расхода магния на серу удаляемую (показатель β) при снижении конечного содержания серы в чугуне (рис.3), которое особенно наблюдается при обеспечении особо глубокой ($\leq 0,002\%$ серы) десульфурации чугуна. Эта закономерность сохраняется при различных исходных содержаниях серы. Фактический расход магния на серу удаленную (показатель β) снижается с увеличением глубины ванны расплава в ковше и соответственно с увеличением глубины погружения фурмы (рис.4). Поэтому увеличение массы чугуна в ковше сопровождается снижением показателя β за счет лучшего усвоения магния. В силу изложенных причин, снижение конечного содержания серы в чугуне и уменьшение массы чугуна в ковше при особо глубокой десульфурации чугуна очень существенно (в 1,5–2 раза) повышают расход магния на серу (рис. 5), из чего был сделан вывод о низкой эффективности процесса особо глубокой десуль-

фурации чугуна в ковшах с массой чугуна менее 60 т, когда глубина погружения фурмы меньше 1,9 м. Рациональным рекомендовано осуществление глубокого рафинирования чугуна ($[S] \leq 0,002\%$) в ковшах с массой чугуна более 80 т и особенно в ковшах с массой более 140–150 т.

По массиву фактических данных (более 1000 обработок) рафинирования чугуна в ковшах различного типоразмера получены номограммы удельных расходов магния для обеспечения глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна в зависимости от содержания серы в чугуне перед десульфурацией (рис.6).

Приведенные выше материалы исследований и практика освоения технологического процесса на целом ряде меткомбинатов Китая подтвердили надежность технологии особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием зернистого или гранулированного магния. Одновременно было установлено, что получение чугуна с экстранизким содержанием серы связано с необходимостью значительного увеличения удельного расхода и соответственно общего расхода магния на обработку ковша с чугуном. Последнее, в свою очередь, сопровождается снижением пропускной способности поста десульфурации, увеличением длительности процесса вдувания магния, уменьшением стойкости и срока службы огнеупорной фурмы, а также другими издержками. Поэтому было рекомендовано оснащение каждого поста десульфурации 2-мя или даже 3-мя поочередно работающими фурмами при одновременном увеличении толщины огнеупорной футеровки фурм со 180–250 мм до 320–340 мм по наружному диаметру ствола фурмы.

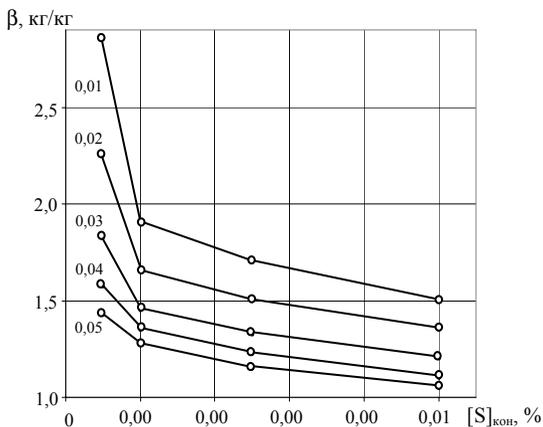


Рис.3. Зависимость фактического расхода магния на серу удаленную (показатель β) от конечного содержания серы в чугуне после десульфурации ($[S]_{\text{кон.}}$). Цифры у кривых – исходное содержание серы в чугуне,%. Температура чугуна – $1300^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$. Масса чугуна в ковше – 100 т ± 3 т.

При такой компоновке каждая из фурм обеспечивает вдувание всего заданного количества магния в ковш за один приём. Продувка следующего ковша осуществляется другой (охладившейся) фурмой. Это технологическое решение при незначительном увеличении капитальных затрат гарантирует обеспечение глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна

при любом исходном содержании серы в чугуна, получение любой заданной глубины десульфурации (вплоть до 0,001% серы), значительно повышает стойкость фурм, снижает текущие расходы и затраты при обработке чугуна.

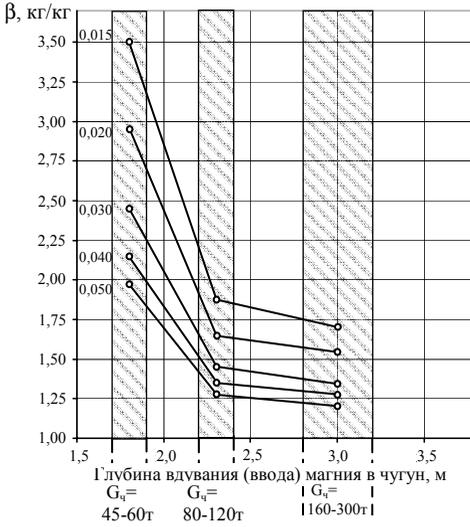


Рис.4. Зависимость фактически израсходованного магния на единицу удаленной серы (показатель β) от глубины вдувания (ввода) магния в жидкий чугун при снижении содержания серы в чугуне до 0,002%.

Цифры у кривых – исходное содержание серы в чугуне.

Температура чугуна $1320 \pm 15^\circ\text{C}$.

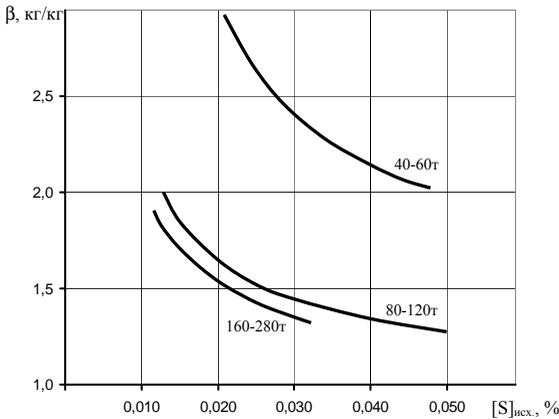


Рис.5. Зависимость фактического расхода магния на единицу удаленной серы (показатель β , кг/кг) от исходного содержания серы в чугуне при конечном содержании серы 0,002% в ковшах различной ёмкости. Цифры у кривых – масса чугуна в ковшах: 40-60 т ($h_{\phi} \leq 1,9$ м), 80-120 т ($h_{\phi} = 2,0 \div 2,4$ м), 160-280 т ($h_{\phi} \geq 2,8$ м).

Каждый пост обору­дуется только одним модулем–дозатором, способным при необходимости подать в ковш вплоть до 240 кг магния, и имеет средства для удаления шлака, а если необходимо, то и оборудование для корректировки состава шлака в ковше. Порядок и технологическое содержание этих операций реализуется в зависимости от исходных условий и задач, решаемых конкретным комплексом внепечной обработки чугуна. В этой связи перечень и последовательность операций в цикле, а также его продолжительность

для каждого комплекса индивидуальны, изменяясь в основных пределах от 15 до 30 мин. Аппаратурно–технологическая схема komponуется таким образом, чтобы продолжительность цикла внепечной обработки чугуна и решаемые задачи вписывались в общий цикл работы технологического потребителя глубоко обесеренного чугуна.

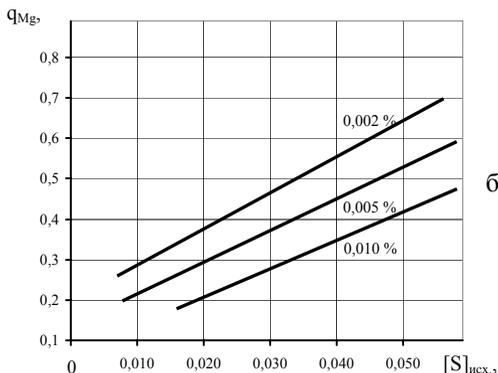
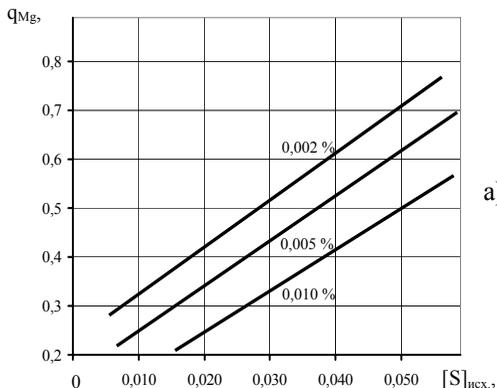


Рис.6. Зависимость удельного расхода магния (q_{Mg}) на десульфурацию от исходного содержания серы в чугуне ($[S]_{исх.}$). Цифры у линий – конечное содержание серы в чугуне. а) масса чугуна в ковшах 80-120 т ($h_{\phi} = 2,1-2,5$ м); б) масса чугуна в ковшах 160-300 т ($h_{\phi} = 2,8-3,4$ м)

Устойчивость и надежность технологической системы глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна была проверена в промышленных условиях не только в период десульфурации на установке, но и в последующий период транспортирования ковшей с глубоко обесеренным чугуном, выдержке в ковшах, переливах и скачивания шлака. При этом специально была принята более сложная технологическая цепочка, когда десульфурацию осуществляли в ковшах, затем чугун переливали в стационарный миксер и далее в заливочные ковши либо, минуя миксер, непосредственно переливали в заливочный ковш. Фактические данные испытаний приведены в табл.2 и 3, из которых следует, что в период после десульфурации (в процессе переливов, выдержки

и скачиваний шлака) содержание серы в чугуне практически не изменяется даже при абсолютном его значении 0,002%, а наблюдается уменьшение содержания магния. По результатам испытаний сделан вывод в том, что оставшийся в жидком чугуне после глубокой десульфурации растворенный магний (0,024–0,052%) предотвращает возврат серы из шлака в чугун, т.е. решается задача сохранения эффекта глубокого рафинирования чугуна. Для исключения процессов ресульфурации в конвертере необходимо обеспечить очень тщательное удаление шлака из ковша перед сливом глубоко обессеренного чугуна до количества оставшегося в ковше шлака не более 25–30 кг [21].

Таблица 2. Среднесуточные данные изменения содержания серы и магния в чугуне на этапе после глубокой десульфурации чугуна в 100–тонных доменных ковшах до слива в 300–тонный заливочный ковш

№ суток эксперимента	Содержание серы ([S]) в чугуне, %			Содержание магния ([Mg]) остаточного в чугуне, %			
	В доменных ковшах		В заливочном ковше (после наполнения из миксера)	В доменных ковшах		На струе из миксера	В заливочном ковше (после наполнения из миксера)
	непосредственно после десульфурации	перед сливом в миксер		непосредственно после десульфурации	перед сливом в миксер		
1	0,0050	0,005	0,0051	0,032	0,032	0,009	0,006
2	0,0063	0,005	0,0050	0,033	0,033	0,006	0,005
3	0,0050	0,004	0,0032	0,036	0,033	0,014	0,009
4	0,0041	0,004	0,0032	0,044	0,041	0,014	0,013
5	0,0036	0,003	0,0034	0,050	0,049	0,017	0,013
6	0,0030	0,003	0,0030	0,052	0,050	0,024	0,017
Среднее за 6	0,0043	0,0043	0,0038	0,0422	0,0418	0,0151	0,0110

Разработанный процесс глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна получил широкое освоение на металлургических комбинатах Китая, где за последние 8 лет сооружено и введено в эксплуатацию 58 установок десульфурации чугуна магнием и скачивания шлака по украинским разработкам. Мощность каждой из установок находится в пределах от 1,0 до 3,8 млн.т/год обессеренного чугуна. При исходном содержании серы в чугуне 0,015–0,096% вдуванием зернистого или гранулированного магния содержание серы в чугуне после десульфурации снижают до 0,001–0,010%. По требованиям производства около 50% чугуна получают с содержанием серы $\leq 0,005\%$, а в части чугуна (10–20%) содержание серы не превышает 0,002%.

Таблица 3. Изменение содержания серы и магния в особо низкосернистом чугуна после его транспортирования в чугуновозных доменных 110–тонных ковшах, скачивания шлака, перелива в 300–тонный заливочный ковш и повторного очищения от шлака.

№ серии эксперимента	№ ковша в чугуновозном доменном составе	Масса чугуна в ковше, т	Содержание серы ([S]) в чугуне, %				Содержания магния ([Mg] в чугуне, %				Толщина шлака в доменных чугуновозных ковшах, мм		Содержание серы в выплавленной стали, %
			в доменных чугуновозных ковшах		в заливочном ковше (300 т чугуна)		в доменных чугуновозных ковшах		в заливочном ковше (300 т чугуна)		до скачивания шлака	после скачивания шлака	
			после вдувания магния	после скачивания шлака	после налива чугуна из доменных ковшей	после скачивания шлака	после вдувания магния	после скачивания шлака	после налива чугуна из доменных ковшей	после скачивания шлака			
1	1–1	93,5	0,002	0,002	0,002	0,002	0,034	0,028	0,0210	0,0165	100	20	0,002
	1–2	96,0	0,003	0,003			0,041	0,037			80	30	
	1–3	79,5	0,003	0,003			0,047	0,035			100	10	
	1–4	83,0	0,002	0,002			0,030	0,030			120	20	
Среднее по серии		88,0	0,0025	0,0025	0,002	0,002	0,038	0,032	0,0210	0,0165	100	20	0,002
2	2–1	97,0	0,002	0,002	0,003	0,002	0,035	0,028	0,0195	0,0195	80	10	0,002
	2–2	85,5	0,003	0,003			0,052	0,052			40	10	
	2–3	100,0	0,002	0,001			0,050	0,040			120	5	
	2–4	108,0	0,003	0,003			0,024	0,021			80	5	
Среднее по серии		97,6	0,0025	0,0023	0,003	0,002	0,0402	0,0352	0,0195	0,0195	80	8	0,002

Экономическое сопоставление разработанного процесса глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна по украинской технологии (вдувание зернистого или гранулированного магния) с наиболее эффективным альтернативным аналогом сделано на основе показателей работы последних освоенных установок десульфурации гранулированным магнием в Китае и одной из самых новых и современных установок американской компании ESM вдуванием смеси порошковых магния и извести на меткомбинате «Северсталь», Череповец, Россия [6] (табл.4).

Таблица 4. Сопоставление основных затрат при особо глубокой десульфурации чугуна (до 0,002% серы) по модернизированной украинской технологии вдувания магния без добавок и по технологии ESM (США) на МК «Северсталь» (Россия) [6] при обработке чугуна в 250–350 т ковшах. Исходное содержание серы в чугуне 0,020%

№	Показатель, параметр	Вдувание гранулированного магния (украинский процесс) на меткомбинатах Китая	Вдувание смеси Mg+Ca (процесс ESM, США) МК «Северсталь» Россия, Череповец
1	Расход реагентов, кг/т чугуна:		
	– магния	0,31	0,49
	– известь	–	1,55
	– всего реагентов	0,31	2,04
2	Количество дополнительно образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	0,62	4,08
3	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,279	1,818
4	Снижение температуры чугуна, при вдувании реагентов, °С	5	6,7
5	Затраты при десульфурации, долл.США/т чугуна:		
	а) на магний;	1,395	2,205
	б) на известь;	–	0,388
	в) на потери чугуна с дополнительным шлаком;	0,140	0,909
	г) на потери температуры чугуна.	0,100	0,134
	Суммарные затраты по пунктам «а», «б», «в», «г».	1,635	3,636
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

Из сравнения данных табл.4 следует, что разработанный и освоенный процесс по украинской технологии отличается наименьшим расходом магния,

не требует дополнительных обессеривающих реагентов (извести), имеет меньшее дополнительное шлакообразование, меньшие потери чугуна, меньшую продолжительность обработки чугуна и меньшие потери температуры чугуна. Указанные преимущества украинской технологии по сравнению с американским процессом ESM создают экономию затрат на десульфурацию в размере 2 долл. США на каждой тонне обработанного чугуна. Кроме этого, освоение украинского процесса десульфурации гранулированным магнием сопровождается более низкими капитальными и текущими эксплуатационными затратами. В таблице не учтены более низкие капитальные и текущие эксплуатационные затраты на установках десульфурации по украинской технологии вдувания магния без добавок.

Заключение. Приведенное свидетельствует о том, что представленный в статье украинский процесс глубокой и особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния является рациональным технологическим решением с надежной и длительной перспективой применения в металлургии черных металлов.

1. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах. / С.В.Колпаков, Р.В.Старов, В.В.Смоктий и др. – М: Машиностроение, 1991.– 464 с.
2. *Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С.* Конвертерное производство стали. – Днепропетровск. – РВ «Дніпро–ВАЛ», 2006. – 454 с.
3. *Кудрин В.А.* Внепечная обработка чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1992. – 335 с.
4. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
5. *IX Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. Галати–Румыния. – 18–21 сентября 2006 г. – 91 с.
6. *VIII Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. Нижний Тагил, Россия. – 20–24 сентября 2004 г. – 87 с.
7. *VII Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. – Аниф – Австрия. – 26–27 сентября 2002 г. – 115 с.
8. *VI Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. Магдебург – Германия. – 14–16 сентября 2000г. – 138 с.
9. *Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов.– Пидинг/Бад Рейхенхал– ФРГ. – 15–17 октября 1998 г. – 144 с.
10. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. Дисс. докт. техн. наук. Днепропетровск. ИЧМ. 1997.–426с.
11. *Колпаков С.В.* Кислородно–конвертерный процесс. // Докл. конф. «60–летие кислородно–конвертерного процесса». – Москва. –ЦНИИчермет им. И.П.Бардина. – 2007. – С.15–18.
12. *Технологические* преимущества десульфурации чугуна гранулированным магнием в заливочных ковшах сталеплавильных цехов. / Д.В.Гулыга, А.М.Поживанов, П.М.Семенченко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1991.– №3.–С.17–19.
13. *Опытно–промышленное* опробование технологии десульфурации чугуна в большегрузных заливочных ковшах инжектированием реагентов через

- погружаемую фурму. / Б.В.Двоскин, А.Ф.Шевченко, Н.Т.Ткач и др. // Тр. 1-го конгресса сталеплавателей. ЦНИИТЭИЧМ. – Москва. – 1993. – С.186–187.
14. *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.
 15. *Сопоставление эффективности способов десульфурации чугуна.* / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун и др. // Сталь. – 2000. – № 8. – С. 14–17.
 16. *Мачикин В.И., Зборщик А.М., Складановский Е.Н.* Повышение качества черных металлов. – Киев: Техника, 1981. – 161 с.
 17. *Процесс* особо глубокой десульфурации чугуна дуванием магния в условиях крупнопромышленного производства стали. / А.Ф.Шевченко, А.С.Вергун, А.С.Булахтин и др. // Металл и литьё Украины. – 2006. – № 1. – С.84–89.
 18. *Создание и развитие рациональных технологических решений по внепечной десульфурации чугуна.* / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, Лю Дун Ие и др. // Труды 15-й всекитайской научно-технической конференции по выплавке стали. КНР. – 19–21 ноября 2008. – Изд. НТО металлургов Китая. – С.811–819.
 19. *Развитие* внепечной обработки чугуна и создание современного оборудования для десульфурации чугуна магнием. / А.Ф.Шевченко, В.И.Большаков, Б.В.Двоскин и др. // Новини науки Придніпров'я. – 2002. – №6– С.48–56.
 20. *Шевченко А.Ф., Булахтин А.С., Курилова Л.П.* К вопросу расходования магния при внепечной десульфурации жидкого чугуна // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – Днепропетровск. – 2004. – № 8. – С.157–163.
 21. *Влияние* технологии десульфурации чугуна и скачивания шлака на приход серы в сталеплавильный агрегат. / А.Ф.Шевченко, А.С.Вергун, Б.В.Двоскин и др. // Бюллетень НТЭИ «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация». – Москва. – 2008. – вып.5. – С.18–25.

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

А.Ф.Шевченко, О.М.Башимаков, А.С.Булахтин, Б.В.Двоскин, Л.П.Курилова, О.В.Остапенко

Розвиток можливостей процесу ковшового рафінування чавуну диспергованим магнієм

Метою дослідження є подальший розвиток української технології десульфуратії чавуну дуванням гранульованого або зернистого магнію, забезпечення стійкого зниження вмісту сірки в чавуні до 0,001–0,002% в умовах крупного промислового виробництва сталі. Наведено розрахункові та експериментальні параметри зміни величин системи [Mg] – [S] в умовах дування гранул магнію при забезпеченні глибокої ($\leq 0,005\%$ сірки) і особливо глибокої ($\leq 0,002\%$) десульфуратії чавуну. Висвітлені умови процесу і його техніко-економічні переваги.