

УДК 669.162.267.6:005

А.Ф.Шевченко, И.А.Маначин, А.М.Шевченко, Б.В.Двоскин,  
А.С.Вергун, С.А.Шевченко, А.Л.Руденко, А.М.Башмаков,  
Л.П.Курилова

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Целью работы является сопоставление технико-экономических показателей различных процессов внепечной десульфурации чугуна. По фактическим промышленным данным 15 сталеплавильных заводов различных стран получены средние технические показатели внепечной десульфурации чугуна различными процессами. На базе этих исходных данных рассчитаны затраты на десульфурацию чугуна наиболее распространенных в настоящее время технологий десульфурации чугуна. Показано, что наименьшие затраты характерны для процесса десульфурации чугуна вдуванием зернистого магния (без разубоживающих добавок) двухснопной фурмой, которые вдвое меньше, чем при продувке смесью извести с магнием (коинжекция) и втрое меньше, чем KR-процесс известью и плавиковым шпатом.

**Ключевые слова:** внепечная десульфурация чугуна, процессы, технические показатели, затраты, магний

**Состояние проблемы.** В мировой практике технологические процессы внепечной десульфурации чугуна заслужено получили постоянное применение в технологической цепи получения и подготовки жидкого чугуна к сталеплавильному переделу. На преобладающем большинстве металлургических предприятий различных стран внепечная десульфурация чугуна и удаление ковшевых шлаков является постоянной составляющей выплавки широкого сортамента сталей и, в первую очередь, низкосернистых ( $\leq 0,010$  % серы) и особо чистых по сере ( $\leq 0,005$  % и  $\leq 0,001$  % серы) [1, 2]. Например, в КНР – лидера мировой металлургии, в настоящее время суммарная мощность средств десульфурации чугуна составляет более 330 млн.т/год, а в 2010 г. было обессерено более 55% потребляемого чугуна, т.е. около 280 млн. т/год [2]. Это явилось одной из важных составляющих небывалого прогресса металлургии КНР.

**Цель работы.** Сопоставление технико-экономических показателей различных процессов внепечной десульфурации чугуна.

**Изложение основных результатов исследования.** С учетом практики, тенденций и перспектив освоения процессов десульфурации чугуна в настоящее время рационально выделить 3 основных технологических решения обессеривания чугуна:

1. вдувание молотой флюидизированной извести в смеси с магнием.
2. вдувание зернистого (гранулированного) магния (без разубоживающих добавок).

3. КР-процесс с применением смеси извести с плавиковым шпатом и перемешиванием огнеупорной мешалкой (импеллером).

Вдувание молотой извести (специального производства и качества) в смеси с магнезиом применяют в странах Европы, Америки и Азии. Имеются фактические данные применения этого процесса на 5 различных комбинатах России, КНР и Украины [2–9] (табл.1). Как следует из табл.1, вдуванием магнезиосодержащих смесей обеспечивается достаточно эффективная десульфурация чугуна с обеспечением степени десульфурации в среднем 70% и продолжительности полного цикла обработки (операции с ковшем, вдуванием магнезиом, скачивание шлака, отбор проб, замер температуры) в среднем 35 мин.

Таблица 1. Показатели десульфурации чугуна вдуванием порошковой смеси магнезиом и флюидизированной извести (методом коинжекции) на различных металлургических предприятиях (В числителе – пределы значений, в знаменателе – средние значения)

Показатели		Предприятие, где освоен процесс. Поставщик технологии. ОАО «Северсталь» (Россия), «ESM» (США)	ОАО «Алчевский МК» (Украина). «Крупп Polysius» (Германия)	Шаганский меткомбинат (КНР). «Крупп Polysius» (Германия)	Ханданский меткомбинат (КНР). «Крупп Polysius» (Германия)	Уханьский меткомбинат (КНР). «Danieli Corus»	Средние значения по вариантам
Источник информации		[3]	[4,5]	[6,7]	[8]	[9]	[3–9]
№ варианта		<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	Масса чугуна в ковшах, т	300–320	275	178	108	102	$\frac{102-320}{168}$
2	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:						
	– магнезий	$\frac{0,23-0,80}{0,49}$	0,48	$\frac{0,15-0,90}{0,43}$	$\frac{0,22-1,11}{0,44}$	$\frac{0,06-1,75}{0,328}$	$\frac{0,06-1,75}{0,434}$
	– известь молотая флюидизированная	$\frac{0,63-3,11}{1,55}$	2,88	$\frac{0,17-1,91}{0,62}$	$\frac{0,47-4,27}{2,07}$	1,312	$\frac{0,63-4,27}{1,686}$
	– всего реагентов	2,04	3,36	1,05	2,53	1,64	$\frac{1,05-3,36}{2,12}$
3	Интенсивность вдувания магнезиом, кг/мин	16–22	12	7,9	8	8	11

№ варианта		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
4	Содержание серы в чугуна, %:						
	– исходное	$\frac{0,010-0,047}{0,020}$	0,030	$\frac{0,006-0,065}{0,027}$	$\frac{0,006-0,056}{0,038}$	$\frac{0,009-0,089}{0,028}$	$\frac{0,006-0,089}{0,0286}$
	– после десульфурации	$\frac{0,001-0,010}{0,002}$	0,005	$\frac{0,001-0,047}{0,009}$	$\frac{0,001-0,041}{0,016}$	$\frac{0,002-0,035}{0,013}$	$\frac{0,001-0,047}{0,009}$
	Степень десульфурации чугуна, %						
	– общая (Ст. D) (итоговая)	$\frac{40-97}{90}$	83	65	58	54	$\frac{40-97}{70}$
5	– удельная (D)– на каждые 0,1 кг/т введенного магния	18,4	17,3	15,1	13,2	16,3	$\frac{13,2-18,4}{16,1}$
	– удельная (d)– на каждые 0,1 кг/т вводимой смеси	4,4	2,47	6,2	2,32	3,3	$\frac{2,3-6,2}{3,74}$
6	Потери температуры чугуна:						
	– °С	$\frac{0-29}{6,72}$	н/д	$\frac{5-37}{15}$	н/д	14	$\frac{5-37}{12}$
	– °С/мин	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
7	Продолжительность операции вдувания реагентов, мин.	$\frac{3-16}{6,5}$	10–20	$\frac{6-27}{14}$	н/д	$\frac{4-31}{9,04}$	$\frac{3-31}{11,1}$
8	Продолжительность цикла всех операций обработки чугуна, мин.	н/д	н/д	$\frac{22-45}{37}$	н/д	33	35
9	Количество дополнительно образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	4,08	6,72	2,10	5,06	3,28	$\frac{2,1-5,06}{4,25}$
10	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	2,04	3,36	1,05	2,53	1,64	$\frac{0,52-3,36}{2,12}$
11	Показатель расхода реагента на удаленную серу, кг/кг:						
	– магния	2,72	1,92	2,39	2,0	2,19	2,21
	– реагентов	11,30	13,44	5,83	11,5	7,45	10,82
12	Степень усвоения магния, %:						
	– на серу $\left( K_{Mg}^S \right)$	27,9	39,6	31,8	38,0	34,8	34,3
	– на серу и магний остаточный в чугуна $\left( K_{Mg}^{S+Mg} \right)$	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д

Особо глубокая десульфурация чугуна и большой расход реагентов (особенно в больших заливочных ковшах) реализуются с применением продувки чугуна одновременно через 2 фурмы (вариант 1.1, табл.1), что позволяет увеличить интенсивность вдувания магния до 22 кг/мин и снизить продолжительность операции вдувания в среднем до 6,5 мин.

Вдувание зернистого (гранулированного) магния без разубоживающих добавок применяют в 3-х странах – КНР, Украине и Тайване, для чего используют как одноканальные (в т.ч. с испарителями), так и двухсопловые фурмы. Наибольшее распространение этот технологический процесс получил в КНР, где функционируют 130 установок десульфурации, общей мощностью более 210 млн.т/год [2], и обеспечивают десульфурацию чугуна в ковшах с массой чугуна от 40 до 300 т. При вдувании магния через одноканальные фурмы интенсивность подачи магния ограничена в среднем до 11 кг/мин (табл. 2), но даже при этом ограничении высокое усвоение магния и небольшой расход реагента позволяет обеспечивать десульфурацию чугуна в ковшах с массой чугуна вплоть до 260–280 т. Средняя степень десульфурации составляет около 82% (табл. 2) и продолжительность цикла обработки 29,5 мин.

Вдувание магния (без добавок) через двухсопловые фурмы является самой последней украинской технологической разработкой [12] и применяется в настоящее время на 4-х комбинатах (Тайвань и КНР) [12–16]. Обработку магнием осуществляют в ковшах различного типоразмера (100–300 т) с обеспечением очень высокой степени десульфурации – 90–94% (табл. 3), и весьма глубокой десульфурации – до 0,0003–0,0020% серы. Отличительной особенностью этой технологии является обеспечение высокой интенсивности вдувания магния (через одну фурму) – до 25 кг/мин. и достижение наиболее высокой степени усвоения магния – в среднем до 90 %. По материальным затратам процесс относится к самым экономным.

Десульфурация чугуна KR-процессом с использованием извести и плавленого шпата получает все большее применение на меткомбинатах Китая [2, 17–20]. Из табл. 4 следует, что на сталевых заводах корпораций Qian steel (КНР) и CSC (Тайвань) обеспечивается наиболее эффективная десульфурация чугуна – в среднем до 0,0018 – 0,0040% серы, с удалением 82–92,8% серы. Этот процесс использует наиболее простые и дешевые материалы, но для обеспечения наиболее эффективной десульфурации цикл операций получается наиболее продолжительный (в среднем 39 мин), с чем связаны наиболее высокие (в сравнении с другими способами десульфурации) потери температуры – 41° С.

Таблица 2. Показатели десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния через односopловую (одноканальную) фурму в заливочные ковши (в числителе – пределы значений, в знаменателе – средние значения).

№№ п/п	Предприятие, где освоен процесс. Поставщик технологии	Корпорация WISCO (Ухань, КНР). ИЧМ-ИТ (Украина)	Шаганский металлур- гический комбинат (Шаган, КНР). Desmag-ИЧМ-ИТ (Украина)	Тонгхуанский металлур- гический комбинат (Тонгхуа, КНР) Desmag-ИЧМ-ИТ (Украина)	Среднее	
		Показатели				
		Источник информа- ции	[1, 10]	[1, 7]	[11]	[1,7,10,11]
	№ варианта	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	
1	Масса чугуна в ковшах	265	177	133	$\frac{133-265}{192}$	
2	Удельный расход металлического магния, кг/т чугуна	$\frac{0,23-0,68}{0,36}$	$\frac{0,19-0,50}{0,33}$	$\frac{0,17-0,95}{0,51}$	$\frac{0,17-0,95}{0,400}$	
3	Интенсивность вдувания магния, кг/мин	11	8	8	9	
4	Содержание серы в чугуне, %:					
	– исходное	$\frac{0,009-0,051}{0,023}$	$\frac{0,006-0,047}{0,018}$	$\frac{0,019-0,076}{0,033}$	$\frac{0,006-0,076}{0,0247}$	
	– после десульфурации	$\frac{0,001-0,020}{0,004}$	$\frac{0,001-0,015}{0,004}$	$\frac{0,001-0,018}{0,005}$	$\frac{0,001-0,020}{0,0043}$	
5	Степень десульфурации чугуна, %:					
	– общая (Ст.Д) суммарная	82,2	80	82	81,4	
	– удельная (D) – на каждые 0,1 кг/т введенного магния	24,5	25,2	18,8	20,3	
	– удельная на каждые 0,1 кг/т введенного реагента	21,0	22,2	16,8	18,7	
6	Потери температуры чугуна:					
	– °С	16	16	10	14	
	– °С/мин.	0,62	0,73	0,82	0,72	
7	Продолжительность операции вдувания магния, мин.	$\frac{6,5-16}{10}$	$\frac{6-14}{9,3}$	$\frac{6-20}{11,8}$	$\frac{6-20}{10,4}$	

Продолжение табл. 2

Источник информации		[1, 10]	[1, 7]	[11]	[1,7,10,11]
№ варианта		2.1	2.2	2.3	2.4
8	Продолжительность цикла всех операций обработки чугуна, мин.	н/д	30	29	29,5
9	Количество шлака дополнительно образующегося в ковше, кг/т чугуна	0,78	0,72	1,04	0,847
10	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	0,35	0,33	0,52	0,40
11	Показатель $\beta$ – расход магния на серу удаленную, кг/кг	2,08	2,36	1,88	2,1
12	Степень усвоения магния:				
	– на серу $\left(K_{Mg}^S\right)$	42	33	43,4	39,5
	– на серу и магний остаточный $\left(K_{Mg}^{S+Mg}\right)$	88	60	81,5	76,5

Таблица 3. Показатели десульфурации чугуна при вдувании гранулированного магния двухсопловой погружаемой фурмой (в числителе – пределы значений, в знаменателе – средние значения).

Показатели	Предприятие, где освоен процесс	Корпорация CSC Стальзавод № 2 (Каосюн, Тайвань)	Корпорация CSC Стальзавод № 2 (Каосюн, Тайвань)	Корпорация CSC Стальзавод № 2 (Каосюн, Тайвань)	Тонгхуан меткомбинат (Тонгхуа, КНР)	Дзилынский меткомбинат (Дзилынь, КНР)	Яньцзинь, Лянхэский меткомбинат (Яньцзинь, КНР)	Средние значения по вариантам
	Источник информации							
№ варианта		2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10.	2.11
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Масса чугуна в ковшах, т	261	253	260	147	144	96	$\frac{96-261}{194}$
2	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:	0,331	0,413	0,365	0,530	0,380	0,360	0,39

№ варианта		2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11
3	Интенсивность вдувания магния, кг/мин	11,4–15 13,5	16–16 16	18–24 21	12–20 17	8–15 13	8–14 10	8–24 16
4	Содержание серы в чугунае, %:							
	– исходное	0,024	0,029	0,027	0,029	0,026	0,024	0,027
	– после десульфурации	0,0007–0,012 0,0044	0,0011–0,006 0,0029	0,0009–0,005 0,0029	0,0003–0,004 0,0016	0,007	0,0037	0,0037
5	Степень десульфурации чугуна, %							
	– общая (Ст.Д) суммарная	81	90	89	94	73	83	85
	– удельная (D) на каждые 0,1 кг/т введенного магния	26,3	22,5	25,7	17,7	19,3	23	22,4
	– удельная на каждые 0,1 кг/т вводимого реагента	23,7	20,2	23,7	16,3	17,7	21,2	20,6
6	Потери температуры чугуна:							
	– °С	11	9	5	10	9	13	10
	– °С/мин	0,65	0,64	0,66	0,70	0,68	0,95	0,72
7	Продолжительность операции вдувания магния, мин.	6,5	7,8	5	4,8	4,5	4	5,7
8	Продолжительность цикла всех операций обработки чугуна, мин.	н/д	27	22	21	22	21	23
9	Количество дополнительно образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	0,720	0,918	0,770	1,152	0,826	0,856	0,827
10	Потери чугуна с дополнительным шлаком, кг/т чугуна	0,324	0,413	0,346	0,518	0,372	0,385	0,372
11	Показатель $\beta$ – расхода магния на серу удаленную, кг/кг	1,83	1,72	1,71	1,93	2,0	1,94	1,855
12	Степень усвоения магния, %:							
	– на серу $\left(K_{Mg}^S\right)$	48,1	47,9	51,4	39,3	39	42,3	45,1
	– на серу и магний остаточный $\left(K_{Mg}^{S+Mg}\right)$	н/д	95,05	н/д	91,2	84,2	89,2	90

Таблица 4. Показатели десульфурации чугуна KR – процессом известью и добавкой плавикового шлака с применением механического перемешивания погружаемым огнеупорным импеллером на различных металлургических предприятиях (в числителе – пределы значений, в знаменателе – средние значения).

№	Предприятие, где освоен процесс	Корпорация WISCO (Ухань, КНР)	Корпорация QIANSTEEL (Цзяньян, КНР)	Хайсин МК (Хайсин, КНР)	Корпорация CSC (Каосюн, Тайвань)		Среднее
					Серия «А»	Серия «В»	
Показатели							
	Источник информации	[18, 19]	[17, 19]	[19, 20]	[21]	[22]	[17-22]
	№ варианта	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>3.5</b>	<b>3.6</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	Масса чугуна в ковшах, т	н/д	120–200	79	250	251	$\frac{79-251}{180}$
2	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:						
	– известь порошковая	н/д	н/д	н/д	3,87	2,59	$\frac{2,59-3,87}{3,23}$
	– известь кусковая и фракционированная	н/д	н/д	н/д	1,97	4,61	$\frac{1,97-4,61}{3,29}$
	– плавиковый шпат	н/д	н/д	н/д	0,73	0,51	$\frac{0,51-0,73}{0,62}$
	– всего реагентов	5,39	6,3	5,13	6,66	7,62	$\frac{5,13-7,62}{6,22}$
3	Длительность перемешивания, мин	8	11	8–15	$\frac{12,8-20,7}{16,7}$	$\frac{12,5-20,8}{17,9}$	$\frac{8-20,8}{13}$
4	Содержание серы в чугуна, %:						
	– исходное	0,028	0,025	$\frac{0,017-0,062}{0,035}$	$\frac{0,013-0,033}{0,023}$	$\frac{0,006-0,042}{0,022}$	$\frac{0,006-0,062}{0,0266}$
	– после десульфурации	0,0035	0,0018	$\frac{0,001-0,034}{0,009}$	$\frac{0,0005-0,0074}{0,0042}$	$\frac{0,0002-0,0190}{0,0041}$	$\frac{0,0002-0,0340}{0,004}$
5	Степень десульфурации чугуна, %:						
	– общая (Ст.Д) суммарная	87,5	92,8	74	82	81,4	83,5
	– удельная (D) на каждые 0,1 кг/т введенного реагента	1,64	1,47	1,45	1,23	1,06	1,34
6	Потери температуры чугуна, °С	38	н/д	45	н/д	н/д	41
7	Продолжительность цикла всех операций обработки чугуна, мин	35	35	42	42	$\frac{26-68}{41}$	39
8	Количество дополнительного образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	10,78	11,26	10,26	11,36	15,24	12,2
9	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	5,39	6,3	5,13	5,68	7,62	6,1
10	Показатель расхода реагентов на серу удаленную, кг/кг	22,0	27,2	19,7	35,4	42,5	27,5



Сопоставление показателей десульфурации чугуна различными технологическими процессами по средним величинам массивов промышленных данных (табл. 1–4) представлено в табл. 5, из которой следует:

1. Вдувание зернистого магния через двухсопловые фурмы характеризуется наименьшим расходом магния (0,391 кг/т чугуна) и реагента, наибольшей интенсивностью ввода магния (16 кг/мин) и, соответственно, самой короткой операцией ввода реагента (5,7 мин), наибольшей итоговой (85%), и удельной (20,6%) степенью десульфурации чугуна, наименьшей потерей температуры, самым коротким циклом всех операций обработки (23 мин), наименьшим шлакообразованием (0,827 кг/т чугуна) и потерями чугуна (0,372 кг/т) с этим шлаком, наименьшим расходом на серу удаленную (2,01 кг/кг), и наибольшей степенью усвоения обессеривающего реагента (90%).

2. KR-процесс с применением извести и плавикового шпата характеризуется такими особыми параметрами как наиболее высокий расход реагента (6,22 кг/т чугуна), наименьшей удельной степенью десульфурации (1,34%), наибольшей продолжительностью операции перемешивания (13 мин) и наибольшим циклом обработки чугуна (39 мин), очень существенными потерями температуры чугуна (41<sup>0</sup>С), наибольшим дополнительным шлакообразованием (12,44 кг/т чугуна) и наибольшими потерями чугуна со шлаком (6,22 кг/т чугуна).

3. Процесс десульфурации чугуна вдуванием магния в смеси с молотой известью занимает промежуточное положение между первыми двумя, т.е. уступает по всем показателям вдуванию зернистого магния и превосходит основные показатели KR-процесса.

Экономическое сопоставление анализируемых технологических процессов десульфурации чугуна представлено в табл. 6, в основу которой положены средние значения показателей табл. 5. Из табл. 6 следует, что наименьшие затраты на десульфурацию чугуна характерны для вдувания зернистого магния через двухсопловую фурму – 2,189 долл. США/т чугуна, а наибольшие при KR-процессе смесью извести с плавиковым шпатом – 6,29 долл. США/т чугуна. Видим, что, несмотря на то, что в KR-процессе применяются более дешевые реагенты итоговые затраты по всем основным статьям расходов получаются больше, чем у всех других сравниваемых технологий, что является следствием больших расходов реагентов, большим дополнительным шлакообразованием и потерей чугуна с этим шлаком, а также значительными потерями температуры при KR-процессе.

Значительная (самая большая) продолжительность цикла обработки чугуна получается при KR-процессе – 35–42 мин., свидетельствует о том, что с учетом производственной обстановки в конвертерном цехе KR-процесс в целом ряде случаев не вписывается в требуемый цикл подачи обессеренного чугуна на плавку, а это требует иметь количество стенов десульфурации больше одного, что в свою очередь сопровождается большими капитальными затратами.

Таблица 5. Сопоставление (средних по массивам промышленных данных) показателей десульфурации чугуна различными (табл. 1–4) технологическими процессами

Показатели		Вдувание магния и извести	Вдувание зернистого магния однональной фурмой	Вдувание зернистого магния двухслойной фурмой	KR-процесс, известь и плавиковый шпат, перемешивание
Источник информации		табл.1	табл.2	табл.3	табл.4
№ варианта процесса		<b>1,6</b>	<b>2,4</b>	<b>2,11</b>	<b>3,6</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1	Масса чугуна в ковшах, т	102–320	133–265	96–261	79–251
2	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:				
	– магний	0,434	0,400	0,391	–
	– известь молотая флюидизированная	1,686	–	–	–
	– известь порошковая	–	–	–	3,23
	– известь кусковая и фракционированная	–	–	–	3,29
	– плавиковый шпат	–	–	–	0,62
	– всего реагентов	2,12	0,430	0,420	6,22
3	Интенсивность вдувания магния, кг/мин	11	9	16	–
4	Содержание серы в чугуне, %				
	– исходное	0,0286	0,0247	0,027	0,0266
	– после десульфурации	0,0090	0,0043	0,0037	0,0040
5	Степень десульфурации чугуна, %:				
	– общая (Ст. D) (итоговая)	70	81	85	83
	– удельная (D) на каждые 0,1 кг/т чугуна введенного магния	16,1	20,3	22,4	–
	– удельная на каждые 0,1 кг/т введенного реагента	3,7	18,7	20,6	1,34
6	Потери температуры чугуна:				
	– °С	12	14	10	41
	– °С/мин	н/д	0,72	0,72	н/д
7	Продолжительность операции вдувания реагентов (или перемешивания), мин.	11,1	10,4	5,7	13
8	Продолжительность цикла всех операций обработки чугуна, мин.	35	29	23	39
9	Количество дополнительно образующегося в ковше шлака, кг/т чугуна	4,25	0,847	0,827	12,44

№ варианта процесса		1.6	2.4	2.11	3.6
10	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/т чугуна	2,12	0,400	0,372	6,22
11	Показатель расхода на серу удаленную, кг/кг				
	– магния	2,21	2,05	1,85	–
	– реагентов	10,82	2,13	2,01	27,5
12	Степень усвоения магния, %:				
	– на серу ( $K_{Mg}^S$ )	34,3	39,5	45,1	–
	– на серу и магний остаточный в чугуне ( $K_{Mg}^{S+Mg}$ )	н/д	76,5	90	–

Таблица 6. Основные затраты (долл. США/т чугуна) на десульфурацию чугуна различными процессами (по величинам средних показателей табл. 5)

№ №	Показатели затрат	Вдувание магния в смеси с известью	Вдувание зернистого магния одноканальной фурмой	Вдувание зернистого магния двухсопловой фурмой	KR-процесс, известь с плавиковым шпатом, перемешивание
		Табл. 5	Табл. 5	Табл. 5	Табл. 5
		№ варианта	1.6	2.4	2.11
1	2	3	4	5	6
1	На реагент:				
	– магний	1,302	1,200	1,173	–
	– известь молотая флюидизированная	0,674	–	–	–
	– известь порошковая рядового качества	–	–	–	0,969
	– известь кусковая и фракционированная	–	–	–	0,658
	– плавиковый шпат	–	–	–	0,186
	всего на реагент	1,976	1,200	1,173	1,813
2	На потери чугуна с дополнительным шлаком	0,848	0,160	0,149	2,488
3	На потери температуры чугуна	0,240	0,280	0,200	0,820
4	Огнеупорная фурма (или мешалка)	0,117	0,117	0,117	0,089
5	На удаление и утилизацию ковшевых шлаков	0,525	0,350	0,350	0,700
6	Расходы по переделу и прочие по обслуживанию установки	0,420	0,280	0,200	0,380
7	Итого затраты на десульфурацию, долл. США/т чугуна	4,126	2,387	2,189	6,290
8	Затраты в относительных единицах	1,88	1,09	1	2,87

Подводя итог приведенного анализа, необходимо подчеркнуть, что на основе средних значений большого массива промышленных данных показано, что наименьшие затраты характерны для технологии вдувания зернистого магния через двухсopловые фурмы, которые на 0,189 долл. США/чугуна меньше, чем при вдувании зернистого магния через одноканальную фурму, на 1,937 долл. США/т меньше, чем при вдувании магния в смеси с известью и на 4,101 долл. США/т чугуна меньше, чем при KR-процессе.

**Заключение.** Имеющиеся бoльшие массивы промышленных данных по внепечной десульфурации чугуна различными способами и реагентами на ряде металлургических предприятий многих стран позволяют оценить и сопоставить их технико-экономический уровень по средним величинам фактических параметров. Полученные по этим исходным данным показатели десульфурации чугуна тремя вариантами процессов – вдуванием извести в смеси с магнезиом (коинжекция), вдуванием зернистого магния без разубоживающих добавок и KR-процесс на основе извести и плавикового шпата.

Показано, что наименьшие затраты характерны для модернизированной технологии вдувания зернистого магния через двухсopловые фурмы. KR-процесс, использующие наиболее дешевые реагенты, сопровождается наибольшими затратами, которые практически в 3 раза больше, чем вдувание зернистого магния. Вдувание магния в смеси с известью занимает промежуточное положение – затраты при вдувании магния с известью в 2 раза больше чем при вдувании магния без разубоживающих добавок.

Кроме этого, для установки десульфурации чугуна зернистым магнезиом требуются наименьшие капитальные затраты.

1. *Большаков В.И., Шевченко А.Ф., Башмаков А.М.* Технология и оборудование десульфурации чугуна магнезиом в большегрузных ковшах. Наукова думка. Киев. 2011. – 207 с.
2. *Су Тянь Сен.* Развитие технологии предварительной обработки чугуна и её освоение в Китае. XII международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали. Сб. трудов. Сент. 2012 г. Вена/Австрия. Изд. Almamet. – С. 80–83.
3. *А.Н. Луценко, А.А. Немтинов, С.Д. Зинченко, С.В. Ефимов, Д.Е. Смирнов.* Опыт работы Череповецкого металлургического комбината по достижению ультранизкого содержания серы в чугуне с использованием крупнотоннажной установки десульфурации чугуна. Бюлл. «Черная металлургия», М., ОАО «Черметинформация». 2009. - С.61-63.
4. *Зборицки А.М., Куберский С.В., Довгалюк Г.Я.* и др. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300-тонных ковшах. Сталь. 2011. №9. – С. 16–18.
5. *Шевченко Т.Г., Несвет В.В., Писмарев К.Е.* и др. Десульфурация чугуна на сталеплавильном заводе ОАО «Алчевский металлургический комбинат» XII международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали. Сб. трудов. Сентябрь 2012 г. Вена/Австрия. – С. 80–83.

6. *Разработка* технологических решений и документации по переводу комплекса десульфурации чугуна МК ХОНГФА (Шаген) на обработку чугуна магнием без кальцийсодержащих добавок. Отчет ПКФ Раметалл по НИР. Хоздоговор РМ.01.06 от 03.01.2006 г. Днепропетровск, 2006 г. – 35 с.
7. *Отчетные* данные 229 контрольных промышленных обработок чугуна вдуванием (коинжекция) порошковой смеси магния с известью. Шаганский меткомбинат. КНР. Июнь, 2006. – 5 с.
8. *Отчетные* данные 384 промышленных (контрольных) продувок чугуна смесью извести с магнием в ковшах Ханданского меткомбината. Ханданский меткомбинат. КНР. Ноябрь, 2008. Danieli Corus. –11 с.
9. *Шевченко А.Ф., Александров В.А., Лю Дун Ие, Чжао Динь Юй.* Совершенствование технологии и оборудования десульфурации чугуна с заменой порошковой смеси извести с магнием на чистый гранулированный магний на Уханьском металлургическом комбинате. VII международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали. Сб. трудов. 26/27 сент. 2002 г. Аниф/Австрия. Изд. Almamet. – С. 27–34 (р. 25–28).
10. *Разработка* и освоение комплекса технологий десульфурации чугуна в 300-тонных заливочных ковшах сталъзавода № 3 Уханьского меткомбината. Отчет Института черной металлургии по НИР. Договор ВО.015.04 от 25.03.2004 г. Днепропетровск, 2005. – 95 с.
11. *Разработка* технологии, освоение параметров обработки и ввод в эксплуатацию УДЧ на Тонгхуанском меткомбинате. Отчет Института черной металлургии НАНУ по НИР. Договор ВО.0176.03. Днепропетровск, 2005. – 57 с.
12. *Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Баимаков А.М. и др.* Процесс десульфурации чугуна зернистым магнием с высокой интенсивностью его ввода. Сталь. 2013, № 1. – С. 9–13.
13. *Определение* рациональных условий диспергирования холодного магнийсодержащего двухфазного потока в расплаве чугуна при инъекционном ковшевом рафинировании. Отчет Института черной металлургии НАНУ по НИР ВО.001.09. № госрегистрации 0109U002445. Днепропетровск. 2011. – 132 с.
14. *Разработка* технологических решений для проектирования комплекса десульфурации чугуна и скачивания шлака в 300-тонных заливочных ковшах концерна CSC (Тайвань). Отчет Института черной металлургии НАНУ по НИР. Договор ВО.0190.10 от 15.03.2010 г. Днепропетровск. 2013. – 89 с.
15. *Разработка* технологии, принципиальных технических решений и основных технологических регламентов для комплекса десульфурации чугуна Дзилинского сталъзавода. Отчет ПФК «Раметалл» по НИР. Хоздоговор РМ.01.08 от 03.01.2008 г. Днепропетровск. 2011. – 93 с.
16. *Разработка* технологических рекомендаций и проектной технологической документации для проектируемого комплекса десульфурации чугуна и скачивания шлака в 100-тонных заливочных ковшах Тяньцзинь-Лянхэского меткомбината. Отчет Института черной металлургии НАН по НИР. Договор ВО.0194.10 от 01.12.2010 г. Днепропетровск. 2012. – 50 с.
17. *Ян Вэй Ван, Донг Ван, Фэй Ганн Лю.* Технология производства и технологический прогресс в освоении процессов десульфурации чугуна на предприятиях Shougang Qian'an Iron and Steel Co (Qian Steel), XII International Symposium desulphurization of hot metal and steel. Sept. 19–20. 2012. Viena/Austria. – P. 41–48.

18. Лю Чжао Юань, Суи Бин Дэн. Практические результаты и обсуждение процесса десульфурации чугуна на WUHAN Iron@Steel Corporation. XII международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали. Сент. 2012. Вена/Австрия. Изд. Almamet. – С.66–79.
19. Инь Жуй Ю. Отечественное сталеплавильное производство. Обзор состояния и развития технологий до 2010 г. // Международная научно-техническая конференция по выплавке и непрерывной разливке стали. Сб. докладов. Изд. Ассоциация сталеплавыльщиков КНР. Ханчжоу/КНР. 2008. – С.1–13.
20. Отчетные данные по серии 65 промышленных обработок чугуна известью KR-процессом в 100-тонных ковшах Хансинского меткомбината. Хайсин. КНР. Июнь 2055. – 2 с.
21. Отчетные данные контрольных промышленных обработок чугуна KR-процессом смесью извести с плавиковым шпатом в 300-тонных заливочных ковшах. Серия «А». Каосюн/Тайвань. Сталеплавильный завод № 2. 26 обработок, 2011. – 3 с.
22. Отчетные данные контрольных промышленных обработок чугуна KR-процессом смесью извести с плавиковым шпатом. Серия «В». Каосюн/Тайвань. Сталеплавильный завод № 2. 36 обработок, 2011. – 2 с.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляковым*

***А.Ф.Шевченко, І.О.Маначін, А.М.Шевченко, Б.В.Двоскін,  
О.С.Вергун, С.О.Шевченко, О.Л.Руденко, О.М.Башимаков, Л.П.Курілова***  
**Порівняльний аналіз техніко-економічних показників різних процесів позапічної десульфуратії чавуну**

Метою роботи є зіставлення техніко-економічних показників різних процесів позапічної десульфуратії чавуну. За фактичними промисловими даними 15 сталеплавильних заводів різних країн отримано середні технічні показники позапічної десульфуратії чавуну при використанні різних процесів. На базі цих вихідних даних розраховано витрати на десульфуратію чавуну при використанні найбільш поширених на даний час технологій десульфуратії. Показано, що найменші витрати характерні для процесу десульфуратії чавуну вдунанням зернистого магнію ( без розубоживаючих добавок) сопловою фурмою, що вдвічі менші, ніж при продувці сумішшю вапна з магнієм (коінжекція) і втричі менші, ніж KR - процес вапном і плавиковим шпатом.