

УДК 669.162.63

**А.Ф. Шевченко¹, И.А. Маначин^{1,2}, Б.В. Двоскин¹, А.М. Башмаков³, А.С. Вергун¹,
В.Г. Кисляков¹, С.А. Шевченко¹**¹Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины²Украинский государственный университет науки и технологий³ТИТАНПРОЕКТ

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ КОВШЕВОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТОВ И ИХ ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА

Обоснована необходимость комплексного подхода к оценке и выбору технологии внепечной десульфурации чугуна. Показано, что одним из основных параметров и показателей является расход реагента, определяющий все основные показатели процесса. Сравнительный анализ показателей таблицы 1 свидетельствует также о том, что при KR-процессе увеличение массы чугуна в ковше снижает эффективность десульфурации, так как переход от ковшей с массой чугуна 80 и 100 т к большим ковшам (260 т) сопровождается уменьшением удельной степени десульфурации. Удаление увеличивает расход реагента на единицу удаленной серы. Значительные удельные расходы реагентов (вплоть до 8-17 кг/т чугуна) и длительность перемешивания (вплоть до 8-20 мин), а также цикла – до 25-68 мин, что обуславливает ощутимые потери температуры чугуна – в среднем 40-42 °С, а в ряде режимов десульфурации – вплоть до 92-128 °С. Обусловлено это тем, что с увеличением массы чугуна ухудшаются массообменные процессы между шлаком и жидким чугуном ковша. Наибольший удельный расход реагентов в KR-процессе определил в результате наибольшие затраты при реализации этого процесса. Наименьшие удельные издержки при моноинжекции магния обуславливают наименьшие издержки при промышленном освоении этого процесса. Фактические показатели промышленных продувок свидетельствуют об о. что моноинжекция зернистого магния характеризуется наименьшими затратами реагентов – в среднем 0,42-0,55 кг/т чугуна, наименьшей продолжительностью операции десульфурации – в среднем 5,5-7,7 мин и в то же время обеспечением вплоть до супер глубокой десульфурации чугуна – до 0,0003-0,001 %, степенью десульфурации - до 99%, высокой интенсивностью удаления серы - в среднем 12-14,4 %/мин., высокой степенью усвоения реагента - в среднем 75-92 %. Представленные фактические данные по технологии применены KR-процессы (CaO + CaF₂), коинжекции извести с магнием (CaO + Mg) и моноинжекции зернистого магния по украинской технологии вдувания. Расходы при десульфурации процессами KR – коинжекция – моноинжекция находятся в соотношении 3:2:1. Обосновано преимущество инъекционных процессов десульфурации чугуна.

DOI: 10.34185/0543-5749.2021-3-56-73

Введение

Необходимость улучшения технико-экономических показателей выплавки чугуна и стали [1-5], а также активно возросшая потребность различных отраслей промышленности в применении низкосернистой продукции [1-6, 8, 9, 11, 14-17, 21] предопределили использование на

многих металлургических предприятиях технологий и средств для удаления серы, в т.ч. внепечную десульфурацию чугуна в ковшах [1-6, 8, 9, 11, 13-17, 19, 21]. В последние годы потребители обессеренного чугуна ужесточили требования к процессу десульфурации в направлениях:

1. Обеспечения получения значительной

части чугуна с содержанием серы $\leq 0,005$ %, в т.ч. особо чистого по сере ($\leq 0,001-0,002$ % серы).

2. Существенного сокращения продолжительности цикла операций по внепечной подготовке чугуна – вплоть до ≤ 20 мин для обеспечения режима работы «плавка на плавку».

3. Снижение потерь температуры жидкого чугуна.

4. Уменьшение потерь чугуна как со шлаком, так и от других факторов.

5. Уменьшение материало-энергетических затрат при эксплуатации и себестоимости десульфурации чугуна.

6. Обеспечение наименьших капитальных затрат на создание комплекса десульфурации чугуна и очищения его от шлака.

7. Гарантирование стабильной надежности (до 90 % и более) технологии и оборудования в промышленном режиме эксплуатации.

Анализ мирового опыта внепечной десульфурации чугуна [1-6, 8, 11, 14-17, 20-22] показывает, что наиболее приоритетными и применяемыми в настоящее время являются 3 технологических процесса:

1. Моноинжекция зернистого магния.

2. Коинжекция извести и магния.

3. KR-процесс с засыпкой извести и плавикового шпата с последующим механическим перемешиванием мешалкой.

Эти технологии во многом отвечают современным требованиям, но не всем.

Цель. Для объективной технико-экономической оценки этих 3-х технологий десульфурации чугуна был выполнен комплекс всесторонних исследований показателей внепечной обработки чугуна в одинаковых и равноценных условиях рафинирования по 2-м группам ковшей - с массой чугуна 80-120 т и более 200 т (большегрузные ковши).

Результаты и их обсуждение

KR-процесс ($CaO+CaF_2$). Показатели обработки чугуна KR-процессом в ковшах с массой чугуна 80, 100 и 260 т представлены в таблице 1. Следует обратить внимание на то, что применение KR-процесса сопровождается обязательным предварительным скачиванием ковшевого исходного шлака, наличие которого (в ковше) сопровождается очень сильным снижением (в 2-2,5 раза) эффективности десульфурации и нестабильностью результатов (рис. 1).

Из таблицы 1 также следует, что содержание серы в чугуне при KR-процессе (с применением

извести и плавикового шпата) может быть снижено вплоть до $\leq 0,001-0,002$ %, но при этом (таблица 1) удельный расход смеси $CaO+CaF_2$ может достигать 8,9-17,8 кг/т чугуна при продолжительности цикла операций до 52-68 мин.

Необходимость увеличения количества удаляемой серы сопровождается увеличением удельных расходов реагентов (рис. 2 и рис. 3), а также увеличением продолжительности перемешивания чугуна в ковшах (рис. 3).

Значительные удельные расходы реагентов (вплоть до 8-17 кг/т чугуна) и продолжительность перемешивания (вплоть до 8-20 мин), а также цикла – до 25- 68 мин. Обуславливают ощутимые потери температуры чугуна – в среднем 40- 42 °С (табл. 1), а в ряде режимах десульфурации - вплоть до 92-128 °С.

Сопоставительный анализ показателей таблицы 1 свидетельствует также о том, что при KR-процессе увеличение массы чугуна в ковше снижает эффективность десульфурации, так как переход от ковшей с массой чугуна 80 и 100 т к большим ковшам (260 т) сопровождается уменьшением удельной степени десульфурации, интенсивности удаления серы, увеличивает расход реагента на единицу удаленной серы. Обусловлено это тем, что с увеличением массы чугуна ухудшаются массообменные процессы между шлаком и жидким чугуном ковша. Поэтому с увеличением глубины ванны необходимо увеличить интенсивность перемешивания рафинируемой ванны.

Степень десульфурации чугуна при KR-процессе может быть обеспечена очень высокая – вплоть до 99,5 % (табл. 1).

Подтверждается такой недостаток KR-процесса как большое дополнительное шлакообразование, что приводит к большим потерям чугуна - вплоть до 13,8 кг/т рафинируемого чугуна (табл. 1).

Таким образом, KR-процесс характеризующийся своей внешней простотой и возможностью обеспечения очень низкого содержания серы в чугуне (вплоть до $\leq 0,001-0,002$ %) является очень материало-энергозатратным вариантом внепечной десульфурации чугуна. Кроме этого капитальные затраты и амортизация у комплекса KR в 2 раза больше чем у других процессов внепечной десульфурации.

Коинжекция извести в смеси с магнием. К одним из наиболее применяемых процессов ковшевой десульфурации чугуна является коинжек-

ция молотой извести в смеси с магнием через погружаемую фурму. Его активное распространение обусловлено необходимостью увеличения обессеривающей способности извести и вместе с этим неумением металлургов всех стран (кроме Украины) рационально и надежно вводить чугун в магний.

Коинжекцию магния в смеси с известью применяют в основе в ковшах с массой чугуна более 80 т, а содержание магния во вдуваемой смеси составляет в основе около 20 %. Данные, характеризующие показатели десульфурации чугуна в ковшах с массой чугуна 110, 180 и 220 т представлены в таблице 2, из которой следует, что коинжекция смеси CaO и Mg также обеспечивает снижение серы в чугуне вплоть до 0,001 %, но при меньших расходах реагентов (в

сравнении с KR-процессом). Продолжительность операции ввода (вдувания) реагентов, как правило, не превышает 15-16 мин., что сопровождается меньшими потерями температуры чугуна. Поэтому коинжекция смеси CaO и Mg связана с меньшими (в сравнении с KR) материальными и энергетическими затратами, имеет более сложную структуру оборудования, систем автоматизации и управления. При оценке процесса коинжекции необходимо учитывать, что балансовое соотношение извести и магния равно не 4:1, а 6:1, т.е. извести расходуется больше, чем публикуется в литературе, так как 2 части извести (по отношению магнию) расходуется в период погружения и подъема фурмы из чугуна [7,10]. Эта мера осуществляется для сохранения чистоты (от заметаливания) канала фурмы.

Таблица 1. Основные показатели (по фактическим данным) десульфурации KR-процессом (CaO+CaF₂) в различных ковшах

№ п/п	Параметр, показатель	Хайсинский меткомбинат (КНР)	Циндаоский меткомбинат (новый сталзавод), КНР	Корпорация CSC, сталзавод № 2 (Тайвань)
1	Масса чугуна в ковшах, т	<u>64,3–86,8</u> 79	<u>98,1–107,6</u> 101	<u>238,4–270,4</u> 251,4
2	Глубина ванны чугуна, м	около 2,7	<u>2,8–3,0</u> 2,9	<u>3,3–3,8</u> 3,4
3	Высота "свободного борта", м	около 0,8	<u>0,6–1,0</u> 0,75	<u>0,8–1,1</u> 0,9
4	Расход загружаемой в ковш известьсодержащей смеси (q _p), кг/т	<u>3,4–8,9</u> 5,1	<u>2,0–17,8</u> 6,8	<u>4,5–11,4</u> 7,6
5	Длительность перемешивания чугуна, мин.	около 8,4	<u>6–13</u> 8,5	<u>12,5–20,8</u> 17,9
6	Продолжительность цикла операции обработки, мин.	н/д	<u>25–52</u> 36	<u>28–68</u> 35
7	Содержание серы в чугуне, %			
	– исходное [S] _{нач.}	<u>0,017–0,062</u> 0,035	<u>0,024–0,0112</u> 0,059	<u>0,0064–0,0420</u> 0,0217
	– после десульфурации [S] _{кон.}	<u>0,001–0,034</u> 0,010	<u>0,001–0,035</u> 0,009	<u>0,0002–0,0190</u> 0,0041
8	Температура чугуна, °C			
	– исходная	<u>1217–1394</u> 1327	<u>1316–1441</u> 1383	н/д
	– после обработки	<u>1175–1341</u> 1286	<u>1227–1412</u> 1343	<u>1200–1371</u> 1290
	– ΔT _ч	<u>15–92</u> 42	<u>21–128</u> 40	н/д
9	Степень десульфурации чугуна, %			
	– итоговая (Ст. D), %	<u>28–97</u> 72	<u>33–99</u> 85	<u>32–99,5</u> 78,4
	– удельная D (Ст. D/q _p), %/кг/т	<u>8,5–19,9</u> 14,1	<u>5,5–20</u> 12,5	<u>4,8–19,4</u> 10,3
10	Интенсивность десульфурации Ст. (D/τ _{перем.}), %/мин.	85	<u>4,4–15,1</u> 10,0	<u>2,0–7,5</u> 4,4

Продолжение табл. 1

№ п/п	Параметр, показатель	Хайсинский меткомбинат (КНР)	Циндаоский меткомбинат (новый сталзавод), КНР	Корпорация CSC, сталзавод № 2 (Тайвань)
11	Удельный расход реагента на серу удаленную ($q_p/\Delta S \cdot 10$), кг/кг	20,5	13,6	43,2
12	Скорость снижения температуры чугуна ($\Delta T_{ч}/\tau_{перем}$), °С/мин	5,3	$\frac{3,5-11,1}{4,7}$	н/д
13	Количество шлака, удаленного из ковша перед обработкой:			
	– удельное ($q_{шл}$), кг/т чугуна	$\frac{3,75-4,12}{25}$	$\frac{3,0-46,0}{18}$	н/д
14	Количество дополнительно образующегося шлака в ковше:			
	– общее количество шлака ($Q_{шл}$), т/ковш	$\frac{0,54-1,42}{0,82}$	$\frac{0,4-3,5}{1,16}$	$\frac{2,25-5,71}{3,80}$
	– удельное ($q_{шл}$), кг/т чугуна	$\frac{6,8-17,8}{10,2}$	$\frac{4,0-35,6}{11,6}$	$\frac{9,0-22,8}{15,2}$
15	Потери чугуна:			
	– со скачиваемым шлаком перед десульфурацией чугуна, кг/т чугуна	$\frac{1,12-12,36}{7,5}$	$\frac{0,9-13,8}{5,4}$	7,6
16	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком (при десульфурации) и его скачивании, кг/т чугуна	$\frac{4,08-10,68}{6,12}$	$\frac{2,4-21,36}{6,96}$	7,6
17	Суммарные потери чугуна с образующимся и удаленным ковшевым шлаком при KR-процессе, кг/т чугуна	$\frac{5,57-27,16}{15,87}$	$\frac{3,6-39,7}{14,18}$	около 15

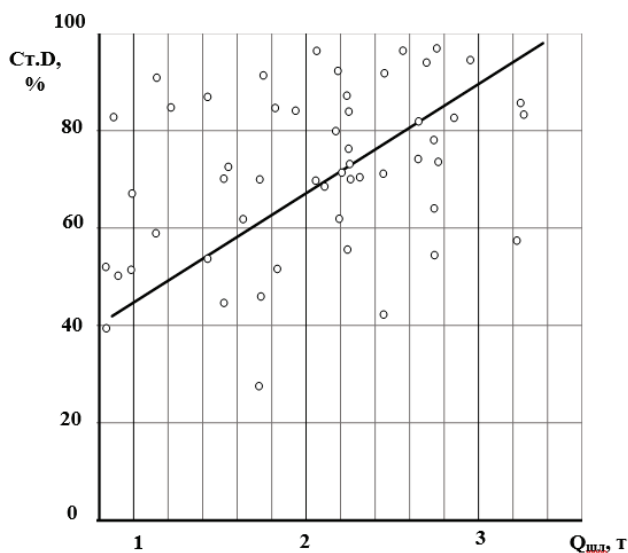


Рис. 1. Влияние количества предварительно удаленного из ковша шлака ($q_{шл}$) на степень десульфурации (Ст.Д) чугуна. Хайсинский меткомбинат. Процесс KR ($CaO+CaF_2$). Масса чугуна в ковше около 80 т

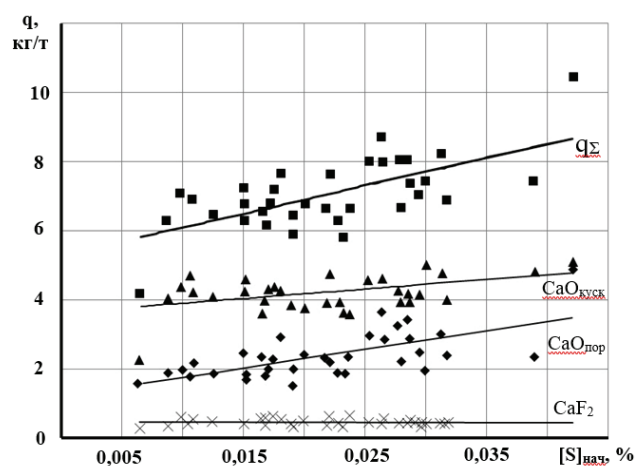


Рис. 2. Изменение расхода реагентов (q_p) при различном исходном ($[S]_{исх}$) в чугуне при KR-процессе на Циндаоском меткомбинате. Конечная сера 0,004 %. Масса чугуна в ковшах 100 т: ×- CaF_2 ; ◆- CaO_p порошковой; ▲- CaO_k кусковой; ■- всего реагентов

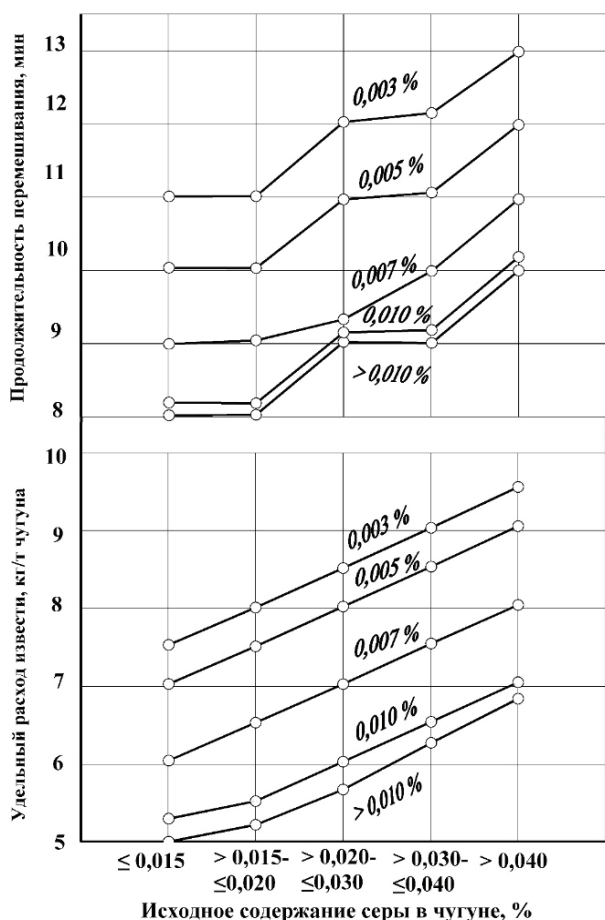


Рис. 3. Удельные расходы реагентов (кг/т чугуна) и продолжительность перемешивания (мин) при различном исходном и конечном содержании серы в чугуна. KR-процесс в заливочных ковшах (260 т чугуна) сталзавода № 2 концерна CSC (Тайвань). Данные по технологическому регламенту

На рис. 4 представлена, полученная нами номограмма зависимости удельного расхода магния (вдуваемого в чугун, коинжекцией с известью в 250-тонные заливочные ковши ДМКД) от исходного содержания серы и заданного конечного (цифры у линий номограммы). Видна четкая закономерность увеличения расходов магния (соответственно и извести) с повышением исходной серы в чугуна и снижения конечного её значения. Линии функций на диаграмме расположены весьма близко одна от другой, что можно объяснить участием извести в десульфурации чугуна.

Проведенные нами специальные исследования (на промышленных ковшах) позволили нам заключить, что при вдувании смеси магния с из-

вестью, оксид кальция также участвует в реакциях взаимодействия с серой чугуна. Следовательно, добавляемый к извести магний не только взаимодействует с серой, но и выполняет функцию восстановителя, активизируя известь и участвует в реакции взаимодействию 15 % CaO с серой чугуна. По результатам этих исследований сделано заключение в том, что при вдувании смеси CaO и Mg около 30-40 % удалённой серы взаимодействует с оксидом кальция. Таким образом по этой технологии магний «работает» как десульфуратор, так и восстановитель.

Моноинжекция зернистого магния (без разубоживающих добавок). Современный технологический процесс ковшевой десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния по украинской разработке является новым технологическим решением [11], в котором ликвидированы ранее имевшиеся недоработки и недостатки.

Первым отличием является, прежде всего, обеспечение исключительной регулируемости, устойчивости и надежности дозируемой подачи в жидкий чугун. Системы дозирования и вдувания магния обеспечивают исключительно высокое парциальное давление магния в реакционной зоне, чем достигаются благоприятные условия для растворения магния в чугуна и реализации наиболее оптимального механизма его взаимодействия с серой чугуна.

С учетом переменных и нестабильных исходных условий в ковше по шлаку, предусмотрена выборочная корректировка состава шлака добавкой фракционированных материалов из отходов металлургического производства в небольшом количестве – около 1 кг/т чугуна.

Для исключения попадания образующегося после продувочного шлака в конвертер предусмотрены высокомеханизированные с дистанционным управлением стенды скачивания шлака и продувки чугуна азотом в период скачивания.

Параметры технологического процесса и компоновка установки десульфурации позволяет обеспечить самую большую пропускную способность установки - вплоть до 4 ковшей за 1 час.

Процесс моноинжекции зернистого магния проверен в промышленных условиях на ковшах с массой чугуна от 2-3 т до 350 т. В таблице 3 представлены показатели промышленного применения моноинжекции зернистого магния в ковшах с массой чугуна 100, 150 и 260 т.

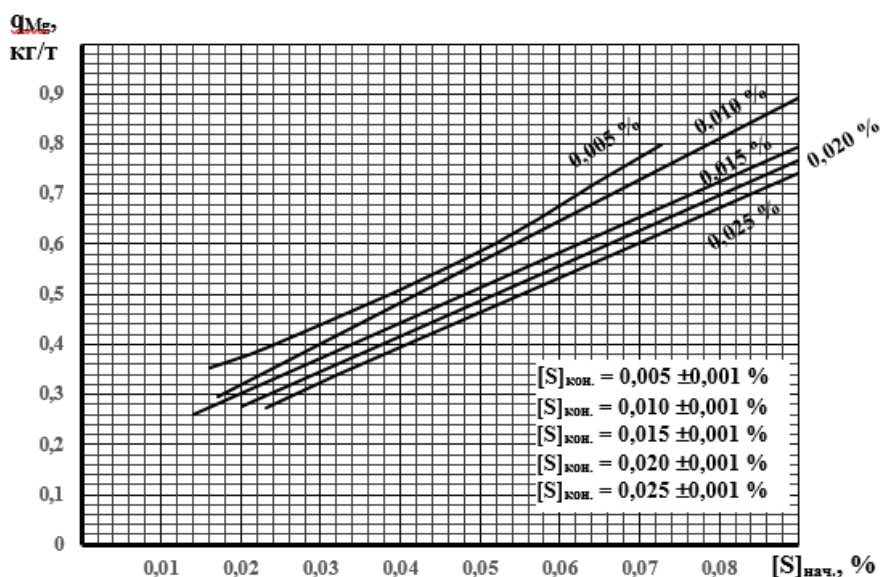


Рис. 4. Залежність удельного расхода (q_{Mg}) від вихідного ($[S]_{исх}$) та кінцевого (цифри і ліній) вмісту сірки в чугуні при коінжекції вапна в суміші з магнієм. Маса чугуна в ковшах 220 т. (ПАО «ДМК»)

Таблиця 2. Показатели десульфурации чугуна коінжекцією суміші вапна і магнію в ковшах різного типу розміру

№№	Показатели	Шаганский МК	Ханданский МК	ПАО «ДМК»
1	Масса чугуна в ковшах, т	178	108	223
2	Расход реагентов, кг/т чугуна:			
	- магния	0,43	0,443	0,51
	- известь на вдувание Mg	0,62	2,27	2,00
	- известь всего	1,30	2,59	„07
	- реагентов всего	1,73	3,08	3,58
3	Содержание серы в чугуне, %	<u>0,006-0,062</u>	<u>0,006-0,056</u>	<u>0,017-0,047</u>
	- $[S]_{исх}$	0,027	0,030	0,054
	- $[S]_{кон}$	<u>0,001-0,047</u> 0,009	<u>0,001-0,041</u> 0,016	<u>0,003-0,110</u> 0,025
4	Температура чугуна:			
	- исходная	1345	1323	1272
	- после обработки	1330	н/д	1263
	- Δt	15	н/д	10
	- $\Delta t/\tau$, °C/мин	1,1	н/д	0,82
5	Показатели десульфурации:			
	- Ст. D (степ. десу.), %	66,7	57,9	56,2
	- D_{Mg} (Ст. D/ q_{Mg})	15,6	13,3	11,0
	- Ст. D/ $\tau_{прод.}$, %/мин	3,9	н/д	4,6
	- β_{Mg} ($q_{Mg}/\Delta[S]$)	2,4	2,01	1,6
	- $\beta_{реак.}$, кг/кг	9,7	14,0	11,2
6	$\tau_{прод.}$ длительности продувки	14	н/д	12,2
7	Интенсивность вдувания реагентов в чугун, мин.:			
	- магния	5,5	н/д	9,4
	- извести	8,0	н/д	36,6
8	Дополнительно образуется шлака, кг/кг чугуна	3,46	6,16	7,16

Продолжение табл. 2

№№	Показатели	Шаганский МК	Ханданский МК	ПАО «ДМК»
9	Потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком, кг/кг чугуна	1,75	3,10	3,6
10	Степень усвоения магния на серу, (K_{Mg}^S), %	31,8	37,7	47,7
11	Содержание серы в стали, %	н/д	н/д	0,031

Примечание: в числителе – средние значения, (K_{Mg}^S) – по всем предприятиям, в знаменателе – средние значения без учета Алчевского меткомбината.

Таблица 3. Показатели десульфурации чугуна моноинжекционного зернистого магния на различных предприятиях в ковшах различного типоразмера

№№ п/п	Показатели	Баотоский меткомбинат (КНР)	Тонхуанский меткомбинат (КНР)	Корпор. CSC, сталзавод №2 (Тайвань)
1.	Масса чугуна в ковшах, т	<u>92–103</u> 97	<u>139–156</u> 140	<u>246–273</u> 233
2.	Удельный расход магния, кг/т чугуна	<u>0,32–1,08</u> 0,53	<u>0,32–0,74</u> 0,55	<u>0,28–0,67</u> 0,42
3.	Продолжительность вдувания магния ($\tau_{ед.}$), мин.	<u>5,0–15,5</u> 7,1	<u>3,8–7,7</u> 5,5	<u>4,7–11,8</u> 7,7
4.	Содержание серы в чугуне, %: – исходное – конечное	<u>0,021–0,096</u> 0,041 <u>0,001–0,020</u> 0,005	<u>0,015–0,050</u> 0,030 <u>0,003–0,005</u> 0,002	<u>0,015–0,061</u> 0,029 <u>0,001–0,006</u> 0,0029
5.	Температура чугуна, °С: – исходная – после вдувания – Δt (разница)	<u>1223–1363</u> 1300 <u>1197–1357</u> 1285 <u>0–30</u> 15	<u>1287–1386</u> 1335 <u>1275–1374</u> 1326 <u>2–17</u> 9	<u>1263–1394</u> 1327 <u>1257–1388</u> 1319 <u>4–31</u> 8
6.	Скорость снижения температуры чугуна при вдувании зернистого магния, °С/мин.	<u>0,1–2,0</u> 0,9	<u>0,1–0,9</u> 0,6	<u>0–1,0</u> 0,5
7.	Интенсивность вдувания магния, кг/мин.	<u>3,5–9,0</u> 7,3	<u>10–20</u> 14,4	<u>16–16</u> 16
8.	Показатель β (расход магния на серу удаленную), кг/кг	<u>1,05–3,45</u> 1,64	<u>1,3–3,6</u> 2,2	<u>1,1–3,5</u> 1,8
9.	Ст. D, % (степень десульфурации итоговая)	<u>63–98</u> 86	<u>86–99</u> 93	<u>67–97</u> 90
10.	D (удельная степень десульфурации – СтD на 0,1 кг/т магния), %	<u>9–27</u> 17	<u>11,8–28,1</u> 17,6	<u>14,1–29,8</u> 22,5
11.	$D_t = \text{Ст. D} : \tau$ (интенсивность удаления серы), %/мин.	<u>н.д.</u> 12	<u>11,2–23,7</u> 14,9	<u>н.д.</u> 12,8
12.	K_{Mg}^S – степень усвоения магния на серу, %	<u>22,1–72</u> 50	<u>21–57</u> 39	<u>21,6–70,5</u> 47,4
13.	K_{Mg}^{S+Mg} – степень усвоения магния на серу удаленную и магниевый остаточный в чугуне, %	<u>42–99</u> 75	<u>69–99</u> 80	<u>74–99</u> 92

Фактические показатели промышленных продувок свидетельствуют о том, что моноинжек-

ция зернистого магния характеризуется наименьшими расходами реагентов – в среднем 0,42-

0,55 кг/т чугуна, наименьшей продолжительностью операции десульфурации – в среднем 5,5-7,7 мин и в то же время обеспечением вплоть до супер глубокой десульфурации чугуна – вплоть до 0,0003-0,001 %, степенью десульфурации – до 99 %, высокой интенсивностью удаления серы – в среднем 12- 14,4 %/мин., высокой степенью усвоения реагента – в среднем 75– 92 %.

Обращает на себя внимание то, что моноинжекция магния сопровождается наименьшим дополнительным шлакообразованием и соответственно потерями чугуна с этим шлаком.

На рис. 5 представлена диаграмма изменения удельного расхода магния в зависимости от $[S]_{исх.}$ для двух инъекционных процессов – моноинъекции магния и коинъекции магния в смеси с флюидизированной известью, из которой следует, что в случае коинъекции магния в смеси с известью (при всех прочих равных условиях) удельный расход магния больше на 0,1 кг/т чугуна, чем при моноинъекции.

При этом следует обратить внимание на то, что суммарный расход реагента при коинъекции смеси в 6–7 раз больше расхода магния, так как итоговое соотношение магния к извести при процессе коинъекции составляет 1:6 [10], что связано с тем, что при этой технологии погружение и подъем фурмы из чугуна производят с подачей извести (препятствуя заметалливанью канала фурмы).

Сопоставляя комплекс показателей в таблицах 1, 2 и 3 видим, что процесс моноинъекции магния (по технологии ИЧМ) [11] является наиболее материало-энергоэкономным технологическим решением. На основании фактически полученных данных выполнено технико-экономическое сопоставление показателей десульфурации чугуна тремя технологиями для двух групп ковшей – с массой чугуна 80–110 т и 220–260 т (таблицы 4 и 5). При оценке затрат приняты средние величины цен на мировом рынке по состоянию на 2021 г.

Полученные номограммы зависимости фактического удельного расхода магния от исходного и заданного конечного содержания серы для 2-х групп ковшей представлены на рис. 6 и 7. Сопоставляя эти данные с показателями таблиц 1 и 2, а также рис. 3 и 5, получаем, что коинжекция–KR-процесс связан с наибольшим расходом обессеривающих реагентов, а моноинжекция

магния – с наименьшим потреблением реагента.

Сопоставление материало- энергопотребления и затрат при десульфурации чугуна 3-мя применяемыми технологиями представлено в таблицах 4 (ковшей с массой чугуна 80-110 т) и таблице 5 (для большегрузных ковшей). Анализ свидетельствует о том, что основным базовым параметром при ковшевой десульфурации является показатель удельного расхода реагента.

С увеличением этого параметра возрастает шлакообразование в ковше, продолжительность процесса собственно десульфурации, а также тепловые потери рафинируемого чугуна. Указанное сопровождается увеличением затрат на реагенты, на потери чугуна с ковшевым шлаком и на компенсацию потерь температуры чугуна.

В итоге получается, что KR–процесс (применяющий наиболее дешевые реагенты) имеет самые большие затраты, а моноинжекция зернистого магния (применяющая весьма дорогой реагент) благодаря высокой степени усвоения его расходует наименьшее его количество, в итоге получается самым дешевым и малозатратным способом десульфурации.

Изложенное относится к варианту моноинъекции зернистого магния (по технологии ИЧМ) и не включает практику моноинъекции магния по техническим решениям Пекинского института металлургического оборудования, так как последний вариант реализует нерациональный механизм и неблагоприятные условия ввода магния в чугун и его взаимодействия с серой чугуна.

Следует также обратить внимание, что KR–метод (в отличие от инъекционных) имеет весьма продолжительный цикл обработки – 40 мин и более, что не позволяет вписать его в цикл работы конвертера. По этим причинам на каждый конвертер необходимо более одного KR–стенда.

Подводя итог результатов исследований и анализа, необходимо заключить, что моноинжекция зернистого магния является приоритетным и наиболее экономичным процессом внепечной десульфурации чугуна. Затраты на его реализацию меньше на 2,50-5,88 доллара на каждой 1 т обработанного чугуна. Кроме этого капитальные затраты на установку десульфурации моноинжекцией магния в 1,3-2,0 раза меньше, чем по другим технологиям.

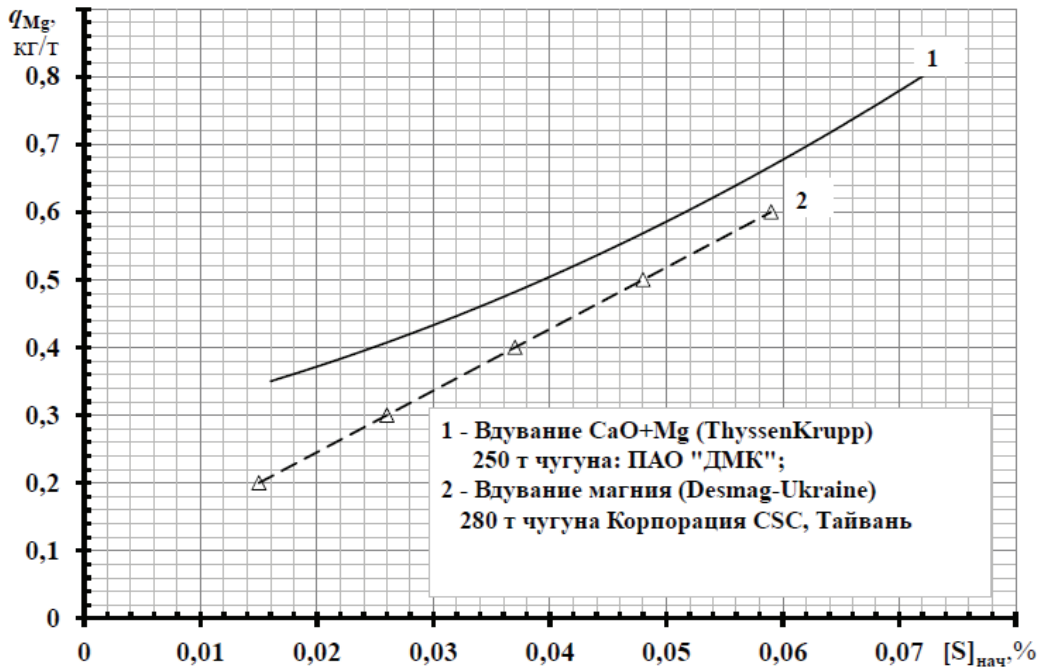


Рис. 5. Удельные расходы магния (q_{Mg}) в зависимости от исходной серы ($[S]_{исх.}$) при снижении серы в чугуне до 0,005 %. Масса чугуна в ковшах 220–260 т:
1 – моноинжекция магния; 2 – коинжекция магния в смеси с флюидизированной известью

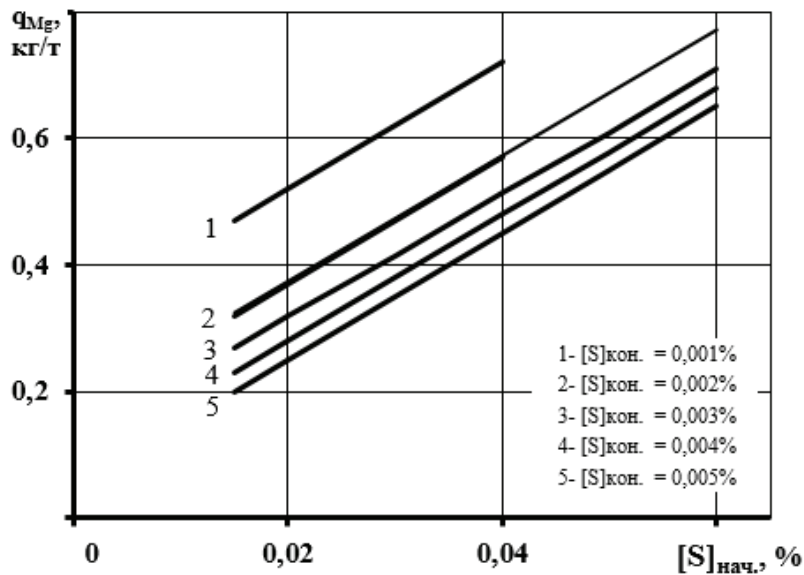


Рис. 6. Зависимость удельного расхода магния (q_{Mg}) от исходного содержания серы ($[S]_{исх.}$) в чугуне при заданном содержании серы (цифры у линий) при моноинжекции магния. Масса чугуна в ковше 200–350 т

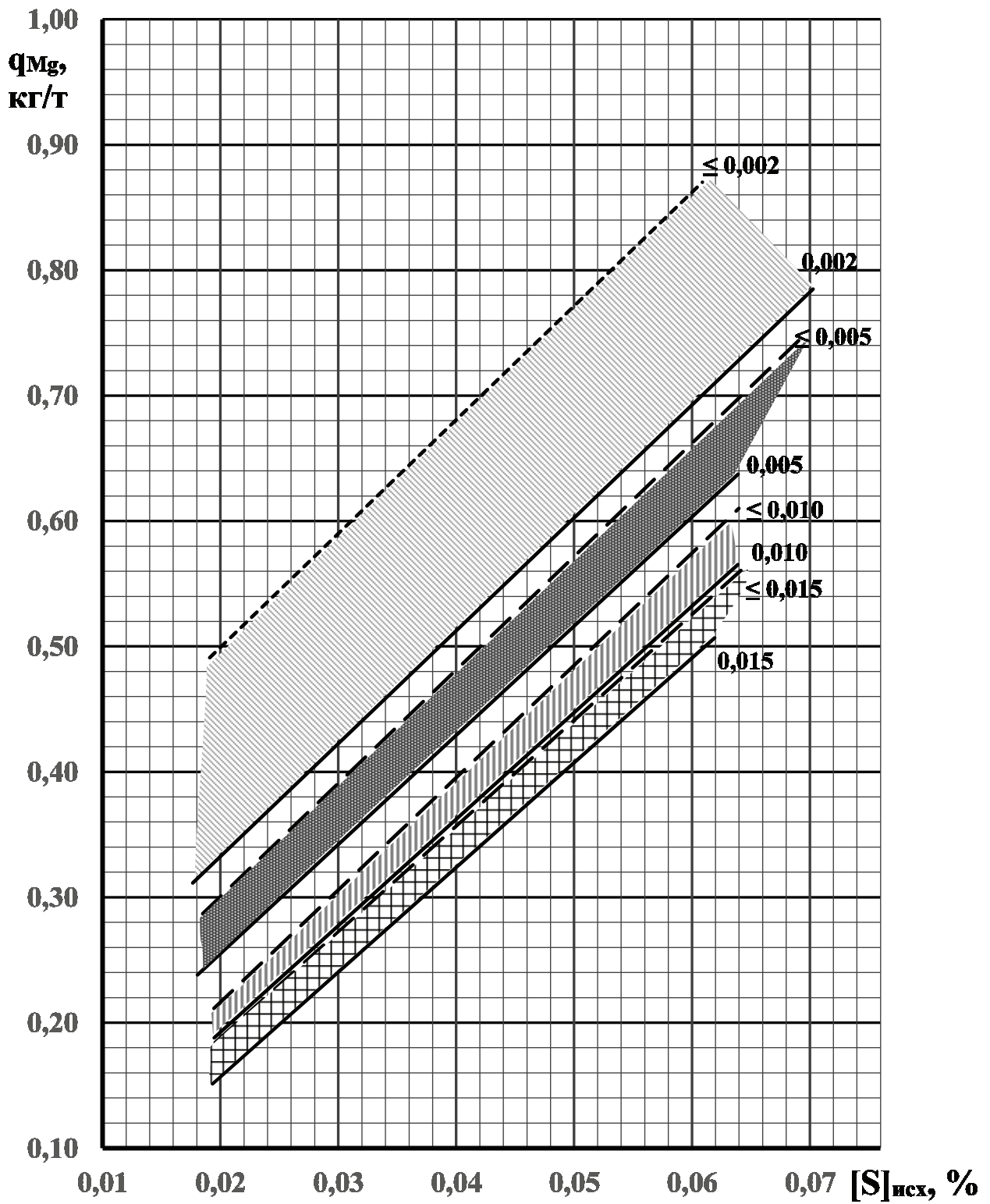


Рис. 7. Зависимость удельного расхода магния (q_{Mg}) от исходного ($[S]_{исх}$) и заданного конечного ($[S]_{кон}$) (цифры у линий) содержания серы в чугуна в ковшах с массой чугуна 140 т

Таблиця 4. Матеріало- енергопотребление и затраты при десульфурации чугуна различными технологиями в ковшах с массой чугуна 90–110 т. Сера исходная 0,040 %, после десульфурации 0,005 %

№№ п/п	Показатели	KR–процесс (CaO+CaF ₂), Хайсин МК	Коинжекция (CaO+Mg), Хандан МК	Моноинжекция зернистого Mg, Баото МК
1.	Масса чугуна в ковшах, т	80	110	97
2.	Удельный расход реагентов, кг/т чугуна:			
	– известь металлургическая	7,8	–	–
	– известь флюидизированная	–	3,3	–
	– плавиковый шпат	0,6	–	–
	– магний	–	0,55	0,49
	– корректиров. шлак	–	–	1,0
	Итого реагентов, кг/т чугуна	8,4	3,85	1,49
3.	Показатель β – расход обессеривающих реагентов, на серу удаленную, кг/кг.	24,00	11,00	1,40
4.	Продолжительность операции вдувания (перемешивания) реагентов, мин.	8,5	8	6,0
5.	Потери температуры чугуна за период десульфурации, °С	42	11	6
6.	Дополнительное шлакообразование в ковше, кг/т чугуна	16,8	7,6	3,0
7.	Предварительное скачивание шлака из ковша:			
	– продолжительность, мин.	6–9	не требуется	не требуется
	– потери чугуна, кг/т чугуна	7	–	–
8.	Потери чугуна с дополнительным шлаком, кг/т чугуна	8,4	3,9	1,40
9.	Основные затраты на десульфурацию чугуна, дол./т чугуна:			
	а) на реагент	1,32	3,14	1,77
	б) на потери чугуна с предварительно скачиваемым шлаком	1,75	–	–
	в) на потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком	2,10	0,94	0,35
	г) на компенсацию потерь температуры чугуна	0,84	0,22	0,12
	д) на сменные фурмы и	0,09	0,12	0,12
	е) на скачивание шлака и его перевозки	0,80	0,53	0,26
	ж) Расходы по переделу	0,30	0,42	0,20
	Итого затраты на десульфурацию, дол./т чугуна	7,20	5,42	2,92
10.	Превышение затрат в сравнении с моноинжекцией магния, дол./т чугуна	4,28	2,5	0
11.	Соотношение затрат	2,47	1,86	1

Примечание. В расчетах приняты цены материалов на мировом рынке по состоянию на 2021 г.

Таблиця 5. Матеріало-енергопотребление и затраты при десульфурации чугуна различными процессами в ковшах с массой чугуна 220–260 т

№№ п/п	Показатели	KR– процесс (CaO+F ₂). Корп. CSC (Тайвань)	Коинжекция (CaO+Mg), ДМК (Украина)	Моноинжекция Mg, Корп. CSC (Тайвань)
1.	Масса чугуна в ковшах, т	260	225	260
2.	Удельные расходы реагентов, кг/т чугуна:			
	– известь металлургическая	9,5	–	–
	– известь порошковая молотая	2,0	–	–
	– известь молотая флюидизированная	3,12	–	–
	– плавиковый шпат	0,5	–	–
	– магний зернистый	–	0,52	0,43
	– отходы CaO–содержащ.	–	–	1,0
	Всего реагентов	12,0	3,64	1,43
3.	Показатель β – расход реагентов, на серу удаленную, кг/кг	34,3	10,4	1,25
4.	Продолжительность операции вдувания реагентов (или перемешивания), мин.	12,0	12,5	6,5
5.	Потери температуры чугуна за период десульфурации, °С	42	12	8
	Дополнительное шлакообразование в ковше, кг/т чугуна	24,0	7,28	3,8
7.	Потери чугуна, кг/т чугуна:			
	– с предварительно скачиваемым шлаком	7	–	–
	– с дополнительно образующимся шлаком	12,0	3,62	1,43
8.	Основные затраты на десульфурацию чугуна, дол./т чугуна:			
	а) на обессеривающие реагенты	1,95	3,44	1,51
	б) на потери чугуна с предварительным скачиванием шлака	1,75	–	–
	в) на потери чугуна с дополнительно образующимся шлаком	3,00	0,91	0,35
	г) на компенсацию потерь температуры чугуна	0,84	0,24	0,16
	д) на огнеупорные фурмы	0,09	0,12	0,12
	е) на скачивание шлака (после десульфурации) и его перевозку	0,70	0,52	0,35
	ж) расходы по переделу	0,30	0,42	0,20
	Итого затрат на десульфурацию, дол./т чугуна	8,63	5,65	2,75
9.	Превышение затрат в сравнении с моноинжекцией магния, дол./т чугуна	5,88	2,90	–
10.	Соотношение затрат	3,14	2,05	1

Выводы

При анализе экономики выплавки чугуна и стали, а также выбора процесса внепечной десульфурации чугуна необходим всесторонний и комплексный подход в оценке анализируемых процессов. Именно такой подход позволил установить, что применение KR–процесса ($\text{CaO}+\text{CaF}_2$), использующего наиболее дешевые и недефицитные материалы, сопровождается наибольшими капитальными и эксплуатационными затратами.

Фактические данные промышленного применения различных процессов ковшевой десульфурации чугуна (KR–процесса, коинжекции извести и магнезия, моноинжекции зернистого магнезия) наиболее затратным – 7,20–8,6 долл./т чугуна является KR–процесс.

Наименее затратным – 2,7–2,9 долл./тонн чугуна, является процесс моноинжекции зернистого магнезия (с обеспечением благоприятных условий насыщения магнезией прифурменной зоны).

Инжекционные процессы десульфурации чугуна имеют наименьшие продолжительности процесса рафинирования и вписываются в цикл конвертерной плавки, обеспечивая снижение серы в чугуне вплоть до $\leq 0,001$ % серы.

Библиографический список

1. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. М. : Металлургия. 1992. 335 с.
2. Шевченко А. Ф., Большаков В. И., Башмаков А. М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнезией в большегрузных ковшах. К. : Наукова думка. 2011. 207 с.
3. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнезией. М. : Металлургия. 1980. 239 с.
4. УШ Международный симпозиум по Десульфурации чугуна и стали : сб. докладов. Нижний Тагил, 2004. 87 с.
5. Инь Жуй Ю. Отечественное сталеплавильное производство - обзор состояния и развитие технологий до 2010 г. // Сб. науч. тр. всекитайской конф. "Выплавка и непрерывная разливка стали". Ханчжоу, КНР, 2008. С. 1-13.
6. Степанов А. А., Ламухин А. М., Зинченко С.Д. и др. Освоение технологии производства сталей с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь» // VIII Симпозиум по десульфурации чугуна и стали, 2004 г. Сб. трудов. Нижний Тагил. 2004. С. 83-87.

7. Зборщик А. М., Куберский С. В., Косолап Н. В. и др. Эффективность использования реагентов в современных процессах внедоменной десульфурации чугуна. Бюл. "Черная металлургия". М. 2011. № 12. С. 35-41.

8. Шевченко А. Ф., Башмаков А. М., Маначин И. А. и др. Техничко-экономическое сопоставление процессов внепечной десульфурации чугуна по результатам их промышленного освоения. Черная металлургия. Бюлл. Черметинформация. Москва. 2013. № 10. С. 9-13.

9. Бродский С. С., Учитель Л. М., Несвет В. В. и др. Повышение эффективности десульфурации чугуна порошковой известью. Металл и литье Украины Киев. 1999. № 3-4. С. 34-37.

10. Зборщик А. М., Куберский С. В., Довгало Г. Я. и др. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300- тонных заливочных ковшах. Сталь. 2011. № 9. С. 16-19.

11. Шевченко А. Ф., Маначин И. А., Вергун А. С. и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. Днепропетровск : ДніпроVAL, 2017. 252 с.

12. Зборщик А. М., Куберский С. В., Косолап Н. В. Эффективность использования реагентов в современных процессах внедоменной десульфурации чугуна. Чер. металлургия. 2011. № 12. С. 35-40.

13. Шевченко А. Ф. Комплексная оценка различных технологий внепечной десульфурации чугуна. Черная металлургия. Бюлл. Черметинформация. Москва, 2011. № 7. С. 33-41.

14. Технология производства трубной ультранизкосернистой стали / А.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А. М. Столяров, М.В. Потапова // Черные металлы. Москва, РФ. 2019. № 12. С. 26-31.

15. Ladle Desulfurization of Converter Low-Sulfur Pipe Steel / S. N. Ushakov, V. A. Bigeev, A. M. Stolyarov & M.V. Potapova // Metallurgist, Springer (USA). 2018. Volume 62. P. 667-673.

16. Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron / S.N. Ushakov, V.A. Avramenko, V.A. Bigeev, A.M. Stolyarov & M.V. Potapova // Metallurgist, Springer (USA). 2018. Volume 61. P.967-970.

17. Production of low-sulfur steel with limited hydrogen content / V.A. Bigeev, A.O. Nikolaev & A.V. Brusnikova // Steel in Translation, Springer (USA). 2014. Volume 44. P. 272-275.

18. Кравец А. Н. Разработка энергосберегающей технологии рафинирования чугуна в заливочном ковше с одновременным удалением кремния и серы. Канд. дисс. Днепродзержинск-Днепропетровск. Институт черной металлургии, 2002. 219 с.

19. Шевченко А. Ф., Башмаков А. М., Маначин И. А. и др. Техничко-экономическое сопоставление процессов внепечной десульфурации чугуна по результатам их промышленного освоения. Черная металлургия, Бюлл. Черметинформация. Москва. 2013. № 10. С. 9-13.

20. Степанов А. А., Зинченко С. Д., Ламухин А. И. и др. Освоение технологии производства стали с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь» / Труды VIII Межд. симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Нижний Тагил (Россия), 2004. С. 83-87.

21. Ушаков С. Н., Авраменко В. Л., Бичеев В. А., Столяров А. М., Потапова М. В. Производство трубной низкосернистой стали с ковшевой десульфурацией чугуна. М.: Металлург. 2017. № 11. С. 47-61.

22. Смирнов А. Н., Зборщик А. М. Внепечное рафинирование чугуна и стали. Донецк: ГУВЗ «ДонНТУ», 2012. 185 с.

References

1. Kudrin, V. A. (1992). *Vnepechnaia obrabotka chuguna i stali*. Moskva: Metallurgiiia
2. Shevchenko, A. F., Bolshakov, V. I., & Bashmakov, A. M. (2011). *Tekhnologiiia i oborudovanie desulfuracii chuguna magniem v bolshegruznykh kovshakh*. - Kyiv: Naukova dumka
3. Voronova, N. A. (1980). *Desulfuraciiia chuguna magniem*. Moskva: Metallurgiiia
4. *USh Mezhdunarodnyi simpozium po Desulfuracii chuguna i stali*. (2004). Sb. dokladov. Nizhnii Tagil
5. In, Zhui Iu. (2008). Otechestvennoe staleplavilnoe proizvodstvo - obzor sostoianiiia i razvitie tekhnologii do 2010 g. // In: *sb. nauch. tr. vsekitaiskoi konf. "Vyplavka i nepreryvnaia razlivka stali"*. Khanchzhou, KNR, 1-13
6. Stepanov, A. A., Lamukhin A. M., Zinchenko, S.D. et al. (2004). Osvoenie tekhnologii proizvodstva stali s ispolzovaniem ustanovki desulfuracii chuguna v usloviakh konverternogo proizvodstva ОАО «Severstal». In: *VIII Simpozium po desulfuracii chuguna i stali*. Nizhnii Tagil, 83-87.
7. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V.,

Kosolap, N. V. et al. (2011). Effektivnost ispolzovaniia reagentov v sovremennykh protsessakh vnedomennoi desulfuracii chuguna. *Biull. "Chernaia metallurgiiia"*, (12), 35-41

8. Shevchenko, A. F., Bashmakov, A. M., Manachin, I. A. et al. (2013). Tekhniko-ekonomicheskoe sopostavlenie protsessov vnepechnoi desulfuracii chuguna po rezul'tatam ikh promyshlennogo osvoeniia. *Chernaia metallurgiiia. Biull. Chermetinformaciiia*, (10), 9-13

9. Brodskii, S. S., Uchitel, L. M., Nesvet, V. V. et al. (1999). Povyshenie effektivnosti desulfuracii chuguna poroshkovoii izvestiu. *Metall i lite Ukrainy*, (3-4), 34-37

10. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., Dovgaliuk, G. Ia. et al. (2011). Effektivnost ispolzovaniia fluidizirovannoi izvesti dlia desulfuracii chuguna v 300-tonnykh zalivochnykh kovshakh. *Stal*, (9), 16-19

11. Shevchenko, A. F., Manachin, I. A., Vergun, A. S. et al. (2017). *Vnepechnaia desulfuraciiia chuguna v kovshakh. Tekhnologiiia. Issledovaniia. Analiz. Sovershenstvovanie*. Dnepropetrovsk: Dnipro –VAI»

12. Zborshchik, A. M., Kuberskii, S. V., & Kosolap, N. V. (2011). Effektivnost ispolzovaniia reagentov v sovremennykh protsesakh vnedomennoi desulfuracii chuguna. *Cher. metallurgiiia*, (12), 35-40

13. Shevchenko, A. F. (2011). Kompleksnaia otcenka razlichnykh tekhnologii vnepechnoi desulfuracii chuguna. *Chernaia metallurgiiia. Biull. Chermetinformaciiia*, (7), 33-41

14. Ushakov, A. N., Bigeev, V. A., Stoliarov, A. M., & Potapova, M. V. (2019). Tekhnologiiia proizvodstva trubnoi ultranizkosernistoi stali. *Cher nye metally*, (12), 26-31

15. Ushakov, S. N., Bigeev, V. A., Stolyarov, A. M. & Potapova, M.V. (2018). Ladle Desulfurization of Converter Low-Sulfur Pipe Steel. *Metallurgist*, Springer (USA), **62**, 667-673

16. Ushakov, S. N., Avramenko, V. A., Bigeev, V. A., Stolyarov, A. M. & Potapova, M. V. (2018). Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron. *Metallurgist*, Springer (USA), **61**, P.967-970

17. Bigeev, V. A., Nikolaev, A. O. & Brusnikova, A. V. (2014). Production of low-sulfur steel with limited hydrogen content. *Steel in Translation*, Springer (USA), **44**, 272-275

18. Kravets, A. N. (2002). Razrabotka energosberegaiushchei tekhnologii rafinirovaniia chuguna v zalivochnom kovshe s odnovremennym udaleniem

kremniia i sery. Kand. diss. Dneprodzerzhinsk-Dnepropetrovsk. Institut chernoї metallurgii.

19. Shevchenko, A. F., Bashmakov, A. M., Manachin, I. A. et al. (2013). Tekhniko-ekonomicheskoe sopostavlenie protsessov vnepechnoi desulfuratsii chuguna po rezul'tatam ikh promyshlennogo osvoiniia. *Chernaia metallurgii, Biull. Chermetinformatsiia*. (10), 9-13

20. Stepanov, A. A., Zinchenko, S. D., Lamukhin, A. I. et al. (2004). Osvoenie tekhnologii proizvodstva stali s ispolzovaniem ustanovki desul-

furatsii chuguna v usloviakh konverternogo proizvodstva OAO «Severstal». *Trudy VIII Mezhd. simpoziuma po desulfuratsii chuguna i stali*. Nizhnij Tagil, Russia, 83-87

21. Ushakov, S. N., Avramenko, V. L., Bicheev, V. A., Stoliarov, A. M., & Potapova, M. V. (2017). Proizvodstvo trubnoi nizkosemistoї stali s kovshevoi desulfuratsiei chuguna. *Metallurg*, (11), 47-61

22. Smirnov, A. N., & Zborshchik, A. M. (2012). Vnepechnoe rafinirovanie chuguna i stali. Donetck. GUVZ DonNTU

Шевченко Анатолий Филиппович, профессор, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0003-0867-6825. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Маначин Иван Александрович, старший исследователь, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0001-9795-6751. E-mail: imanachyn@gmail.com

Двоскин Борис Вульфович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0003-2891-7833. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Башмаков Александр Михайлович, кандидат технических наук, главный технолог, «ТИТАН-ПРОЕКТ», г. Запорожье, Украина. E-mail: a.bashmakov@gmail.com

Вергун Александр Сергеевич, старший научный сотрудник, доктор технических наук, старший научный сотрудник отдела внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0001-5493-9214. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Кисляков Владимир Геннадиевич, кандидат технических наук, заведующий отделом внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0002-1775-5050. E-mail: vovkadragon12@gmail.com

Шевченко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела внепечной обработки чугуна, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина. ORCID ID: 0000-0002-9287-9177. E-mail: shev_serg@i.ua

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ КОВШЕВОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТОВ И ИХ ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА

Цель. Для объективной технико-экономической оценки 3-х технологий десульфурации чугуна был выполнен комплекс всесторонних исследований показателей внепечной обработки чугуна в одинаковых и равноценных условиях рафинирования по 2-м группам ковшей - с массой чугуна 80-120 т и более 200 т (большегрузные ковши).

Результаты. Показано, что одним из основных параметров и показателей является расход реагента, определяющий все основные показатели процесса. Сравнительный анализ показателей таблицы 1 свидетельствует также о том, что при KR-процессе увеличение массы чугуна в ковше снижает эффективность десульфурации, так как переход от ковши с массой чугуна 80 и 100 т к большим ковшом (260 т) сопровождается уменьшением удельной степени десульфурации. удаление увеличивает расход реагента на единицу удаленной серы. Значительные удельные расходы реагентов (вплоть до 8-17 кг/т

чугуна) и длительность перемешивания (вплоть до 8-20 мин), а также цикла – до 25-68 мин, что обуславливает ощутимые потери температуры чугуна – в среднем 40-42 °С, а в ряде режимах десульфурации – вплоть до 92-128 °С. Обусловлено это тем, что с увеличением массы чугуна ухудшаются массообменные процессы между шлаком и жидким чугуном ковша. Наибольший удельный расход реагентов в KR-процессе определил в результате наибольшие затраты при реализации этого процесса. Наименьшие удельные издержки при моноинжекции магния обуславливают наименьшие издержки при промышленном освоении этого процесса. Фактические показатели промышленных продувок свидетельствуют об о. что моноинжекция зернистого магния характеризуется наименьшими затратами реагентов – в среднем 0,42-0,55 кг/т чугуна, наименьшей продолжительностью операции десульфурации – в среднем 5,5-7,7 мин и в то же время обеспечением вплоть до супер глубокой десульфурации чугуна – до 0,0003-0,001 %, степенью десульфурации – до 99 %, высокой интенсивностью удаления серы - в среднем 12-14,4 %/мин., высокой степенью усвоения реагента – в среднем 75-92 %.

Научная новизна. Представлены номограммы для определения и прогнозирования удельных затрат различных реагентов в различных процессах и ковшах в зависимости от исходного переменного содержания серы в чугуне и заданного ее конечного значения.

Практическая ценность. Представленные фактические данные по технологии применены KR-процессы ($\text{CaO}+\text{CaF}_2$), коинжекции извести с магнием ($\text{CaO}+\text{Mg}$) и моноинжекции зернистого магния по украинской технологии вдувания. Расходы при десульфурации процессами KR – коинжекция – моноинжекция находятся в соотношении 3:2:1. Обосновано преимущество инъекционных процессов десульфурации чугуна.

Ключевые слова: внепечная десульфурация чугуна, порошковая известь, гранулированный магний, расход реагента, эффективность десульфурации.

Шевченко Анатолій Пилипович, професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0003-0867-6825. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Маначин Іван Олександрович, старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0001-9795-6751. E-mail: imanachyn@gmail.com

Двоскін Борис Вульфівич, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0003-2891-7833. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Башмаков Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, головний технолог, «ТИТАНПРОЕКТ», м. Запоріжжя, Україна. E-mail: a.bashmakov@gmail.com

Вергун Олександр Сергійович, старший науковий співробітник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0001-5493-9214. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Кисляков Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, завідувач відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0002-1775-5050. E-mail: vovkadragon12@gmail.com

Шевченко Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна. ORCID ID: 0000-0002-9287-9177. E-mail: shev_serg@i.ua

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСІВ КОВШОВОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ З ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ РЕАГЕНТІВ І ЇХ ПРОМИСЛОВА ПЕРЕВІРКА

Мета. Для об'єктивної техніко-економічної оцінки 3-х технологій десульфуратії чавуну було ви-

конано комплекс всебічних досліджень показників позапічної обробки чавуну в однакових та рівноцінних умовах рафінування за 2-ма групами ковшів – з масою чавуну 80-120 т і більше 200 т (велико-вантажні ковші).

Результати. Показано, що одним з основних параметрів і показників є витрата реагенту, який визначає всі основні показники процесу. Порівняльний аналіз показників таблиці 1 свідчить також про те, що при KR-процесі збільшення маси чавуну в ковші знижує ефективність десульфурації, так як перехід від ковші з масою чавуну 80 і 100 т до великих ковшів (260 т) супроводжується зменшенням питомої ступеня десульфурації, інтенсивності видалення збільшує витрату реагенту на одиницю віддаленої сірки. Значні питомі витрати реагентів (аж до 8-17 кг/т чавуну) і тривалість перемішування (аж до 8-20 хв), а також циклу – до 25-68 хв, що обумовлює відчутних втрат температури чавуну - в середньому 40-42 °С, а в ряді режимах десульфурації - аж до 92-128 °С. Обумовлено це тим, що зі збільшенням маси чавуну погіршуються масообмінні процеси між шлаком і рідким чавуном ковша. Найбільшу питому витрату реагентів в KR-процесі визначив в результаті найбільші витрати при реалізації цього процесу. Найменші питомі витрати при моноінжекції магнію зумовлюють найменші витрати при промисловому освоєнні цього процесу. Фактичні показники промислових продувок свідчать про ом. що моноінжекція зернистого магнію характеризується найменшими витратами реагентів - в середньому 0,42-0,55 кг/т чавуну, найменшою тривалістю операції десульфурації - в середньому 5,5-7,7 хв і в той же час забезпеченням аж до супер глибокої дсульфурації чавуну – аж до 0,0003-0,001 %, ступенем десульфурації – до 99 %, високою інтенсивністю видалення сірки – в середньому 12-14,4 %/хв., високим ступенем засвоєння реагенту - в середньому 75-92 %.

Наукова новизна. Представлено номограми для визначення і прогнозування питомих витрат різних реагентів в різних процесах і ківшах в залежності від змінного вихідного вмісту сірки в чавуні і заданого її кінцевого значення.

Практична цінність. Представлені фактичні дані по технології застосовані KR-процеси (CaO + CaF₂), коінжекції вапна з магнієм (CaO + Mg) і моноінжекції зернистого магнію за українською технологією вдування. Витрати при десульфурації процесами KR - коінжекція - моноінжекція знаходяться в співвідношенні 3: 2: 1.

Ключові слова: позапічна десульфурація чавуну, порошок вапна, гранульований магній, витрата реагенту, ефективність десульфурації.

Anatoliy Shevchenko, professor, doctor of technical sciences, leading researcher of the department of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-0867-6825. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Ivan Manachyn, senior researcher, candidate of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of NAS of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0001-9795-6751. E-mail: imanachyn@gmail.com

Borys Dvoskin, candidate of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-2891-7833. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Oleksandr Bashmakov, candidate of technical sciences, Chief technologist, "TITANPROEKT", Zaporizhzhya, Ukraine. E-mail: a.bashmakov@gmail.com

Olexander Vergun, senior researcher, doctor of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0001-5493-9214. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Volodymyr Kislyakov, candidate of technical sciences, Head of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-1775-5050. Email: vovkadragon12@gmail.com

Serhiy Shevchenko, candidate of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-9287-9177. E-mail: shev_serg@i.ua

EVALUATION OF THE INDICATORS OF THE PROCESSES OF LADLE DESULFURATION OF CAST IRON USING VARIOUS REAGENTS AND THEIR INDUSTRIAL VERIFICATION

The purpose. For an objective technical and economic assessment of the 3 pig iron desulphurization technologies, a complex of comprehensive studies of the indicators of out-of-furnace treatment of pig iron was carried out under the same and equivalent refining conditions for 2 groups of ladles - with a mass of pig iron of 80-120 tons and more than 200 tons (heavy-duty ladles).

Results. It is shown that one of the main parameters and indicators is the reagent consumption, which determines all the main indicators of the process. A comparative analysis of the indicators in Table 1 also indicates that in the KR process, an increase in the mass of iron in the ladle reduces the efficiency of desulfurization, since the transition from ladles with an iron mass of 80 and 100 tons to large ladles (260 tons) is accompanied by a decrease in the specific degree of desulfurization. removal increases reagent consumption per unit of sulfur removed. Significant specific consumption of reagents (up to 8-17 kg/t of pig iron) and the duration of mixing (up to 8-20 min), as well as the cycle – up to 25-68 min, which causes noticeable temperature losses of pig iron - an average of 40-42 °C, and in a number of desulfurization modes - up to 92-128 °C. This is due to the fact that with an increase in the mass of cast iron, the mass transfer processes between the slag and the liquid iron of the ladle worsen. The highest specific consumption of reagents in the KR process resulted in the highest costs in the implementation of this process. The lowest specific costs for monoinjection of magnesium determine the lowest costs for the industrial development of this process. The actual indicators of industrial purges indicate about. that monoinjection of granular magnesium is characterized by the lowest cost of reagents - an average of 0.42-0.55 kg/t of pig iron, the shortest duration of the desulfurization operation – an average of 5.5-7.7 minutes and at the same time providing up to super deep desulfurization of pig iron – up to 0.0003-0.001 %, degree of desulfurization – up to 99 %, high intensity of sulfur removal – on average 12-14.4%/min., high degree of assimilation of the reagent – on average 75-92 %.

Originality. Nomograms for determination and prediction of specific costs of different reagents in different processes and ladles depending on the variable initial sulfur content in cast iron and its set final value are presented.

Practical implications. The presented actual data on the technology applied KR-processes ($\text{CaO}+\text{CaF}_2$), co-injection of lime with magnesium ($\text{CaO}+\text{Mg}$) and mono-injection of granular magnesium according to the Ukrainian blowing technology. The costs for desulfurization processes KR - co-injection - mono-injection are in the ratio 3:2:1. The advantage of injection processes for desulfurization of cast iron is substantiated.

Key words: out-of-furnace desulfurization of cast iron, powdered lime, granular magnesium, reagent consumption, desulfurization efficiency.

Рукопис надійшов 03.09.2021 р.