

**А.Ф.Шевченко, А.С.Вергун, Б.В.Двоскин, В.Г.Кисляков,
А.С.Булахтин, С.А.Шевченко, А.М.Башмаков**

Институт черной металлургии НАНУ, Институт титана

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА И СКАЧИВАНИЯ ШЛАКА НА ПРИХОД СЕРЫ В КОНВЕРТЕР

Приведен расчетный анализ влияния способа десульфурации чугуна и глубины обессеривания на содержание серы в ковшевом шлаке. Сопоставлены способы десульфурации чугуна и степени очистки чугуна от шлака на приход серы с чугуном и шлаком в конвертер. Показаны преимущества инъекционных методов десульфурации чугуна. Выработаны рекомендации по степени удаления ковшевых шлаков.

Внепечная десульфурация чугуна обеспечивает заданное очищение чугуна от серы, которая в процессе обработки удаляется из металла в ковшевой шлак. Получаемый при этом низкосернистый чугун (независимо от способа десульфурации) при одинаковом конечном содержании серы имеет практически равные свойства как шихтовая составляющая конвертерной плавки и вносит одинаковое количество серы в шихту конвертеров. Поэтому при различных способах десульфурации чугуна использование низкосернистого ($\leq 0,010\%$ серы) и особо чистого ($\leq 0,005\%$) по сере чугуна позволяет выплавлять широкий сортамент сталей с низким и особо низким содержанием серы [1–5,9].

Следует отметить, что из всех типов обессеренного чугуна (различными реагентами) некоторые преимущества имеет чугун, обработанный магнием или магнийсодержащим реагентом, так как низкое содержание серы в этом чугуне сочетается с повышенным (0,02–0,05%) остаточным содержанием магния [1,6], который, обладая высоким сродством к сере, препятствует возврату серы из шлака после десульфурации [1,6–8] и одновременно является положительной активной присадкой в чугуне, сливаемом в сталеплавильный агрегат.

При одинаковом содержании серы и температуре чугуна после его подготовки к конвертерному переделу собственно способ внепечной обработки и подготовки чугуна влияет на режим шлакообразования в ковшах, что в итоге определяет комплекс физико-химических свойств и характеристик шлака, образующегося в ковше после обессеривания. В зависимости от применяемых реагентов и технологии внепечной обработки чугуна образуется различное количество шлака с различным химическим составом, в т.ч. по содержанию серы [1,8,10]. В настоящей работе представлены материалы оценки влияния технологии подготовки чугуна к сталеплавильному переделу на приход серы в сталеплавильный агрегат.

Исходные условия приняты следующими. Масса чугуна в ковше – 100т. Исходное количество ковшевого шлака перед десульфурацией – 15кг/т чугуна (средняя величина по ряду заводов). Исходное содержание серы в чугуне – 0,035%. Химический состав неметаллической фазы ковшевого шлака: CaO – 37%, SiO₂ – 35%, Al₂O₃ – 14%, MgO – 10%, S – 0,5%. Содержание серы в чугуне после десульфурации принято по трем вариантам – 0,009%, 0,005% и 0,002%.

Для сравнения и анализа оценивали 4 варианта подготовки чугуна к конвертерной плавке.

Вариант I. Внепечная десульфурация чугуна не производится. Осуществляется скачивание шлака из ковша перед сливом чугуна в сталеплавильный агрегат.

Вариант II. Производится десульфурация чугуна вдуванием гранулированного магнезита. После десульфурации чугуна осуществляется скачивание шлака из ковша. (Перед десульфурацией шлак не скачивается).

Вариант III. Производится десульфурация чугуна вдуванием смеси известняка и магнезита (в соотношении 4:1). После десульфурации чугуна осуществляется скачивание шлака из ковша (перед десульфурацией шлак не скачивается).

Вариант IV. Перед десульфурацией чугуна осуществляется удаление 90% шлака. После этого производится засыпка фракционированного известняка в ковш и перемешивание механической мешалкой. После десульфурации также осуществляется скачивание шлака.

Технологическое сопоставление влияния способа десульфурации чугуна на содержание серы в ковшевом шлаке представлено в табл.1, из которой следует, что все способы десульфурации чугуна сопровождаются дополнительным шлакообразованием пропорционально количеству обессеривающего реагента. Из приведенных методов десульфурации наибольшее количество дополнительного шлака – 1,026÷1,30% от массы чугуна (10,26–13,0 кг/т чугуна), происходит при процессе KR_{CaO} – механическое перемешивание ванны в ковше с засыпкой известняка. Наименьшее дополнительное шлакообразование характерно для процесса десульфурации вдуванием гранулированного магнезита 0,076–0,110% (0,76–1,1 кг/т чугуна).

Кроме этого инжекционные процессы десульфурации (варианты II и III) осуществляются без предварительного скачивания шлака, а процесс KR_{CaO} (вариант IV) реализуется при обязательном удалении ковшевого шлака перед десульфурацией, что необходимо для наведения в ковше активного CaO-содержащего шлака. Последняя операция существенно снижает пропускную способность установки десульфурации чугуна KR_{CaO} процессом и увеличивает потери металла. Приведенное указывает на дополнительные важные преимущества инжекционных процессов десульфурации чугуна магнезитосодержащими реагентами в сравнении с применением механических мешалок.

Таблица 1. Технологическое сопоставление влияния способа десульфурации чугуна на содержание серы в ковшевом шлаке

№ п/п	Показатель, параметр	I Без десуль- фура- ции	II Вдувание гранули- рованного магния (Mg)	III Вдувание сме- си извести с магнием (СаО+ Mg)	IV Механическое перемешивание с засыпкой извести (KR _{СаО})
1	2	3	4	5	6
1	Содержание серы в чугуне, %				
	– исходное	0,035	0,035	0,035	0,035
	– после десульфурации	0,035 (без десуль- фура- ции)	0,009 0,005 0,002	0,009 0,005 0,002	0,009 0,005 0,002
2	Количество исходного ковшевого шлака в ковше, % от массы чугуна	1,5	1,5	1,5	1,5
3	Количество шлака в ковше после предварительного скачивания (перед десульфурацией, % от массы чугуна)	1,5	1,5	1,5	0,1
4	Дополнительное шлакообразование в ковше после десульфурации чугуна, % от массы чугуна:				
	- при снижении серы до 0,009%	нет	0,076	0,500	1,026
	- при снижении серы до 0,005%	нет	0,092	0,600	1,200
	- при снижении серы до 0,002%	нет	0,110	0,750	1,300
5	Итоговое количество шлака в ковше после десульфурации, % от массы чугуна:				
	- при снижении серы до 0,009%	операция десульф.	1,576	2,000	1,126
	- при снижении серы до 0,005%	не производ.	1,592	2,100	1,300
	- при снижении серы до 0,002%		1,614	2,250	1,400
6	Состав шлака в ковше после десульфурации (перед скачиванием), %				
при снижении серы до 0,009%	CaO	37,0	35,7	42,9	81,5
	SiO ₂	35,0	33,7	29,9	5,6
	Al ₂ O ₃	14,0	13,5	12,0	2,2
	MgO	10,0	13,7	13,4	1,6
	S	0,5	2,15	1,91	4,23
при снижении серы до 0,005%	CaO	37,0	34,9	46,2	82,5
	SiO ₂	35,0	33,0	29,1	4,8
	Al ₂ O ₃	14,0	13,2	11,8	1,9
	MgO	10,0	14,2	14,3	1,4
	S	0,5	2,35	2,15	4,36
при снижении серы до 0,002%	CaO	37,0	34,3	47,5	82,9
	SiO ₂	35,0	32,5	29,0	4,6
	Al ₂ O ₃	14,0	13,0	11,6	1,8
	MgO	10,0	15,2	15,3	1,3
	S	0,5	2,50	2,25	4,46

Итоговое количество шлака в ковшах также увеличивается с увеличением удельных расходов реагентов. Поэтому самое большое количество шлака 2,526–2,800% (с учетом 1,4% ранее удаленного) образуется при процессе KR_{CaO} . Больше количество шлака в ковше увеличивает потери металла как собственно со шлаком, так и при скачивании шлака из ковша.

Сопоставление химического состава ковшевых шлаков, образующихся в результате десульфурации чугуна по различным технологиям, показывает (таблица 1), что наименьшее количество серы характерно для шлака без десульфурации чугуна – около 0,5% (вариант I). Наибольшее количество серы – 4,23÷4,46% (в анализируемых условиях десульфурации), содержится в известковых шлаках KR_{CaO} процесса (вариант IV). В шлаках инъекционных процессов магнийсодержащими реагентами (вариант II и III) содержится практически вдвое меньше серы – 1,9–2,5%, чем в ковшевых шлаках KR_{CaO} процесса. Если сравнивать технологии вдувания смеси извести с магнием (вариант III) и вдувание гранулированного магния (без разубоживающих добавок – вариант II), то содержание серы в этих шлаках получается близким; только лишь следует отметить, что в варианте III содержание серы содержится несколько ниже, чем в варианте II.

Оценивая закономерность изменения содержания серы в шлаках при десульфурации чугуна, видим (таблица 1) увеличение содержания серы в шлаке, которое происходит за счет её прихода из чугуна. Наличие разубоживателей в системе (ковшевой шлак, различные добавки к реагенту и в ковш) уменьшает содержание серы в шлаке, но практически наибольшее влияние на содержание серы в шлаке оказывает количество исходного (перед десульфурацией) ковшевого шлака. Поэтому процесс KR_{CaO} , связанный с необходимостью наименьшего количества исходного шлака, сопровождается наиболее высоким содержанием серы в шлаке после десульфурации. По этим причинам KR_{CaO} процесс (кроме других недостатков) имеет на практике два существенных недостатка, связанных с необходимостью предварительного скачивания шлака и наиболее высоким содержанием серы в чугуне. Последнее не позволяет его рекомендовать для высокопроизводительного современного сталеплавильного комплекса и особенно для условий выплавки низкосернистых и особо чистых по сере сталей.

Процессы десульфурации вдуванием магнийсодержащих реагентов обеспечивают любую заданную глубину десульфурации чугуна – вплоть до 0,001–0,002% [5,6,9,10] без предварительного скачивания ковшевого шлака, при этом содержание серы в шлаке получается относительно невысоким. Это свидетельствует о важном преимуществе и перспективе применения методов десульфурации чугуна на основе магния для всех условий выплавки широкого сортамента сталей, в т.ч. особенно с низким и особо низким содержанием серы, в современных сталеплавильных производствах.

Нами была выполнена расчетная оценка влияния скачивания шлака на приход серы в шихту конвертера при различных способах десульфурации чугуна со снижением серы в чугуне с 0,035% до 0,009% (табл.2), до 0,005% (табл.3) и до 0,002% (табл.4). Эти исследования показали, что в случае применения чугуна без десульфурации (вариант I) основное количество серы вносится в конвертер с жидким чугуном 82–99,7%. Поэтому остающийся после скачивания ковшевой шлак не оказывает существенно и принципиального влияния на приход серы в конвертер (рис. 1).

В случае применения внепечной десульфурации чугуна основное количество серы переносится в шлаковую фазу тем в большей степени, чем меньше содержание серы в чугуне после десульфурации (рис.2, 3, 4). При использовании жидкого чугуна, подвергнутого десульфурации, в конвертер с чугуном может вноситься 0,5–10% серы от общего её содержания в системе «чугун–шлак», а остальное вносится ковшевым шлаком. Поэтому независимо от способа десульфурации процесс удаления образующегося в ковше сернистого ковшевого шлака является неотъемлемой и обязательной составляющей внепечной десульфурации чугуна при последующем сталеплавильном его переделе.

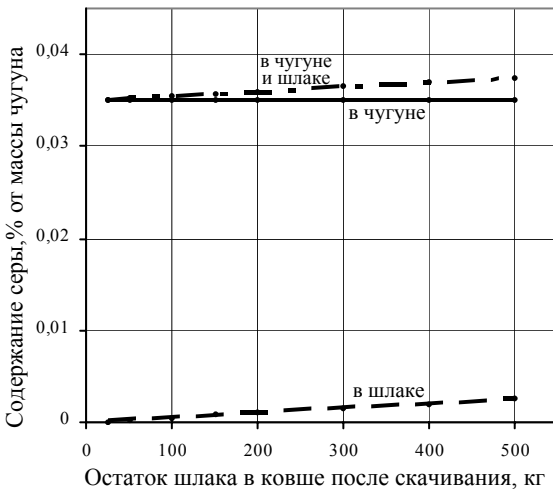


Рис.1. Зависимость содержания серы (вносимое в конвертер) в ковшевом шлаке, в чугуне и всего в системе «чугун – шлак» от количества ковшевого шлака, остающегося после скачивания. Реализация технологии по варианту I – без внепечной десульфурации чугуна

Анализ расположения функций зависимости содержания серы в составляющих системы «чугун – шлак» от количества оставшегося после десульфурации ковшевого шлака (по диаграммам рис.2, 3 и 4) свидетельствует о том, что чем ниже содержание серы в чугуне, тем более активно проявляется негативное влияние ковшевого шлака. Так при содержании серы в чугуне 0,009% приход серы со шлаком больше, чем с жидким чугуном при остатке шлака в ковше после скачивания более 200–400 кг (рис.2).

Таблица 2. Сопоставление влияния технологии десульфурации и степени удаления ковшевого шлака после десульфурации на приход серы в сталеплавильный агрегат. Содержание серы в чугуна после десульфурации 0,009%

№ п	Показатель, параметр	I Без десульфурации	II Вдувание гранулированного магния (Mg)	III Вдувание смеси извести с магнием (CaO+Mg)	IV Механическое перемешивание с засыпкой извести (KR_{CaO})
1	Количество серы в системе «чугун-ковшевой шлак» после десульфурации чугуна				
	– в жидком чугуне, %	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в ковшевом шлаке, % от массы шлака	0,5	2,15	1,91	4,23
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0075	0,0335	0,0335	0,0265
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0425	0,0425	0,0425	0,0355
2	Количество серы в системе «чугун-ковшевой шлак» после скачивания шлака (перед сливом в конвертер):				
	а) при остатке шлака после скачивания 25 кг:				
	– в жидком чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0001	0,0005	0,0004	0,0010
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0351	0,0095	0,0094	0,0100
	б) при остатке шлака после скачивания 50 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0002	0,0010	0,0009	0,0020
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0352	0,0100	0,0099	0,0110
	в) при остатке шлака после скачивания 100 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0005	0,0021	0,0019	0,0042
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0355	0,0111	0,0119	0,0132
	г) при остатке шлака после скачивания 150 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0008	0,0032	0,0029	0,0063
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0358	0,0122	0,0119	0,0153
	д) при остатке шлака после скачивания 200 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0010	0,0042	0,0038	0,0085
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0360	0,0132	0,0128	0,0175
	е) при остатке шлака после скачивания 300 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0015	0,0064	0,0057	0,0127
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0365	0,0154	0,0147	0,0217
	ж) при остатке шлака после скачивания 400 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009

– в шлаке, % от массы чугуна	0,0020	0,0085	0,0076	0,0169
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0370	0,0175	0,0166	0,0259
з) при остатке шлака после скачивания 500 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,009	0,009	0,009
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0025	0,0106	0,0096	0,0212
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0375	0,0196	0,0186	0,0302

Таблица 3. Сопоставление влияния технологии десульфурации и степени удаления ковшевого шлака после десульфурации на приход серы в сталеплавильный агрегат. Содержание серы в чугуне после десульфурации 0,005%

№ п	Показатель, параметр	I Без десульфурации	II Вдувание гранулированного магния (Mg)	III Вдувание смеси извести с магнезием (CaO+Mg)	IV Механическое перемешивание с засыпкой извести (KR _{CaO})
1	Количество серы в системе «чугун-ковшевого шлак» после десульфурации чугуна				
	– в жидком чугуне, %	0,035	0,005	0,005	0,005
	– в ковшевом шлаке, % от массы шлака	0,5	2,35	2,15	4,36
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0075	0,0375	0,0375	0,0305
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0425	0,0425	0,0425	0,0355
2	Количество серы в системе «чугун-ковшевого шлак» после скачивания шлака (перед сливом в конвертер):				
	а) при остатке шлака после скачивания 25 кг:				
	– в жидком чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0001	0,0006	0,0005	0,0010
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0351	0,0056	0,0055	0,0060
	б) при остатке шлака после скачивания 50 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0002	0,0012	0,0011	0,0022
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0352	0,0062	0,0061	0,0072
	в) при остатке шлака после скачивания 100 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0005	0,0024	0,0022	0,0044
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0355	0,0074	0,0072	0,0094
	г) при остатке шлака после скачивания 150 кг:				
	– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0008	0,0035	0,0032	0,0065	
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0358	0,0085	0,0082	0,0115	
д) при остатке шлака после скачивания 200 кг:					

– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0010	0,0047	0,0043	0,0087
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0360	0,0097	0,0093	0,0137
е) при остатке шлака после скачивания 300 кг:				
– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0015	0,0070	0,0064	0,0131
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0365	0,0120	0,0145	0,0181
ж) при остатке шлака после скачивания 400 кг:				
– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0020	0,0094	0,0086	0,0174
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0370	0,0144	0,0136	0,0224
з) при остатке шлака после скачивания 500 кг:				
– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,005	0,005	0,005
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0025	0,0118	0,0108	0,0218
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0375	0,0168	0,0158	0,0268

Таблица 4. Сопоставление влияния технологии десульфурации и степени удаления ковшевого шлака после десульфурации на приход серы в сталеплавильный агрегат. Содержание серы в чугуна после десульфурации 0,002%

№ п	Показатель, параметр	I Без десульфурации	II Вдувание гранулированного магния (Mg)	III Вдувание смеси извести с магнием (CaO+Mg)	IV Механическое перемешивание с засыпкой извести (KR _{CaO})
1	Количество серы в системе «чугун-ковшевой шлак» после десульфурации чугуна				
	– в жидком чугуна, %	0,035	0,002	0,002	0,002
	– в ковшевом шлаке, % от массы шлака	0,50	2,50	2,25	4,46
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0075	0,0405	0,0405	0,0335
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0425	0,0425	0,0425	0,0355
2	Количество серы в системе «чугун–ковшевой шлак» после скачивания шлака (перед сливом в конвертер):				
	а) при остатке шлака после скачивания 25 кг:				
	– в жидком чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
	– в ковшевом шлаке, % от массы чугуна	0,0001	0,0006	0,0006	0,0011
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0351	0,0026	0,0025	0,0031
	б) при остатке шлака после скачивания 50 кг:				
	– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
	– в шлаке, % от массы чугуна	0,0002	0,0012	0,0011	0,0022
	– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0352	0,0032	0,0031	0,0042
	в) при остатке шлака после скачивания 100 кг:				
	– в чугуна, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002

– в шлаке, % от массы чугуна	0,0005	0,0025	0,0022	0,0045
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0355	0,0045	0,0042	0,0065
г) при остатке шлака после скачивания 150 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0008	0,0038	0,0034	0,0067
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0358	0,0058	0,0054	0,0087
д) при остатке шлака после скачивания 200 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0010	0,0050	0,0045	0,0089
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0360	0,0070	0,0065	0,0109
е) при остатке шлака после скачивания 300 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0015	0,0075	0,0068	0,0134
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0365	0,0095	0,0088	0,0154
ж) при остатке шлака после скачивания 400 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0020	0,0100	0,0090	0,0178
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0370	0,0120	0,0110	0,0198
з) при остатке шлака после скачивания 500 кг:				
– в чугуне, % от массы чугуна	0,035	0,002	0,002	0,002
– в шлаке, % от массы чугуна	0,0025	0,0125	0,0112	0,0223
– всего в системе «чугун-шлак», % от массы чугуна	0,0375	0,0145	0,0132	0,0243

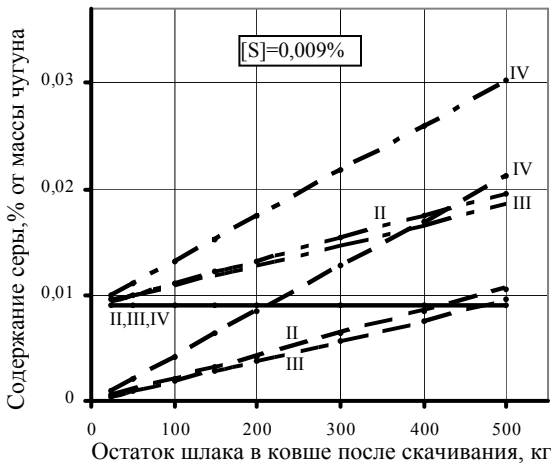


Рис.2. Зависимость содержания серы (вносимое в конвертер) в ковшевом шлаке, в чугуне и всего в системе «чугун – шлак» от количества ковшевого шлака, остающегося после скачивания. Содержание серы в чугуне после десульфурации 0,009%. Цифры у линий – номер варианта технологии десульфурации. — в чугуне; - - - в ковшевом шлаке; - · - всего в чугуне и шлаке.

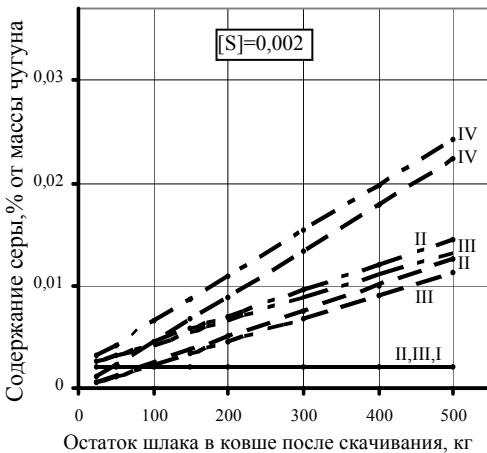


Рис.3. Зависимость содержания серы (вносимое в конвертер) в ковшевом шлаке, в чугуне и всего в системе «чугун – шлак» от количества ковшевого шлака, остающегося после скачивания.

Содержание серы в чугуне после десульфурации 0,005%.

Цифры у линий – номер варианта технологии десульфурации.

— в чугуне, -- в ковшевом шлаке, - · - всего в чугуне и шлаке.

Рис.4. Зависимость содержания серы (вносимое в конвертер) в ковшевом шлаке, в чугуне и всего в системе «чугун – шлак» от количества ковшевого шлака, остающегося после скачивания. Содержание серы в чугуне после десульфурации 0,002%. Цифры у линий – номер варианта технологии десульфурации. — в чугуне, -- в ковшевом шлаке, - · - всего в чугуне и шлаке.

При снижении серы до 0,005% (рис.3) этот предел снижения до 100–200 кг/ковш, а при особо глубокой десульфурации до 0,002% – до 50–100 кг/ковш (рис.4). В общем же анализируя изменение прихода серы с чугуном и шлаком (табл. 2, 3, 4 и рис.2, 3, 4) при различной глубине десульфурации чугуна и степени его очищения от шлака следует признать, что уже при количестве оставшегося шлака в ковше более 25–50 кг, (0,02–0,05% от массы чугуна) приход серы в конвертер с ковшевым шлаком может превышать 0,001% абсолютных. Поэтому для эффективного использования обессеренного чугуна для выплавки стали обязательным условием должно быть полное удаление ковшевого шлака после десульфур-

рации, остаток шлака в ковше не должен превышать 25 кг. Практически эта задача успешно решается на целом ряде заводов Европы, Азии и Америки применением современных машин скачивания шлака скребкового типа с одновременной продувкой чугуна азотом через днище ковша или погружаемую фурму («баблер») в период скачивания шлака.

Полученные в работе данные по массиву значений содержания серы в чугуне, шлаке и в целом в системе, позволяют оценить различные процессы десульфурации не только по эффективности удаления серы из чугуна, но и их совместимости с процессами дальнейшего его сталеплавильного передела. Из табл. 2,3, 4 и рис.2, 3, 4 видно, что при различных вариантах скачивания шлака и при одинаковом приходе серы с чугуном наименьший приход серы со шлаком и в целом с чугуном и шлаком происходит при инъекционных процессах вдувания гранулированного магния или смеси магния (например, с известью). Эти два процесса при различных содержаниях серы в чугуне практически равнозначны (см. варианты II и III на диаграммах рис.2, 3 и 4). Кроме этого они не требуют особых мер по подготовке чугуна к десульфурации или скачиванию шлака, поэтому внепечная обработка чугуна осуществляется в том состоянии системы «чугун – шлак», в каком расплав поступил от доменных печей.

Десульфурация чугуна известью с перемешиванием механической мешалкой в ковше сопровождается наибольшим содержанием серы в шлаке на различных стадиях удаления шлака (KR_{CaO} процесс, вариант IV), поэтому приводит к большему (практически вдвое) приходу серы со шлаком в шихту сталеплавильного агрегата и большим трудностям по удалению ковшевого шлака. Применение карбида кальция в KR -процессе вместо извести не устраняет указанные недостатки, а может лишь их усугубить за счет необходимости особо тщательного удаления шлака перед десульфурацией и ещё более высокого содержания серы в ковшевом шлаке после обработки. С учетом приведенного и ряда недостатков по реализации технологии в условиях современного крупно-промышленного производства стали десульфурация чугуна с применением механических мешалок не может быть рекомендована к применению, особенно при выплавке стали с низким и особо низким содержанием серы.

Инъекционные процессы с применением магнийсодержащих реагентов обеспечивают широкий круг преимуществ за счет быстроты реализации, стабильности, высокой эффективности, очень низких содержаний серы и одновременно относительно небольшого прихода серы со шлаком.

Выводы. Все процессы внепечной десульфурации чугуна сопровождаются переводом серы из металла в ковшевой шлак. При этом приход серы в конвертер с жидким чугуном уменьшается в 20–50 раз, но может увеличиться за счет попадания высокосернистого шлака, поэтому неотъемлемой операцией после десульфурации чугуна является тщательное удаление ковшевого шлака.

Наименьшее содержание серы (в%) в ковшевом шлаке характерно для процессов десульфурации чугуна вдуванием магнийсодержащих смесей или магния. Наибольшее содержание серы образуется в шлаках после механического перемешивания чугуна в ковше с засыпкой извести или карбидкальция.

Количество шлака в ковше с обессеренным чугуном должно быть не более 25–50 кг. Тщательное очищение шлака (вплоть до полного) решается применением современных машин скребкового типа с продувкой чугуна в ковше в период скачивания через пористую пробку или погружаемый баблер.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. // М.: Металлургия, 1980. – 239с.
2. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах. / С.В.Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др. // М.: Машиностроение, 1991. – 464с.
3. *Применение* низкосернистого чугуна при производстве кислородно-конвертерной стали. / Н.А. Воронова, Т.З. Гизатулин, М.Л. Лаврентьев и др. // *Сталь*, 1975. - № 7. – С. 604–605.
4. *Опыт* производства низкосернистых сталей повышенной прочности и хладостойкости для магистральных газопроводов в северном исполнении. / Я.А.Шнееров, В.Д. Чехранов, Н.А. Воронова и др. // *Бюллетень Черметинформации*. Москва, 1980. - № 9(969). – С.15–25.
5. *Опытнo-промышленное* опробование производства чугуна с супернизким содержанием серы для выплавки в конвертерах чистой по сере стали. / А.Ф.Шевченко, Н.Т. Ткач, Б.В. Двоскин и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1991, № 3. – С.7–9.
6. *Процесс* особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния в условиях крупно-промышленного производства. / А.Ф. Шевченко, А.С. Вергун, А.С.Булахтин и др. // *Металл и литье Украины*. 2006, № 1. – С. 84–89.
7. *Закономерности* изменения серы и магния при внепечной обработке чугуна магнием. / А.Ф. Шевченко, Л.П. Курилова, Н.Т. Ткач и др. // *Сб. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. Киев. Наукова думка. 1999, вып.3. – С.140–145.
8. *Оценка* количества серы, вносимой в конвертер с чугуном и шлаком при применении десульфурации чугуна. / Н.Т. Ткач, П.С. Лындя, А.Л. Руденко и др. // *Сб. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. Днепропетровск. 2005, вып.10. – С.104–108.
9. *Освоение* технологии производства сталей с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь». / А.А. Степанов, А.М. Ламухин, С.Д. Зинченко и др. // *Сб. трудов VII международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали*. Нижний Тагил. 20–24 сентября 2004 г. – С.83–87.
10. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. Докт. диссерт. – 1997. – Днепропетровск. – 252 с.

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