

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.267.642

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОВШЕВОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Ушаков С.Н.¹, Бигеев В.А.², Столляр А.М.², Потапова М.В.²¹ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия²Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены основные процессы ковшевой десульфурации чугуна: «Kanbara Reactor (KR)», «MMI» («Ukraine-Desmag») и «Co-injection». Приведены схемы используемых установок, реакции десульфурации, достоинства и недостатки каждого процесса. Произведено сравнение трех процессов между собой по следующим параметрам: продолжительность обработки, расход реагентов, потери железа, потери тепла, износ оборудования. Для удобства сравнения значения параметров приведены в относительных значениях (минимальное значение принято равным единице). Сравнение значений итогового параметра трех процессов ковшевой десульфурации чугуна показало, что наиболее рациональное – минимальное значение имеет параметр процесса «Co-injection» – соприкосновение в потоке азота гранулированного магния и извести. Данный процесс реализован на многих металлургических предприятиях мира, в том числе и в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В кислородно-конвертерном цехе построена и эксплуатируется новая установка десульфурации чугуна (УДЧ) соприкосновения реагентов. Приведена техническая характеристика УДЧ. В период освоения технологии ковшевой обработки чугуна установлены статистически значимые линейные зависимости степени десульфурации чугуна от продолжительности вдувания материалов азотом, суммарной массы реагентов, отношения массы флюидизированной извести к массе магния. Степень десульфурации чугуна изменилась в широком диапазоне от 50 до 87,5% и в среднем равнялась 77,3%. На современных металлургических предприятиях для ковшевой десульфурации чугуна наиболее востребованным является процесс «Co-injection», в котором осуществляется совместная инъекция в расплав гранулированного магния и извести в потоке азота. Этот процесс реализован и в ПАО «ММК». В кислородно-конвертерном цехе на установке десульфурации чугуна удаляется в среднем 83,5% серы с получением ее остаточного содержания 0,003% (данные за 15 месяцев работы).

Ключевые слова: жидкий чугун, ковш, десульфурация, процессы, сравнение, промышленная реализация.

Введение

В металлургии постоянно ужесточаются требования к содержанию серы в выплавляемой стали. Это объясняется увеличением спроса на сталь с низким (не более 0,005%) и особонизким (не более 0,001%) содержанием серы, в частности для труб магистральных газопроводов, работающих в условиях Крайнего Севера или морского бассейна («Северный Поток-2») [1, 2].

Для производства низкосернистой конвертерной стали необходимо иметь низкое содержание серы в главном шихтовом материале – жидким чугуне. Однако получение передельного чугуна с содержанием серы ниже 0,015% связано с ухудшением технико-экономических показателей доменного процесса, поэтому широкое распространение получили различные методы внедоменной

– ковшевой обработки жидкого чугуна. Десульфурация чугуна имеет преимущество по сравнению с удалением серы из стали [3–5]. Это связано с повышенной химической активностью серы в чугуне, обусловленной высоким содержанием в нем углерода и кремния.

Процессы современной ковшевой десульфурации чугуна

Основными процессами современной ковшевой десульфурации чугуна являются [6]:

- «Kanbara Reactor (KR)»,
- «MMI» («Ukraine-Desmag»),
- «Co-injection».

Процесс «KR» был разработан в Японии компанией «Nippon Steel» в 1963 г. Основным реагентом является известь, иногда с добавлением около 10% от общего расхода плавикового шпата (CaF_2) или глинозема (Al_2O_3). Реагент вводится в чугун через вращающуюся со средней скоростью 100–120 об/мин форшум в потоке азота (рис. 1).

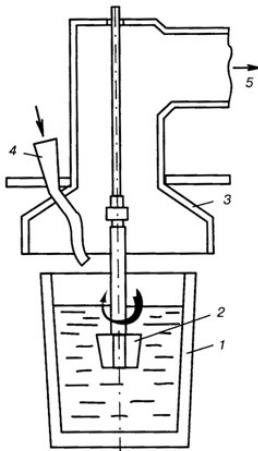
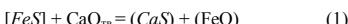


Рис. 1. Схема установки процесса «KR»:

- 1 – заливочный ковш с жидким чугуном;
2 – ротор-мешалка; 3 – колпак для пылеулавливания; 4 – подача десульфуратора;
5 – отвод газов

Фурма оснащена четырьмя массивными лопатками для интенсивного перемешивания чугуна в заливочном ковше. Вследствие перемешивания расплава размер пузырьков транспортирующего газа уменьшается, а время контакта извести в чугуне увеличивается по сравнению со статической инъекцией.

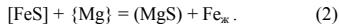
Реакция десульфурации



кинетически затруднена, так как известь сначала должна асимилироваться шлаковой фазой и лишь после этого принять участие в рафинировочном процессе. Расход извести на ковшевую десульфурацию чугуна довольно высок, что приводит к значительному охлаждению металла, увеличению количества шлака и его загущению. Это служит причиной потери чугуна при скачивания шлака из ковша после обработки. Недостатком процесса также является повышенный износ футеровки стен заливочного ковша и необходимость в большом свободном борте ковша.

Процесс «MMI» («Ukraine-Desmag») был разработан в 1969–1971 гг. в Национальной академии наук Украины (СССР). В этом процессе для десульфурации чугуна используется один из самых эффективных реагентов – гранулированный магний.

Десульфурация чугуна происходит по реакции



Технологические особенности десульфурации чугуна магнием обусловлены его физическими свойствами: низкой плотностью в твердом ($1,67 \text{ т/m}^3$) и жидком ($1,58 \text{ т/m}^3$) состоянии, чрезвычайно низкими температурами плавления (651°C) и кипения (1110°C). При температуре чугуна $1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ введенный в него магний переходит в состояние перегретого пара. Это, с одной стороны, способствует лучшему контакту реагента с чугуном, а с другой – ведет к возможности выброса металла из ковша и сгорания паров магния в воздушной атмосфере. Поэтому для лучшего протекания процесса десульфурации чугуна необходимо замедление испарения магния и увеличение времени пребывания его в глубине металлической ванны. Для этого в процессе «MMI» гранулированный магний используется в виде частиц размером $0,5\text{--}2,0 \text{ мм}$, покрытых соляной пленкой, и вводится в расплав в потоке инертного газа через фурму, наконечник которой имеет форму колокола – испарительной камеры для магния (рис. 2).

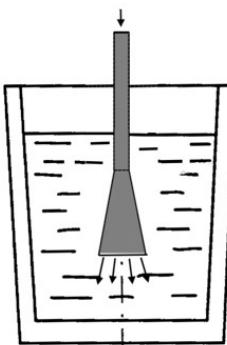


Рис. 2. Процесс «MMI» («Ukraine-Desmag»)

Недостатками процесса мононинжекции магния являются возможность протекания десульфурации и небольшое количество шлака.

Процесс «Co-injection» – это соинжекция (совместная инжекция) магния и извести. Он сочетает в себе достоинства обоих вышеуказанных процессов. Магний позволяет быстро удалять серу, а известь – достичь ее низких концентраций. Известь иногда заменяется карбидом кальция, который является более эффективным реагентом, но из-за проблем безопасности этот

вариант практически не используется. Совместное введение реагентов очень широко используется на металлургических предприятиях. Реагенты хранятся в различных бункерах и смешиваются только внутри нагнетательной линии. Десульфураторы вводятся в чугун через подвижную фурму, опускаемую сверху, через одно вертикально расположенное отверстие или через боковые отверстия (рис. 3).

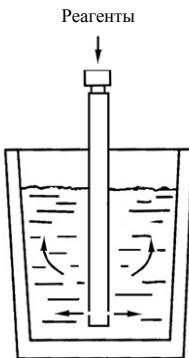


Рис. 3. Схема процесса «Co-injection»

В качестве транспортирующего газа обычно используется азот. Перемешивание чугуна в ковше создается газом-носителем и парами магния. Это обеспечивает достаточно хорошее распределение реагентов по всему объему ковша. Преимущество совместной инжекции в том, что в случае необходимости отношение между реагентами может легко изменяться.

Сравнение трех процессов ковшевой десульфурации чугуна [6] возможно по некоторым параметрам (табл. 1). Для удобства сравнения значения параметров приводятся в относительных значениях (минимальное значение принято равным единице).

Продолжительность обработки зависит от того, как быстро реагенты могут реагировать с се-рой. Так как магний намного эффективнее, чем известь, то процесс «MMI» является наименее продолжительным. Процесс «Co-injection» при совместном использовании магния и извести примерно на 10% дольше, чем процесс «MMI», однако при использовании магния и карбida кальция он может быть даже быстрее. Процесс «KR» требует наибольшего времени, чтобы предотвратить возвращение примесей из доменного шлака в жидкий чугун во время перемеши-

вания. Он занимает в среднем на 15% больше времени, чем процесс «Co-injection».

Таблица 1

Результаты сравнения различных процессов ковшевой десульфурации чугуна

Параметр	Процесс		
	«Kanbara Reactor (KR)»	«MMI» («Ukraine-Desmag»)	«Co-injection»
Продолжительность обработки	1,3	1	1,1
Расход реагентов	1	2,1	2,3
Потери железа	2,5	1	1
Потери тепла	3	1	1
Износ оборудования	2,4	1,7	1
Итого	10,2	6,8	6,4

В процессе «KR» расход извести невысокого качества может быть 10–20 кг/т чугуна. Расход дорогостоящего магния в процессе «MMI» для десульфурации составляет 0,5–1,0 кг/т чугуна. При совместной инжекции в среднем расходуется 0,5 кг/т магния и 2,0 кг/т извести. В табл. 1 относительные значения расхода реагентов в разных процессах приведены с учетом их стоимости.

Потеря железа в процессе скачивания шлака из ковша является серьезной проблемой для металлургических предприятий. Капли железа попадают в шлак, образуя с ним эмульсию. В целом около половины массы шлака – это железо в эмульсии. Следовательно, чем больше масса шлака, тем больше потери железа. В процессе «KR» потери железа в среднем в 2,5 раза больше, чем в сравниваемых процессах. В процессах «MMI» и «Co-injection» потери железа примерно одинаковы и составляют около 1%. Это объясняется тем, что, хотя процесс «MMI» характеризуется минимальным количеством шлака, но в шлаке из-за его низкой основности содержится больше железа в эмульсии.

В процессе ковшевой десульфурации температура чугуна снижается. Потери тепла возрастают с увеличением продолжительности обработки, расхода извести и турбулентности расплава, с уменьшением количества теплоизолирующего шлака и расхода магния. Процесс «KR» имеет наибольшие продолжительность и расход извести, высокую турбулентность, что ведет к наибольшим потерям тепла. Они в среднем в три раза выше, чем в двух других процессах. Потери тепла приmono и совместной инжекции примерно одинаковы – снижение температуры чугуна в процессе обработки не превышает 10°C. Это объясняется тем, что, хотя процесс сопрессии име-

ет несколько большую продолжительность по сравнению с моноинжекцией, но в нем ниже турбулентность расплава и толще слой шлака.

Износ оборудования (огнеупорной футеровки ковша и фурмы) лимитируется температурными условиями процесса и коррозионным воздействием металла и шлака. Для процесса «*KP*» турбулентность, создаваемая вращающейся фурмой, является одной из основных причин износа. Так же сама фурма более уязвима к износу, так как лопасти могут оторваться. Уменьшение рабочей поверхности лопаток приводит к меньшей турбулентности и, следовательно, процесс становится менее эффективным. Процесс «*MMI*» имеет меньше проблем с износом, чем процесс «*KR*», из-за меньшей турбулентности. Однако, поскольку используется магний вместо извести, основность шлака становится ниже, что приводит к увеличению коррозионного износа. Процесс совместной инжекции имеет меньшую турбулентность, чем процесс моноинжекции, и более высо-

кую основность шлака, поэтому футеровка ковша и фурма изнашиваются меньше.

Сравнение значений итогового параметра трех процессов ковшевой десульфурации чугуна (см. табл. 1) показывает, что наиболее рациональное – минимальное значение имеет параметр процесса «*Co-injection*». Поэтому в настоящее время он наиболее востребован на металлургических предприятиях мира.

Десульфурация чугуна в условиях ПАО «ММК»

В кислородно-конвертерном цехе ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» построена и эксплуатируется новая установка десульфурации чугуна (УДЧ) соинжекции реагентов. Техническая характеристика УДЧ приведена в табл. 2 [7].

Схема установки десульфурации чугуна представлена на рис. 4.

Таблица 2

Техническая характеристика УДЧ

Параметр	Значение
Годовая производительность установки, млн т чугуна	3,0
Количество мест для обработки, шт.	1
Минимальное содержание серы в чугуне после обработки, %	0,002
Продолжительность обработки металла одного ковша, мин	30
Продолжительность продувки от исходного содержания серы 0,025 %, мин	15
Удельный расход вдуваемой флюидизированной извести, кг/т	1,81
Удельный расход вдуваемого магния, кг/т	0,48
Газ-носитель	азот

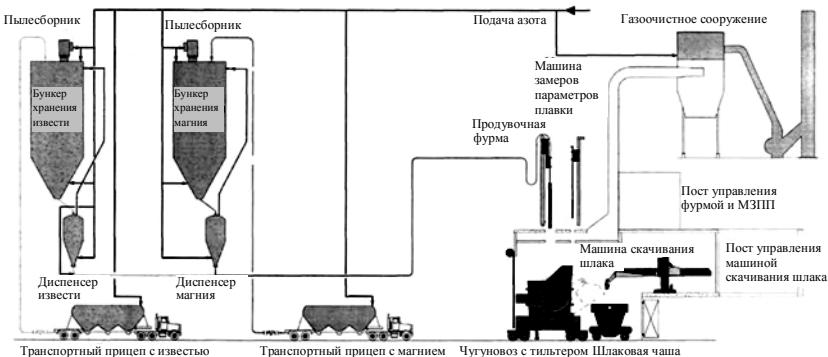


Рис. 4. Схема установки десульфурации чугуна

В загрузочный пролет ковши с чугуном вместимостью 320 т доставляются чугуновозом из участка перелива чугуна по траншею, откуда ковши заливочным краном передаются на установку десульфурации, где устанавливаются на один из чугуновозов УДЧ. В ковш с жидким чугуном опускается огнеупорная форма, через которую в потоке азота вдувается смесь реагентов из флюидизированной извести и магния. На разгрузочную площадку флюидизированная изесть и гранулированный магний доставляются в специальных грузовиках-цистернах, исключающих возможность взаимодействия извести с атмосферным воздухом и оборудованных устройствами для выгрузки порошковых материалов с помощью транспортирующего газа-азота. В качестве рабочей смеси используются магний Mg97 производства Соликамского завода десульфураторов и флюидизированная изесть производства ПАО «ММК». Качество флюидизированной извести оценивается следующими параметрами:

- массовая доля оксидов кальция и магния – 98,0%;
- массовая доля фракции более 100 мкм – 3,2% (не более 4,0%);
- потери массы при прокаливании – 1,4% (не более 3,5%);
- насыпная плотность во флюидизированном состоянии – 0,7 г/см³.

После окончания обработки ковш наклоняется, и шлак с поверхности чугуна скачивается в шлаковую чашу машинной скребкового типа. Затем чугуновоз УДЧ перемещается на позицию подъема ковша заливочным краном (две позиции), и ковш отправляется к конвертеру.

В период освоения технологии ковшевой обработки чугуна был проанализирован массив производственных данных из 89 плавков [8]. Степень десульфурации чугуна изменялась в широком диапазоне от 50 до 87,5%. В результате анализа установлены статистически значимые линейные зависимости степени десульфурации чугуна ($S_{\text{дн}}$, %) от продолжительности вдувания материалов азотом ($\tau_{\text{вд}}$, мин), суммарной массы реагентов ($R_{\text{сум}}$, кг), отношения массы флюидизированной извести к массе магния ($O_{\text{пax}}$):

$$S_{\text{дн}} = 0,489 \cdot \tau_{\text{вд}} + 67,66, \quad r = 0,302, \quad r_{0,01} = 0,272.$$

$$S_{\text{дн}} = 0,0282 \cdot R_{\text{сум}} + 54,82, \quad r = 0,552, \quad r_{0,001} = 0,343.$$

$$S_{\text{дн}} = 129,34 - 11,56 \cdot O_{\text{пax}}, \quad r = -0,689, \quad r_{0,001} = 0,343.$$

С увеличением продолжительности продувки азотом от 8 до 30 мин и суммарной массы вдуваемых реагентов от 295 до 1210 кг степень десульфурации чугуна линейно возрастает. Сравне-

ние абсолютных значений коэффициентов парной корреляции r полученных зависимостей показывает, что наиболее сильное влияние на процесс десульфурации чугуна оказало отношение массы флюидизированной извести к массе магния во вдуваемой смеси (рис. 5).

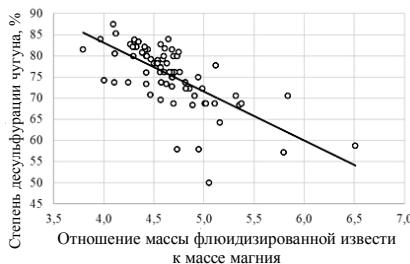


Рис. 5. Зависимость степени десульфурации чугуна от отношения массы флюидизированной извести к массе магния

С уменьшением этого отношения от 6,5 до 3,8 эффективность обработки растет, что свидетельствует о более высокой десульфурирующей способности магния в смеси реагентов. Исходное содержание серы составляло от 0,014 до 0,036% (в среднем 0,022%). Конечное содержание серы в чугуне изменялось в интервале от 0,003 до 0,008% и в среднем равнялось 0,005%.

Таким образом, при опробовании на УДЧ технологии ковшевой десульфурации чугуна с удельным расходом флюидизированной извести и магния 1,9 и 0,4 кг/т соответственно при продувке длительностью до 15 мин достигнута средняя степень десульфурации 77,3%.

Результаты промышленной эксплуатации УДЧ за 15 месяцев приведены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты ковшевой обработки чугуна

Параметр	Значение
Количество ковшев чугуна, шт.	5058
Продолжительность, мин:	
продувки	9,2
обработки	34,6
Средний расход, кг/т:	
флюидизированная	
изесть	1,72
магний	0,35
Снижение температуры чугуна, °C	6
Среднее содержание серы, %:	
до обработки	0,020
после обработки	0,0033
Средняя степень десульфурации чугуна, %	83,5

Из представленных данных видно, что после освоения технологии ковшевой десульфурации чугуна удалось получать содержание серы на уровне 0,003%, степень десульфурации металла увеличилась до 83,5%.

Достигнутые на УДЧ ККЦ ПАО «ММК» показатели ковшевой десульфурации чугуна находятся на уровне передовых металлургических предприятий. Технология процессов десульфурации чугуна в «большой» металлургии может быть использована и в литейном производстве [9].

Заключение

На современных металлургических предприятиях для ковшевой десульфурации чугуна наиболее востребованным является процесс «*Co-injection*», в котором осуществляется совместная инжекция в расплав гранулированного магния и извести в потоке азота. Этот процесс реализован и в ПАО «ММК». В кислородно-конвертерном цехе на установке десульфурации чугуна удаляется в среднем 83,5% серы с получением ее остаточного содержания 0,003%.

Список литературы

- Григорович К.В. Современные низкоуглеродистые микролегированные стали: пути развития технологий и параметры металлургического качества // Сборник трудов XIII Международного конгресса стальпавильщиков. Полевской: Эзапринт, 2014. С. 28–33.
- Эфрон Л.И. Металлование в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012. 696 с.
- Колесников Ю.А., Буданов Б.А., Столяров А.М. Металлургические технологии в высокопроизводительном конвертерном цехе: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 379 с.
- Результаты обработки расплава стали на агрегате «ковш-печь» с полыми электродами / В.А. Бигеев, Е.Б. Агапитов, М.М. Ерофеев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №1. С. 36–38.
- Сравнение ведущих методов десульфурации чугуна / Франк Шрама, Барт Ван дер Берг, Гвидо Ван Хатум // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 38–43.
- Производство трубной низкосернистой стали с ковшовой десульфурацией чугуна / С.Н. Ушаков, В.А. Авраменко, В.А. Бигеев, А.М. Столяров, М.В. Потапова // Металлург. 2017. №11. С. 47–50.
- Колокольцев В.М., Коток А.П., Долбилов К.А. Проблемы серы в литьевых сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №3. С. 30–32.
- Steel refining possibilities in LF / M. G. Dumitru, A. Ioana, N. Constantin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2018) 012018. doi:10.1088/1757-899X/294/1/012018.
- Management of Lime in Steel / Sanjeev Manocha, François Ponchon/Metals 2018, 8(9), 686; <https://doi.org/10.3390/met8090686>.
- Researches on the influence of slag addition and secondary treatment duration on steel quality / E Ardelean, M Ardelean, A Socalici // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477 (2019) 012010. doi:10.1088/1757-899X/477/1/012010.
- Improving the Desulphurization in COREX-3000 Process by the Optimization of Chemical Compositions of Slag / Shengli Wu, Laixin Wang, Yanan Lu, Kai Gu // ISIJ International doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-427
- Numerical Investigation of Desulfurization Kinetics in Gas-Stirred Ladles by a Quick Modeling Analysis Approach / Qing Cao, Laurentiu Nastac, April Pitts-Baggett, Qulin Yu // Metallurgical and Materials Transactions B. June 2018, vol. 49, iss. 3, pp. 988–1002.
- Effect of CaO-Al2O3-Based Synthetic Slag Additions on Desulphurisation Kinetics of Ladle Furnace Refining / Suguna Soumya Varanasi, R. K. Pathak, K. K. Sahoo, Venu Madhava Rao More, Dey Santanu, Sankar Reddy Alli // Transactions of the Indian Institute of Metals. (2019), pp. 1–6.

Поступила 29.01.19

Принята в печать 27.02.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

MODERN PROCESSES OF IRON DESULPHURATION IN THE LADLE

Sergey N. Ushakov – Deputy General Director Responsible for Production
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mcm@magtu.ru

Vakhit A. Bigeev – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Aleksandr M. Stolyarov – DSc (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Marina V. Potapova – PhD (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: marina_potapova8@mail.ru

Abstract. This paper examines the main processes of ladle desulfurization of cast iron, which include Kanbara

Reactor (KR), MMI ("Ukraine-Desmag") and Co-injection; describes the equipment set-up used, desulfuri-

zation reactions, as well as advantages and disadvantages of each process. The authors compare three different processes guided by the following parameters: processing time, consumption of reagents, iron loss, heat loss, equipment wear. For convenience, relative values of the parameters are given (the minimum value is assumed to be nominal, i.e. one). Comparison of the cast iron ladle desulfurization processes based on the final parameter values showed that the Co-injection process (the co-injection of magnesium granules and lime in the nitrogen stream) has the most rational – i.e. minimal – value. This process is adopted by numerous steel makers around the world, including MMK PJSC. A new iron desulfurization unit (IDU) was built and is now in operation at MMK's BOF site. The paper provides the IDU characteristics. During the adoption phase, probably significant linear dependencies were established of the desulfurization degree on the nitrogen injection time, the total weight of the reagents, the weight ratio of fluidized lime and magnesium. The iron desulfurization degree varied within a wide range of 50 to 87.5% and was on average 77.3%. The co-injection process is the most popular cast iron ladle desulfurization process in today's steel industry. It is also implemented at MMK PJSC. The iron desulfurization unit of the BOF shop removes an average of 83.5% of sulfur, and its residual concentration is 0.003% (data for 15 months).

Keywords: Liquid iron, ladle, desulfurization, processes, comparison, industrial implementation.

References

1. Grigorovich K.V. Modern low-carbon microalloyed steels: Ways to develop the technology and metallurgical quality parameters. *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnogo kongressa staleplavishchikov* [Proceedings of the 13th International Congress of Steelmakers]. Polevskoy: Ezprint, 2014, pp. 28–33. (In Russ.)
2. Efros L.I. *Metallovedenie v "bolshoy" metallurgii. Trubnye stali* [Metal science as part of "big" metallurgy. Pipe steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.)
3. Kolesnikov Yu.A., Budanov B.A., Stolyarov A.M. *Metallurgicheskie tekhnologii v vysokoproizvoditelnom konverternom tsekhе: uchebnoe posobie* [Metallurgical technologies in a high-performance converter shop: Learner's guide]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2015, 379 p. (In Russ.)
4. Bigeев V.A., Аgapitov E.B., Еrofeev M.M. et al. The results of steel processing in a ladle furnace with hollow electrodes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 1, pp. 36–38. (In Russ.)
5. Frank Schrama, Bart van der Berg, Guido van Hattum. A comparison of the leading hot metal desulfurization methods. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2015, no. 1 (16), pp. 38–43. (In Russ.)
6. Ushakov S.N., Avramenko V.A., Bigeев V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Production of low-sulfur pipe steel with ladle desulfurization of cast iron. *Metallurg* [Metallurgist], 2017, no. 11, pp. 47–50. (In Russ.)
7. Kolokoltsev V.M., Kotok A.P., Dolbilov K.A. Problems of sulfur in cast alloys. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 3, pp. 30–32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2014-3-30-32>. (In Russ.)
8. M.G. Dumitru, A. Ioana, N. Constantin. Steel refining possibilities in LF. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 294 (2018) 012018. doi:10.1088/1757-899X/294/1/012018.
9. Sanjeev Manocha, François Ponchon. Management of lime in steel. *Metals* 2018, 8(9), 686; <https://doi.org/10.3390/met08090686>.
10. E. Ardelean, M. Ardelean, A. Socailici. Researches on the influence of slag addition and secondary treatment duration on steel quality. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 477 (2019) 012010. doi:10.1088/1757-899X/477/1/012010.
11. Shengli Wu, Laixin Wang, Yanan Lu, Kai Gu. Improving the desulphurization in COREX-3000 process by the optimization of chemical compositions of slag. *ISIJ International*. doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-427.
12. Qing Cao, Laurentiu Nastac, April Pitts-Baggett, Qilin Yu. Numerical investigation of desulfurization kinetics in gas-stirred ladles by a quick modeling analysis approach. *Metallurgical and Materials Transactions B*. June 2018, vol. 49, no. 3, pp. 988–1002.
13. Suguna Sounnya Varanasi, R.K. Pathak, K.K. Sahoo, Venu Madhava Rao More, Dey Santanu, Sankar Reddy Alli. Effect of CaO-Al₂O₃-based synthetic slag additions on desulphurisation kinetics of ladle furnace refining. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, (2019), pp 1–6.

Received 29/01/19

Accepted 27/02/19

Образец для цитирования

Современные процессы ковшевой десульфурации чугуна / Ушаков С.Н., Бигеев В.А., Столяров А.М., Потапова М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 17–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>

For citation

Ushakov S.N., Bigeев V.A., Stolyarov A.M., Potapova M.V. Modern processes of iron desulphurization in the ladle. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 17–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-17-23>