ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol.27, 2019, №7-9 (314-316), 43-50 https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.043

УДК 669.162

А.Ф. Шевченко, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-0867-6825;

И.А. Маначин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-9795-6751

Б.В. Двоскин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-2891-7833

В.Г. Кисляков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-1775-5050

С.А. Шевченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-9289-9177

В.И. Елисеев, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com

А.С. Вергун, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-5493-9214

А.В. Остапенко, науч. сотр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Теоретические и технологические основы обменных процессов при инжекционной десульфурации чугуна различными реагентами

Представлены результаты расчетно-аналитических разработок для реализации наиболее рационального механизма различных технологий на основе вдувания извести и магния. Показано, что пути реализации рациональных решений и механизма этих процессов различны. При вдувании оксида кальция необходимо организовать химическое взаимодействие с участием вносимого извне Al, а также разрушение и диспергирование зоны истечения потока из фурмы в чугун при помощи газообразующих в чугуне добавок. Сопоставление расчетных удельных расходов различных восстановителей свидетельствует, что применение магния и марганца чугуна представляется наименее рациональным, так как сопровождается наибольшими удельными расходами. Для всех типоразмеров частиц скорость движения меньше 30 м/с является нерациональной, так как сопровождается резким уменьшением глубины внедрения частиц в расплав чугуна. Показано, что при вдувании порошкообразных молотых реагентов с диаметром частиц < 0,8 мм, частицы практически не внедряются в расплав чугуна. Такое явление является нежелательным, так как сопровождается резким уменьшением активной поверхности вводимого реагента. При моноинжекции магния необходимо обеспечить зернистый состав реагента и высокую (более 80 м/с) скорость истечения потока в расплав чугуна. При вдувании зернистых реагентов с диаметром частиц более 0,4 мм параметр скорости является определяющим, так как обеспечивает возможность внедрения частиц реагента в расплав чугуна на глубину вплоть до 20–25 мм. При соблюдении рекомендованных параметров вдувания зернистого магния в большинстве обработок чугуна содержание магния в чугуне после рафинирования превышает равновесные значения системы равновесия [Mg] – [S]. Последнее обеспечивает устойчивость и надежность процесса десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния. Обеспечивается степень десульфурации до 95–99 %. Теоретические положения подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: *магний, известь, инжекция, десульфурация, эффективность десульфурации, скорость частиц.*

Внепечная десульфурация чугуна и очищение чугуна от шлака заняли важное место в технологической цепи современного металлургического производства [1–5] получения жидкого чугуна и выплавки стали [1, 3, 4, 5]. Особенно это стало закономерным в связи с необходимостью выплавки низкосернистых и особочистых по сере сталей [2, 3, 5, 6], а также повышением экономичности процессов выплавки чугуна и стали.

В этой связи в последнее время существенно расширены и ужесточены требования к процессам подготовки жидкого чугуна к сталеплавильному переделу.

Перечень этих требований в основе включает следующее:

1. Процесс десульфурации чугуна должен устойчиво и надежно снижать содержание серы в чугуне с 0,015–0,120 до 0,05–0,015 %, а в части чугуна до < 0,001–0,002 %.

2. Степень гарантии комплекса показателей ≥ 95 %.

3. Продолжительность цикла всех операций внепечной обработки чугуна (постановка ковша, замер температуры чугуна, отбор проб, десульфурация и удаление шлака) должна составлять ≤ 20–25 мин.

4. Обеспечение внепечной обработки чугуна в

широких пределах исходной температуры расплава в ковше – 1220–1450 °С (в основе).

5. Наименьшие потери температуры чугуна – < 6–10 °С (в основе).

6. Наименьшие потери чугуна < 0,2 % (от массы чугуна в ковше).

7. Наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты.

8. Суммарные эксплуатационные затраты при внепечной обработке чугуна должны быть меньше затрат на удаление серы как в доменном, так и сталеплавильном производствах.

9. Исключение пылегазовых и других вредных выбросов.

В тоже время практика промышленного применения различных технологий десульфурации чугуна [1–3, 6–9] свидетельствует о недостаточной эффективности и стабильности в целом ряде случаев.

Выполненные авторами достаточно обширные исследования и тщательный анализ свидетельствуют о том, что разработчики процессов рафинирования весьма упрощенно представляли механизм обменных процессов, не учитывали комплексность всех процессов и, как следствие, не обеспечивали наиболее рациональные условия и параметры реализации технологии. Поэтому при выборе наиболее рациональных решений необходимо учитывать как термодинамику и кинетику обменных процессов, так и в обязательном порядке гидро- и аэродинамику в наиболее активной прифурменной зоне, особенно в области истечения двухфазного потока с реагентом.

Термодинамический анализ реакций взаимодействия различных веществ с серой чугуна [6] свидетельствует о том, что наиболее предпочтительными реагентами для десульфурации чугуна являются оксид кальция и магний (рис. 1), так как обеспечивают наиболее высокие значения (абсолютные) изменения энергии Гиббса. Важнейшим достоинством магния является способность насыщать чугун. Поэтому реакция его взаимодействия с растворенной в чугуне серой протекает не в зоне ввода его в расплав, но и во всем объеме рафинируемой ванны:

$$[Mg] + [S] \rightarrow (MgS). \quad (1)$$

Этим обеспечиваются возможности обеспечения высокой степени усвоения магния и наибольшая скорость удаления серы из чугуна.

Взаимодействие оксида кальция (CaO) с серой чугуна протекает обязательно с участием восстановителя (В), который должен «отобрать» кислород оксида кальция и образовать окиси (ВО):

$$CaO + B + [S] \rightarrow CaS + BO. \quad (2)$$

В роли восстановителя в этом процессе могут участвовать как компоненты рафинируемого чугуна [Mn], [C], [Si], так и вводимые в чугун извне, например Al и Mg. Последний вариант является более предпочтительным, так как сопровождается наибольшим изменением энергии Гиббса (см. рис. 1).

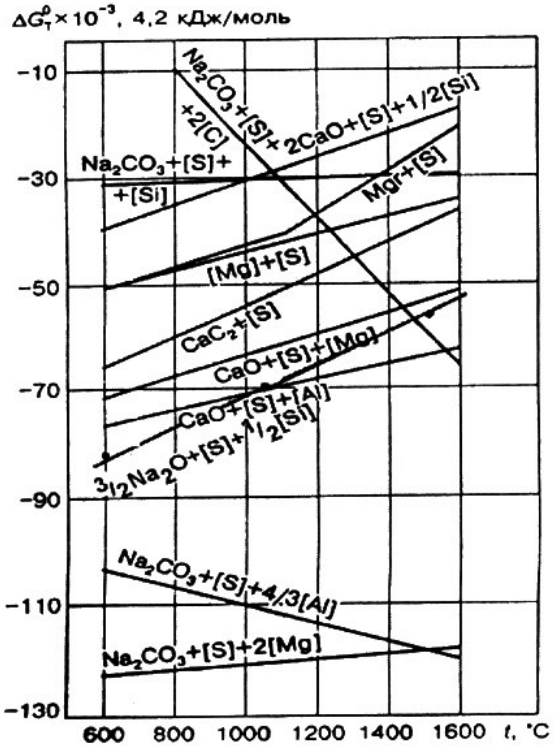

Рис. 1. Изменение величин энергии Гиббса при различной температуре чугуна для различных реакций взаимодействия основных реагентов с серой [6]

Сопоставление расчетных удельных расходов различных восстановителей (рис. 2) свидетельствует, что применение магния и марганца чугуна представляется наименее рациональным, так как сопровождается наибольшими удельными расходами.

При использовании магния для десульфурации чугуна он может взаимодействовать с серой расплава как в газообразном состоянии $\{Mg\}_{газ.}$, так и в растворенном виде $[Mg]_{раств}$. В первом случае магний может «работать» лишь в прифурменной зоне при всплывании пузырей, содержащих магний. Поэтому в этом варианте реализуется весьма нерациональный механизм массообменных процессов.

Если обеспечить благоприятные условия для растворения и насыщения чугуна магнием, то процесс его взаимодействия с серой чугуна активизируется не только в прифурменной зоне, но и во всем объеме ванны, куда перемещаются массы чугуна, содержащие магний растворенный.

Для насыщения чугуна магнием имеются ряд благоприятных условий. Так, если система [Mg] – [S] находится в состоянии равновесия, то содержание [Mg] может составлять (в зависимости от температуры и содержания серы) в основе от 0,002 до 0,050 % [6] (рис. 3).

Вместе с тем в этих же условиях предельные величины насыщения чугуна магнием значительно больше.

Так расчетные значения насыщенного содержания магния в чугуне $[Mg]_{нас.}$, по выражению Мариичек – Вороновой [10], изменяется в пределах 0,2–2,3 %, а в основных условиях десульфурации

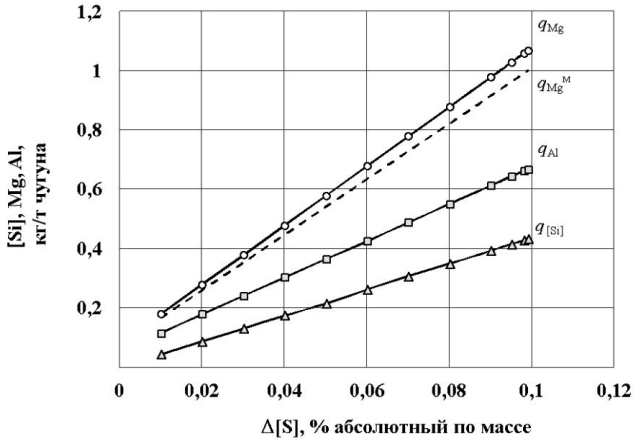

Рис. 2. Расчетные (стехиометрические) удельные расходы различных восстановителей в реакциях взаимодействия оксида кальция с серой чугуна. Усвоение вводимых Al и Mg принято 80 %

0,3–1,4 % (рис. 4), что практически на 2 порядка больше, чем $[Mg]_{равн}$.

Экспериментальная проверка данных промышленных обработок чугуна вдуванием зернистого магния в различные ковши подтверждает приведенный выше теоретический прогноз. При соблюдении рекомендованных параметров вдувания зернистого магния в большинстве обработок чугуна содержание магния в чугуне после рафинирования превы-

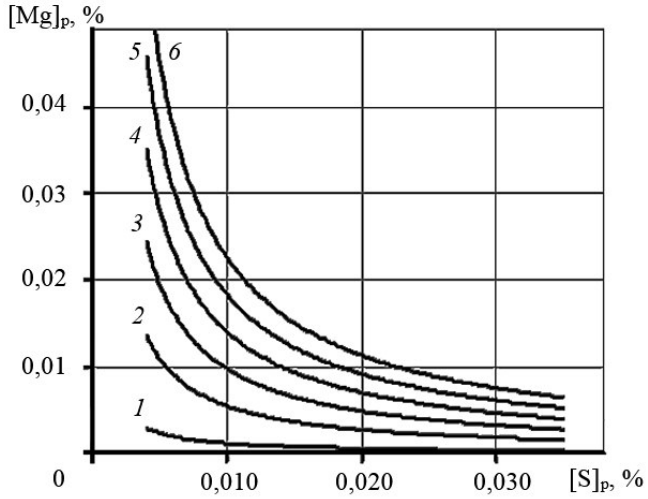

Рис. 3. Зависимость равновесного содержания магния $[Mg]_{равн.}$ в чугуне от содержания серы [S] при температуре чугуна: *1* – 1250 °С; *2* – 1300 °С; *3* – 1350 °С; *4* – 1400 °С; *5* – 1450 °С

шает равновесные значения системы равновесия [Mg] – [S] (рис. 5). Последнее обеспечивает устойчивость и надежность процесса десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния.

Более тщательный анализ результатов экспериментов показал, что колебание значений $[Mg]_{факт.}$ в основе обусловлен изменением температуры чугуна перед обработкой. При колебаниях температуры в пределах ±10 °С значение $[Mg]_{факт.}$ стабилизируется, но, как правило, выше $[Mg]_{равн.}$ на 0,004–0,01 %, чем $[Mg]_{равн.}$ (рис. 6). Вместе с тем предельное насыщение чугуна магнием в этих условиях значительно больше указанных величин. $[Mg]_{равн.}$ и $[Mg]_{факт.}$, так как состав-

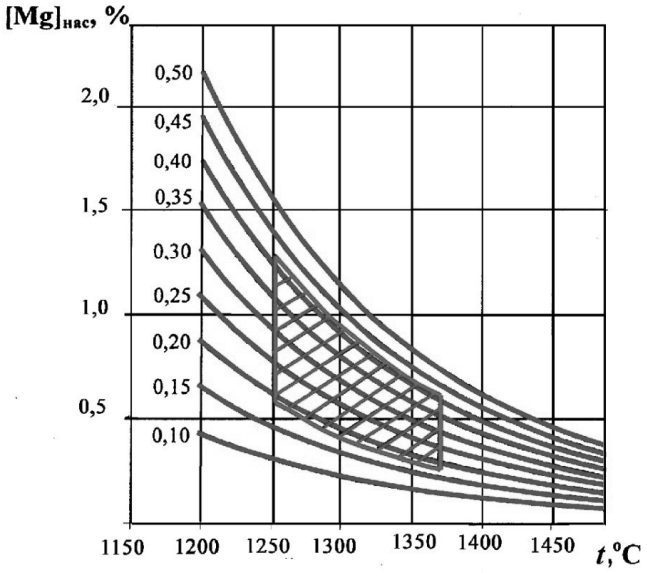

Рис. 4. Зависимость насыщения чугуна магнием ($[Mg]_{нас.}$) от температуры (*t*) чугуна. Цифры у кривых – давление в исследуемой зоне (МПа), заштрихованная область – зона наиболее характерных параметров ввода магния в жидкий чугун в ковше

ляет около 1,1 %, то есть расплав чугуна остался способным принимать магний, увеличивая [Mg] насыщенный.

Вторым весьма ответственным вопросом при инжекционной десульфурации чугуна является гидро- и аэродинамическая обстановка в зоне истечения двухфазного потока из фурмы в расплав чугуна, так

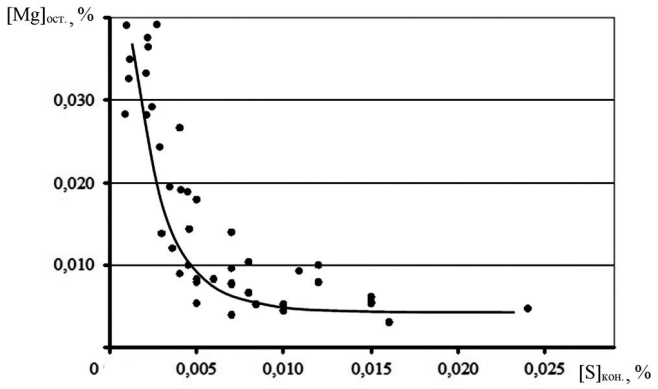

Рис. 5. Значения фактического содержания магния в чугуне ([Mg]) при различных содержаниях серы ($[S]_{факт.}$) после вдувания сернистого магния. о – точки $[Mg]_{факт.}$; – кривая – $[Mg]_{равн.}$; Температура чугуна 1290–1360 °С.

как необходимо обеспечить внедрение частиц реагента в жидкую ванну для взаимодействия с серой чугуна.

При математическом моделировании процессов взаимодействия двухфазных струй с жидким чугуном получены номограммы внедрения частиц различных реагентов в жидкий чугун. Одна из них представлена на рис. 7, из которого следует, что (рис. 7, *а*) скорость движения частиц и их диаметр являются важнейшими параметрами для всех реагентов и, особенно при выборе технологии их ввода в расплав.

Для всех типоразмеров частиц скорость движения

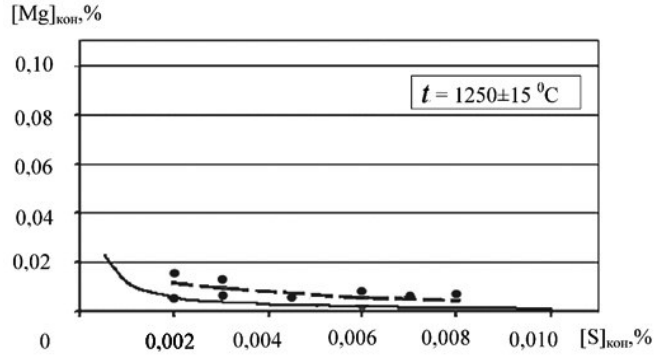

Рис. 6. Изменение величины равновесного содержания магния $[Mg]_{равн.}$ и фактического $[Mg]_{факт.}$ в чугуне после вдувания магния: — (кривая) – $[Mg]_{равн.}$; – – – (точки) – $[Mg]_{факт}$.

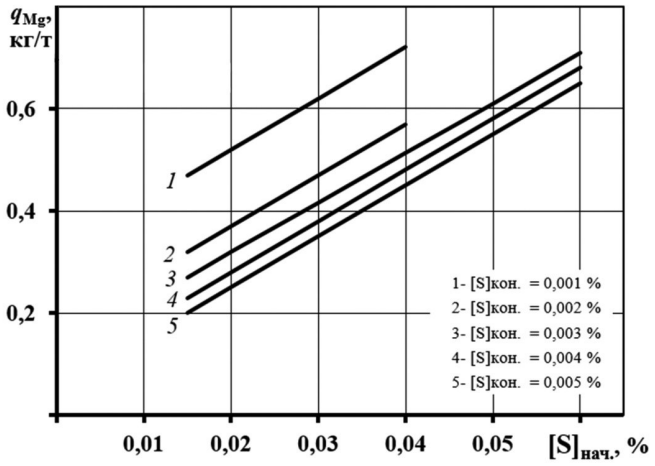

Рис. 8. Удельный фактический расход магния при моноинжекции зернистого магния в заливочных ковшах с массой чугуна более 150 т

меньше 30 м/с является нерациональной, так как сопровождается резким уменьшением глубины внедрения частиц в расплав чугуна (рис. 7, *а*). При вдувании порошкообразных молотых реагентов с диаметром частиц < 0,8 мм частицы практически не внедряются в расплав чугуна (рис. 7, *б*). Последнее обусловливает создание обстоятельств, при которых порошковые реагенты остаются в газовой среде, образуя в расплаве чугуна высококонцентрированные скопления вдуваемого реагента. Такое явление является нежелательным, так как сопровождается резким уменьшением активной поверхности вводимого реагента.

Из приведенного следует вывод о том, что при вдувании зернистых реагентов с диаметром частиц более 0,4 мм параметр скорости является определяющим, так как обеспечивает возможность внедрения частиц реагента в расплав чугуна на глубину вплоть до 20–25 мм (см. рис. 7, *а*). При вдувании же порошковых молотых реагентов с мелкодисперсными частицами ($d \leq 0,1$ мм в основе) возникают условия, когда частицы ввиду небольшой кинетической энергии незначительно внедряются в расплав, а накапливаются в прифурменной зоне, образуя высококонцентрированные скопления с диаметром до 120 мм [11] с ограниченной активной поверхностью. В этом случае необходимо реализовать дополнительные меры по дроблению этих образований (для увеличения активной поверхности реагента в расплаве).

Из приведенных результатов исследований следуют выводы в том, что для каждого применяемого реагента имеется свой наиболее рациональный механизм процесса и технологическая схема реализации.

Так в случае применения немагниевого реагента, например, молотой извести, необходимо индивидуально вводить в расплав чугуна Al. При вдувании извести в двухфазный поток необходимо вводить добавки, которые, не мешая процессу взаимодействия оксида кальция с серой, активно (взрывным характером) образовывали дополнительно газы и пары, этим разрывая скопления реагентов в зоне истечения струи из фурмы. Процесс вдувания осуществляется при концентрации порошка в газе 40–60 кг/нм^3 [6].

При десульфурации магнийсодержащим реагентом необходимо применять зернистый магний с диаметром частиц 0,3–1,5 мм. Пассивирующие и другие пассивирующие добавки исключаются. Процесс вдувания осуществляют в струе сухого азота и скорости на выходе из фурмы более 80 м/с. Этим

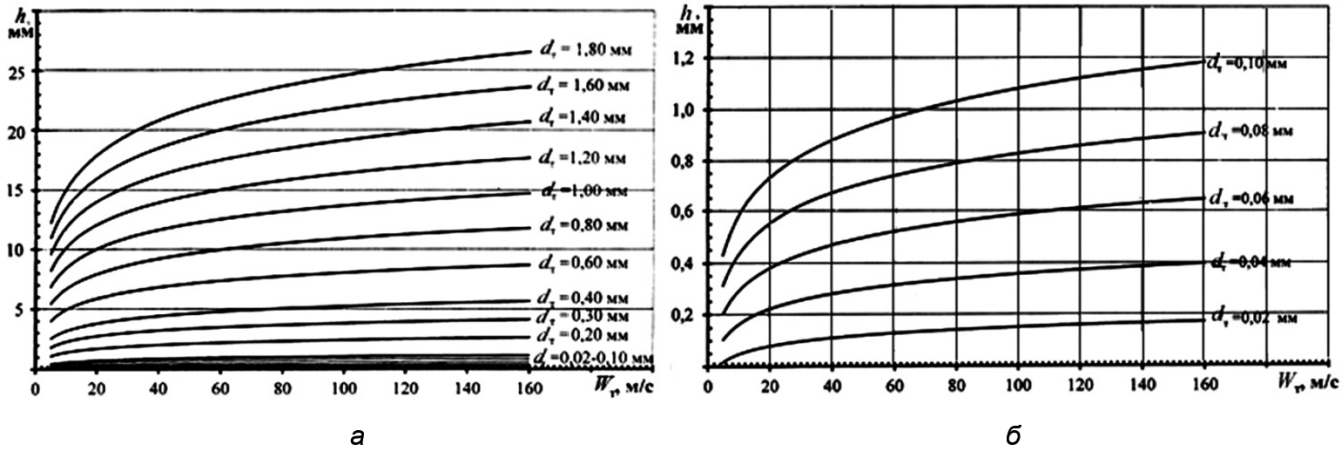

Рис. 7. Зависимость глубины внедрения (*h*) частиц реагентов в жидкий чугун от диаметра частиц ($d_т$) и частиц и скорости движения ($W_т$): *а* – при диаметре частиц от 0,05 до 1,6 мм; *б* – при диаметре частиц от 0,02 до 0,10 мм

обеспечивается надежное внедрение частиц магния в расплав чугуна и высокое парциальное давление магния в реакционной зоне.

Экспериментальная, опытная и промышленная проверка приведенных выше рекомендаций подтвердили их высокую рациональность. Так при десульфурации чугуна оксидом кальция, ввод в ковш Al, уменьшение концентрации извести в газе до 50 кг/нм^3, добавка к извести твердого газообразующего, использование диссоциирующего газа повысили степень десульфурации чугуна с 50–85 до 80–96 %, в том числе получение чугуна с содержанием серы ≤ 0,004–0,005 %.

При десульфурации чугуна моноинжекцией зернистого магния увеличена вдвое интенсивность ввода магния – вплоть до 25 кг/мин, увеличена скорость удаления серы и обеспечена гарантированная глубокая (≤ 0,005 %) и особо глубокая (≤ 0,001 %) десульфурация чугуна (рис. 8).

Результаты приведенной расчетно-аналитической разработки рекомендуются к использованию в новых и модернизируемых объектах внепечной десульфурации чугуна.

Выводы

1. При разработке и освоении процессов внепечной десульфурации чугуна различными реагентами необходимо учитывать, что все применяемые технологии имеют резервы для существенного улучшения показателей десульфурации, в том числе за счет оптимизации условий термодинамики, кинетики и гидро- и аэродинамики обменных процессов.

2. Имеющиеся резервы модернизации процессов следует разделить на группы магниевых и немагниевых реагентов, использование каждой имеет индивидуальные особенности.

3. При десульфурации немагниевыми реагентами (в основе это оксидом кальция – известью) процесс вдувания должен осуществляться с индивидуальным вводом в чугун Al. Во вдуваемый двухфазный поток вводится добавка, которая на выходе из фурмы в расплав взрывообразным характером испаряется и разрушает скопление порошка, увеличивая активную поверхность десульфурации в чугуне и рассредоточивая порошок в расплаве.

4. При десульфурации магнием должен применяться зернистый магний с диаметром частиц 0,3–1,6 мм и без разубоживающих и пассивирующих добавок. При скорости на выходе из фурмы более 50 м/с обеспечивается надежное вдувание магния с интенсивностью подачи до 25 кг/мин.

5. Разработанные предложения и рекомендации проверены в промышленных условиях. Обеспечивается степень десульфурации вплоть до 95–99 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М.* Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. Киев: Наукова думка, 2017. 205 с.
2. *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». М.: *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация».* 2005. № 4. С. 31–33.
3. *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.
4. *Кудрин В.А.* Внепечная обработка чугуна и стали. М.: Металлургия, 1992. 335 с.
5. *Найдек В.Л.* Повышение эффективности металлургических технологий внепечной обработки железоуглеродистых расплавов. Сб. докладов международной конференции. Производство стали в XXI веке. Прогнозы. Процессы, технологии, экономика. Киев: ЗАО «Укрсплав», 2000. С. 16–23.
6. *Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Вергун А.С.* и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. Днепропетровск. «Дніпро-VAL», 2017. 253 с.
7. *R. Hüsken, J. Kappel* Стратегия десульфурации в кислородно-конвертерном производстве стали. Металлургическое производство. Технология (МРТ). М.: VERLAG STAHLEI STEN GMBH. *Издательский дом «Руда и металлы».* 2013. № 1. С. 28–38.
8. *Зборщик А.М., Кубарский С.В., Косолап И.В.* Эффективность использования извести в современных процессах внедоменной десульфурации чугуна. М.: *Бюллетень «Черная металлургия».* 2011. № 12. С. 35–41.
9. *Nadif M., Suero I., Rodesly C.* Методы десульфурации на предприятиях Arcelor Mitall Fiat Western Europe. М.: *Новости черной металлургии за рубежом.* 2010. № 3. С. 32–34.
10. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. М.: Металлургия, 1982. 205 с.
11. *Охотский В.Б.* Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1993. 191 с.

Поступила 14.10.2019

REFERENCES

1. *Shevchenko, A.F., Bolshakov, V.I., Bashmakov, A.M.* (2017). Technology and equipment for the desulfurization of cast iron by magnesium in heavy duty buckets. Kyiv: Naukova Dumka, 205 p. [in Russian].
2. *Stepanov, A.A., Zinchenko, S.D., Lamukhin, A.I.* et al. (2005). Mastering the technology of steel production using a pig iron desulfurization unit in the conditions of the converter production of OJSC Severstal. Moscow: *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information,* no. 4, pp. 31–33 [in Russian].
3. *Ushakov, S.N., Avramenko, V.L., Bicheev, V.A., Stolyarov, A.M., Potapova, M.V.* (2017). Production of mild steel pipe with ladle desulfurization of cast iron. Moscow: *Metallurg,* no. 11, pp. 47–61 [in Russian].
4. *Kudrin, V.A.* (1992). Out-of-furnace treatment of cast iron and steel. Moscow: *Metallurgiya,* 335 p. [in Russian].
5. *Naidek, V.L.* (2000). Improving the efficiency of metallurgical technologies for out-of-furnace treatment of iron-carbon melts. *Collection of reports of the international conference. Steel production in the twenty-first century. Forecasts. Processes, technologies, economics.* Kyiv: Ed. CJSC "Ukrsplav", pp. 16–23 [in Russian].
6. *Shevchenko, A.F., Manachin, I.A., Vergun, A.S.* et al. (2017). Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Perfection. Dnipro: "Dnipro-VAL", 253 p. [in Russian].
7. *Hüsken, R., Kappel, J.* (2013). Desulfurization Strategy in Oxygen Converter Steel Production. Metallurgical in-dustry. Technology (MRI). Moscow: Ed. VERLAG STAHLEI STEN GMBH. *Publishing House "Ore and Metals",* no. 1, pp. 28–38 [in Russian].
8. *Zborschik, A.M., Kubersky, S.V., Kosolap, I.V.* (2011). Efficiency of lime use in modern processes of non-specified cast iron desulfurization. Moscow: *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information,* no. 12, pp. 35–41 [in Russian].
9. *Nadif, M., Suero, I., Rodesly, C.* (2010). Desulfurization Methods at Arcelor Mitall Flat Western Europe. Moscow: *Ferrous metallurgy news abroad,* no. 3, pp. 32–34 [in Russian].
10. *Voronova, N.A.* (1982). Desulfurization of cast iron by magnesium. Moscow: Metallurgiya, 205 p. [in Russian].
11. *Okhotsky, V.B.* (1993). Physico-chemical mechanics of steelmaking processes. Moscow: Metallurgiya, 191 p. [in Russian].

Received 14.10.2019

Анотація

А.П. Шевченко, д-р техн. наук, проф., пров. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-0867-6825; **І.О. Маначин,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-9795-6751**; Б.В. Двоскін,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-2891-7833; **В.Г. Кисляков,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-1775-5050; **С.А. Шевченко,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-9289-9177; **В.І. Єлісєєв,** канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com**;** **О.С. Вергун,** д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-5493-9214**;** **О.В. Остапенко,** наук. співр., e-mail: ovoch-isi@outlook.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Теоретичні та технологічні основи обмінних процесів при інжекційній десульфурації чавуну різними реагентами

Представлено результати розрахунковоаналітичних розробок для реалізації найбільш раціонального механізму різних технологій десульфурації чавуну на основі вдування вапна і магнію. Показано, що шляхи реалізації раціональних рішень і механізму цих процесів різні. При вдуванні оксиду кальцію необхідно організувати хімічну взаємодію за участю внесеного ззовні Al, а також руйнування і диспергування зони закінчення потоку з фурми в чавун за допомогою газоутворюючих в чавуні добавок. Зіставлення розрахункових питомих витрат різних відновників свідчить, що застосування магнію і марганцю чавуну представляється найменш раціональним, через те що супроводжується найбільшими питомими витратами. Для всіх типорозмірів частинок швидкість руху менше 30 м/с є нераціональною, оскільки супроводжується різким зменшенням глибини впровадження частинок в розплав чавуну. Показано, що при вдуванні порошкоподібних мелених реагентів з діаметром частинок < 0,8 мм, частинки практично не занурюються в розплав чавуну. Таке явище є небажаним, бо супроводжується різким зменшенням активної поверхні реагенту, що вводиться. При моноінжекції магнію необхідно забезпечити зернистий склад реагенту і високу (більше 80 м/с) швидкість витікання потоку в розплав чавуну. При вдуванні зернистих реагентів з діаметром частинок більше 0,4 мм параметр швидкості є визначальним, тому що забезпечує можливість занурення частинок реагенту в розплав чавуну на глибину аж до 20–25 мм. При дотриманні рекомендованих параметрів вдування зернистого магнію в більшості обробок чавуну вміст магнію в чавуні після рафінування перевищує рівноважні значення системи рівноваги [Mg] – [S]. Останнє забезпечує стійкість і надійність процесу десульфурації чавуну моноінжекцією зернистого магнію. Забезпечується ступінь десульфурації до 95–99 %. Теоретичні положення підтверджено експериментально.

Ключові слова *Магній, вапно, інжекція, десульфурація, ефективність десульфурації, швидкість частинок.*

Summary

A.F. Shevchenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Leading Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-0867-6825**;** **I.A. Manachin,** PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-9795-6751; **B.V. Dvoskin,** PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0003-2891-7833; **V.G. Kisliakov,** PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of Department, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-1775-5050; **S.A. Shevchenko,** PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0002-9289-9177; **V.I. Eliseev,** PhD (Phys. & Math.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com **A.S. Vergun,** Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com, https://orcid.org/0000-0001-5493-9214; **A.V. Ostapenko,** Researcher, e-mail: ovoch-isi@outlook.com

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Theoretical and technological bases of exchange processes during injection desulfurization of hot metal with various reagents

The results of calculation and analytical developments for the implementation of the most rational mechanism of various technologies of desulfurization of hot metal based on the injection of lime and magnesium are presented. It is shown, that the ways of implementing rational decisions and the mechanism of these processes are different. When blowing calcium oxide, it is necessary to organize a chemical interaction with the participation of Al introduced from outside, as well as the destruction and dispersion of the zone of flow from the lance into hot metal using gasforming additives in cast iron. A comparison of the calculated costs of various reducing agents indicates that the use of magnesium and hot metal manganese seems to be the least rational, since it is accompanied by the highest costs. For all particle sizes, a velocity of less than 80 m/s is irrational, since it is accompanied by a sharp decrease in the depth of particle penetration into the molten iron. It is shown, that when blowing powdered reagents with a particle diameter of < 0.8 mm, particles practically do not penetrate into the molten iron.

This phenomenon is undesirable, as it is accompanied by a sharp decrease in the active surface of the introduced reagent. In the case of mono-injection of magnesium, it is necessary to ensure a granular composition of the reagent and a high (more than 50 m/s) flow rate into the molten iron. When granular reagents with particle diameters of more than 0.4 mm are blown in, the velocity parameter is decisive, since it provides the possibility of introducing reagent particles into the hot metal to a depth of up to 20–25 mm. In accordance with the recommended parameters for the injection of granular magnesium in most hot metal treatments, the magnesium content in cast iron after refining exceeds the equilibrium values of the equilibrium system [Mg] – [S]. The latter provides stability and reliability of the process of hot metal desulfurization by mono-injection of granular magnesium. The degree of desulfurization is up to 95–99 %. Theoretical provisions are confirmed experimentally.

Keywords

Magnesium, lime, injection, desulfurization, desulfurization efficiency, particle velocity.