

МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ

УДК 669.162.463.2:721.4

© Зборщик А.М.¹, Харлашин П.С.², Косолап Н.В.³

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИЯ ДЛЯ ВНЕДОМЕННОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Проанализированы результаты теоретических, лабораторных и промышленных исследований десульфурации чугуна магнием. Показано, что изменение растворимости магния в чугуне не оказывает существенного влияния на эффективность десульфурации металла. При инжектировании гранулированного магния в чугун с использованием в качестве газа-носителя аргона или азота некоторое повышение эффективности использования десульфуратора может быть достигнуто в результате понижения концентрации магния в транспортирующем газе.

Ключевые слова: чугун, внедоменная десульфурация, магниевый, растворимость магния в чугуне, транспортирующий газ.

Зборщик О.М., Харлашин П.С., Косолап М.В. Шляхи підвищення ефективності використання магнію для позадоменної десульфуратії чавуну. Проаналізовані результати теоретичних, лабораторних та промислових досліджень десульфуратії чавуну магнієм. Показано, що змінення розчинності магнію у чавуні не оказує істотного впливу на ефективність десульфуратії металу. При інжектуванні гранульованого магнію у чавун з використанням як газа-носія аргону або азоту підвищення ефективності використання десульфуратора може бути досягнуте в результаті зниження концентрації магнію у транспортувальному газі.

Ключові слова: чавун, позадоменна десульфуратія, магній, розчинність магнію у чавуні, транспортувальний газ.

O.M. Zborshchik, P.S. Kharlashin, M.V. Kosolap. Methods of increasing magnesium utilization efficiency for out-of-furnace metal desulphurization. The results of theoretical, laboratory and industrial investigations of hot metal desulphurization with magnesium have been analyzed. It has been shown that the change of magnesium solubility in hot metal does not essentially influence metal desulphurization efficiency. When injecting of granulated magnesium in hot metal using argon or nitrogen as carrier gas some increase of desulfurator utilization efficiency can be achieved as a result of decrease of magnesium concentration in transport gas.

Keywords: hot metal, out-of-furnace desulphurization, magnesium, magnesium solubility in hot metal, carrier gas.

Постановка проблемы. Известны различные методы и механизмы десульфурации чугуна, в частности, путем введения магния. Однако недостаточно изучены вопросы, позволяющие однозначно описать изменение содержания серы и кислорода в металле при обработке магнием наиболее окисленных расплавов сталеплавильного производства.

Анализ последних исследований и публикаций. Различные представления о механизме десульфурации магнием приведены в работах [1-3]. В работах [4-6] исследована кинетика растворения магния в чугуне и установлены протекающие при этом реакции. Авторы работ [7, 8] показали, что реакции между магнием и серой чугуна протекают при высокой активности кислорода в расплаве, когда энергетически значительно более выгодным является взаимодействие

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ начальник доменного цеха ПАО «ММК им. Ильича» г. Мариуполь

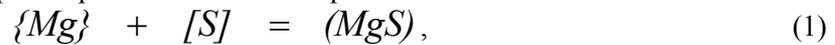
магния с растворенным в металле кислородом.

Предложена математическая модель [7], позволяющая количественно описать влияние изменения концентрации серы в металле и параметров технологического процесса на эффективность использования десульфураторов. Обоснование применения испарителя для повышения эффективности десульфурации приведено в работе [8].

Цель статьи – конкретизировать механизмы десульфурации металла при изменении растворимости магния в чугуне, а также оценить условия наибольшей эффективности магния при инжектировании.

Изложение основного материала. На сегодняшний день магний является единственным реагентом, который в промышленных масштабах используется для внедоменной десульфурации чугуна на металлургических предприятиях Украины. Вместе с тем это наиболее дорогой из применяемых для обработки чугуна десульфураторов. Поэтому актуальной задачей является поиск путей повышения эффективности использования магния на десульфурацию металла. Выбор технологических решений, способствующих росту эффективности использования десульфуратора, тесно связан с решением вопроса о механизме реакций между магнием и серой чугуна.

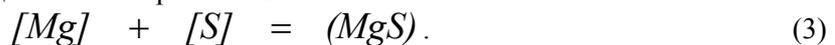
При обработке магнием десульфурация чугуна может протекать в результате взаимодействия парообразного магния с растворенной в металле серой



а также путем растворения магния в чугуне



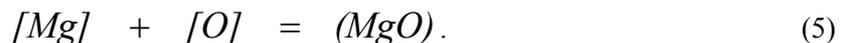
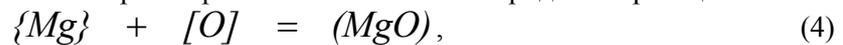
и последующего взаимодействия с серой в объеме металла



В современной научно-технической литературе широко распространено мнение, согласно которому при обработке чугуна магнием основное количество серы удаляется по реакции (3), скорость которой ограничена поступлением магния в металл по реакции (2) [1, 2]. Поэтому принято считать, что параметры технологического процесса должны обеспечивать условия для растворения в чугуне максимально возможного количества магния. Такие представления о механизме десульфурации металла основаны, главным образом, на сведениях о достаточно высокой растворимости магния в насыщенном углеродом железе и чугуне [1-3] и результатах лабораторных исследований кинетики реакций (2) и (3).

Наиболее представительные исследования кинетики растворения магния в чугуне и протекающих при этом реакций, результаты которых послужили основанием для вывода об удалении основного количества серы по реакции (3), описаны в работах [4-6]. Анализ этих работ показывает, что выводы авторов о механизме протекающих реакций основаны на анализе их кинетики и не учитывают термодинамические условия протекания реакции (3) в объеме чугуна.

Авторами работ [7, 8] показано, что реакции между магнием и серой чугуна протекают при высокой активности кислорода в расплаве, когда энергетически значительно более выгодным является взаимодействие магния с растворенным в металле кислородом по реакциям



В этих условиях реакция десульфурации может протекать у поверхности всплывающих в расплаве пузырей пара магния при условии, что скорость реакции (4) ограничена массоотдачей кислорода из объема металла. В этом случае активность кислорода у поверхности раздела фаз должна приближаться к равновесной с паром магния, в результате чего у поверхности всплывающих пузырей возникают условия для одновременного протекания реакций (1) и (4) независимо от окисленности металла в основном его объеме. Однако возможность образования сульфидов у поверхности всплывающих пузырей пара магния еще не обеспечивает десульфурацию металла в целом. Если образовавшиеся сульфиды не выносятся всплывающими пузырями в шлак или газовую фазу, в объеме чугуна в результате взаимодействия с растворенным в металле кислородом возможно образование термодинамически более устойчивых оксидов магния, сопровождаемое обратным переходом серы в обрабатываемый металл. Таким образом, десульфурацию чугуна магнием следует рассматривать как процесс, эффективность которого опреде-

ляется соотношением скоростей образования сульфидов по реакции (1) и частичного их окисления растворенным в металле кислородом, оксидами шлака и кислородом газовой фазы.

Описанные выше представления о механизме десульфурации металла позволили с достаточной точностью описать изменение содержания серы и кислорода в металле при обработке магнием значительно более окисленных расплавов сталеплавильного производства [7].

Так как численные значения коэффициентов диффузии кислорода и серы в жидком железе и его сплавах являются величинами одного порядка, можно предполагать, что реакция (1) также должна протекать в диффузионной области. Этот вывод подтверждается данными лабораторных и промышленных исследований десульфурации низко- и среднеуглеродистой стали [9], пердеельного [10, 11] и природнолегированного [7] чугунов, авторы которых сообщают, что процесс десульфурации с достаточной точностью может быть описан кинетическим уравнением реакции первого порядка относительно концентрации серы в металле. При этом значения энергии активации реакции при обработке стали и природнолегированного чугуна получены равными 74,1 и 30,4 кДж/моль [7, 9], что соответствует или близко к энергии активации реакций, лимитирующим звеном которых является диффузия примесей в жидком металле (41 – 164 кДж/моль [12]). Эти результаты дают основания утверждать, что при обработке чугуна магнием лимитирующим звеном реакции (1) является массоотдача серы из объема металла к поверхности всплывающих в расплаве пузырей пара десульфуратора.

Авторы работ [5, 6], также обнаружив первый порядок реакции между магнием и серой в насыщенном углеродом железе, считают, что около 90% удаляемой из металла серы взаимодействует с магнием по реакции (3) у поверхности присутствующих в расплаве сульфидных включений.

Возможность протекания реакции (3) у поверхности неметаллических включений в чугуне отрицать нельзя. Однако с выводом о доминирующей роли этой реакции в десульфурации металла трудно согласиться, так как при обработке чугуна магнием в промышленных условиях площадь поверхности раздела пузырей пара магния с металлом во много раз больше площади поверхности неметаллических включений. Подтверждением этому могут служить результаты оценки площади поверхности неметаллических включений в чугуне и поверхности раздела пузырей парообразного десульфуратора с металлом в ходе обработки 90 т чугуна при температуре 1350°C. В расчете предполагали, что магний подается в расплав через фурму с испарительной камерой в потоке азота, который с достаточной для практических целей точностью можно рассматривать как нейтральный по отношению к магнию газ [13]. Расход магния принимали равным 9 кг/мин, расход азота – 60 м³/ч, глубину ввода магния в металл – 2,1 м. Оценку площади поверхности неметаллических включений в чугуне проводили с использованием данных работ [5, 6], согласно которым в 1 см³ расплава может находиться до 10⁵ сульфидных включений диаметром 1,5 мкм. Плотность жидкого чугуна принимали равной 6300 кг/м³. При оценке площади поверхности пузырей десульфуратора в чугуне предполагали, что из испарительной камеры в металл поступает однородная смесь пара магния и азота, которая в объеме чугуна дробится на пузыри критического размера грибообразной формы. Оценку критического диаметра пузырей, скорости их движения и коэффициента формы пузыря выполняли с использованием рекомендаций работы [14]. Степень использования магния на десульфурацию чугуна в расчетах принимали равной 40%. В результате расчета площадь поверхности неметаллических включений в чугуне получена равной 10,1 м². Расчетная величина площади поверхности пузырей парообразного десульфуратора в металле в зависимости от выбранного значения коэффициента формы пузыря может изменяться от 191,6 до 239,5 м².

Косвенным подтверждением доминирующей роли реакции (1) в десульфурации чугуна магнием могут служить результаты исследований, согласно которым при малом количестве ковшевого шлака основное количество сульфидов магния выносятся из металла всплывающими пузырями и удаляется с отходящими газами [15-18]. В качестве примера на рис. 1 показана полученная по результатам исследований, выполненных на металлургических предприятиях Украины и Китая, зависимость массовой доли удаленной из чугуна серы, которая была усвоена шлаком, от толщины слоя шлака в ковше [18].

Исходя из предположения о взаимодействии между магнием и серой чугуна по реакции (1) и последующем окислении части образовавшихся сульфидов, предложена математическая модель [7, 19-21], которая позволяет количественно описать влияние изменения концентрации

серы в металле и параметров технологического процесса на эффективность использования десульфуратора, а также с достаточной точностью оценивать промышленные результаты десульфурации чугуна на основании данных лабораторного исследования [22].

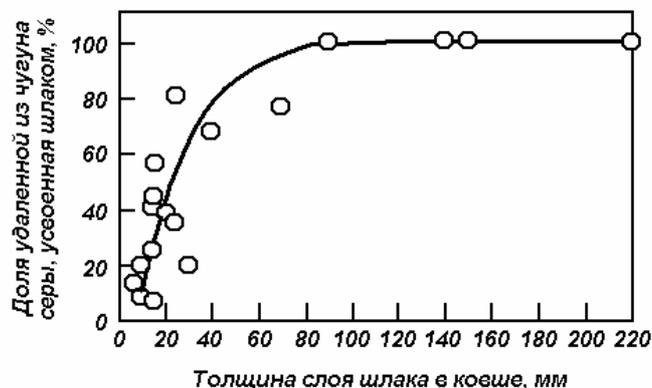


Рис. 1 – Зависимость массовой доли удаленной из чугуна серы, усвоенной шлаком, от толщины слоя шлака в ковше

Приведенные выше представления о механизме реакций при обработке чугуна магнием позволяют предполагать, что главной причиной повышения эффективности использования десульфуратора при понижении температуры обрабатываемого металла [1] является не увеличение растворимости магния в обрабатываемом чугуне, а уменьшение его окисленности. Для проверки этого предположения необходимо сравнить результаты обработки расплавов, которые при близких значениях окисленности характеризуются существенно различающейся растворимостью магния.

В связи с этим представляют интерес результаты анализа данных об эффективности десульфурации природнолегированного хромоникелевого чугуна (электропечного ферроникеля) в 30-т заливочных ковшах [23]. В ходе исследования чугун имел следующий химический состав, % мас.: 1,9 – 3,0 С; 1,2 – 2,2 Cr; 1,6 – 6,6 Si; 3,9 – 6,0 Ni; 0,2 – 0,4 Co; 0,09 – 0,14 P; 0,2 – 0,3 Mn; 0,024 – 0,119 S. Температура металла перед обработкой изменялась в пределах 1170 – 1340°C. Благодаря высокой концентрации кремния и никеля, растворимость магния в природнолегированном чугуне значительно выше, чем в передельном. Ниже приведены расчетные значения растворимости магния в передельном (ПЧ) и природнолегированном (ПЛЧ) чугунах. Расчеты проводились для передельного чугуна, содержащего 4,2% С, и природнолегированного чугуна, содержащего 2,7% С, 5% Ni и 1,6% Cr. Температуру металла в расчетах принимали равной 1260°C, парциальное давление пара магния над металлом – 0,1 МПа.

Чугун	ПЧ	ПЛЧ	ПЛЧ	ПЛЧ
Содержание кремния, %	0,6	3,0	4,5	6,0
Растворимость магния, %	0,735	0,878	1,121	1,433

Из приведенных данных видно, что, если эффективность обработки определяется величиной растворимости магния в металле, эффективность десульфурации природнолегированного чугуна должна быть значительно выше, чем передельного. Кроме того, эффективность десульфурации природнолегированного чугуна должна заметно увеличиваться по мере роста содержания в нем кремния.

Результаты десульфурации природнолегированного чугуна представлены на рис. 2 в виде зависимости между средними за время обработки значениями степени использования магния на десульфурацию чугуна ($\bar{\eta}_S$) и концентрации серы в металле ($[\bar{S}]$). Методика определения численных значений $\bar{\eta}_S$ и $[\bar{S}]$ описана в работах [7, 8, 23]. Чтобы установить влияние концен-

трации кремния в природнолегированном чугуна на эффективность использования десульфуратора представлены на рис. 2 результаты разбиты на три группы, содержание кремния в металле для каждой из которых находилось в пределах 1,6 – 3,5%, 3,5 – 5,0% и 5,0 – 6,6%. Как видно из рисунка, полученные результаты в пределах точности промышленного эксперимента не позволяют установить связь между эффективностью использования магния на десульфурацию природнолегированного чугуна и концентрацией кремния в нем. Имели место единичные случаи, когда содержание кремния в природнолегированном чугуна увеличивалось до 7 – 9%, однако увеличения эффективности использования десульфуратора при этом также не наблюдалось [23].

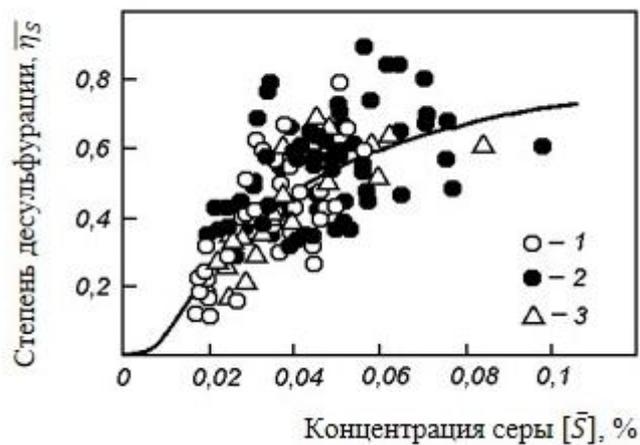


Рис. 2 – Зависимость степени использования магния на десульфурацию природнолегированного чугуна от концентрации серы в металле: 1 – 1,6 – 3,5% Si; 2 – 3,5 – 5,0% Si; 3 – 5,0 – 6,6% Si

Так как десульфурация передельного и природнолегированного чугунов выполняется в ковшах разной вместимости с использованием различных режимов обработки, сравнение результатов проводилось с использованием математической модели, описанной в работах [7, 19–21]. Установлено, что, несмотря на существенно различающуюся растворимость магния, эффективность десульфурации чугунов практически одинакова. Если результаты обработки передельного чугуна продувкой порошкообразным и гранулированным магнием в потоке воздуха, азота и природного газа описываются математической моделью с использованием кинетического коэффициента $K = 0,035 - 0,044 \text{ м}^{-1}$, то при десульфурации природнолегированного чугуна продувкой гранулированным магнием в потоке азота $K = 0,04 \text{ м}^{-1}$ [23].

Решение вопроса о механизме реакций при десульфурации чугуна магнием важно для выбора режима инжектирования магния в металл. Известно, что растворимость магния в чугуна подчиняется закону Генри, в соответствии с которым концентрация магния в металле пропорциональна парциальному давлению его пара в газовой фазе над расплавом [3]. Если предполагать, что доминирующая роль в десульфурации чугуна принадлежит реакции (3), необходимо создавать условия для растворения в обрабатываемом металле максимально возможного количества магния. С этой целью вдувание магния в чугуна рекомендуется вести с минимальными расходами газа-носителя при концентрации магния в газе более 15 кг/м^3 [2]. Если десульфурация чугуна протекает по реакции (1), повышению эффективности использования десульфуратора может способствовать увеличение расхода нейтрального по отношению к магнию газа-носителя, которое сопровождается увеличением объема и площади поверхности раздела парового десульфуратора с расплавом при равном количестве введенного в металл магния. При этом следует обратить внимание на то, что некоторое понижение парциального давления пара магния в пузырьках газообразного десульфуратора не приводит к уменьшению его десульфураторной способности. Авторами работы [3] экспериментально подтвержден экстремальный характер зависимости содержания серы в чугуна от концентрации растворенного в металле

магния и парциального давления его в контактирующей с металлом газовой фазе. Установлено, что минимальное остаточное содержание серы может быть получено при давлении пара магния над металлом около 30 кПа.

Известны опытно-промышленные исследования, результаты которых свидетельствуют об отсутствии негативного влияния подаваемого вместе с магнием в металл азота на результаты десульфурации чугуна и возможности повышения степени использования десульфуратора путем увеличения расхода газа.

Примером могут служить результаты исследований, проведенных на промышленной установке внедоменной десульфурации чугуна Донецкого металлургического завода, конструкция которой позволяла обрабатывать чугун слитковым магнием с регулируемой скоростью его подачи при одновременном вдувании в испарительную камеру воздуха [24]. Средняя скорость подачи магния в металл составляла около 8 кг/мин при расходе воздуха 80 м³/ч.

Расчеты показывали, что при таком режиме обработки 7,5% магния окисляется кислородом воздуха. Кроме того, в результате разбавления азотом парциальное давление пара магния в поступающей в металл смеси газов уменьшается на 13,4%. Согласно расчетам авторов работы [4] это приводит к уменьшению степени использования магния при растворении в чугуне более чем на 10%. Поэтому, если десульфурация чугуна протекает по реакции (3), подача воздуха в испарительную камеру должна приводить к значительному понижению степени использования десульфуратора в сравнении с обработкой чугуна чистым паром магния. Исходя из этого, была предпринята попытка повысить эффективность обработки путем использования испарителя, конструкция которого позволяла прекратить подачу воздуха в испарительную камеру после погружения испарителя в металл на заданную глубину и вести десульфурацию чугуна чистым паром магния [25].

Результаты обработки чугуна с вдуванием воздуха в испарительную камеру и без него показаны на рис. 3 [26]. Статистическая обработка данных на рис. 3а показывает, что при обработке чугуна магнием с подачей воздуха в испарительную камеру зависимость степени использования магния на десульфурацию чугуна от концентрации серы в металле описывается уравнением

$$\bar{\eta}_S = 1,20562 + 0,208753 \ln [\bar{S}]. \quad (6)$$

При работе без подачи в испарительную камеру воздуха (рис. 3б) аналогичная зависимость описывается уравнением

$$\bar{\eta}_S = \exp(-0,174262 - 0,0176259 / [\bar{S}]). \quad (7)$$

Данные на рис. 3а не позволяют с достаточной достоверностью установить характер зависимости степени использования магния от содержания серы в металле при средних за время обработки концентрациях серы менее 0,02%. При более высоких концентрациях серы средние значения степени использования магния при вдувании воздуха в испарительную камеру и без него практически не отличаются. Таким образом, обработка чугуна смесью пара магния и азота не только не ухудшала эффективность использования десульфуратора, но и позволяла компенсировать окисление части магния кислородом воздуха.

Отсутствие заметного влияния вдуваемого в испарительную камеру воздуха на результаты обработки можно объяснить взаимодействием между магнием и серой чугуна по гетерогенной реакции (1). В работе [27] показано, что при работе с подачей воздуха в испарительную камеру и без него зависимость степени использования магния на десульфурацию чугуна от концентрации серы в металле с достаточной точностью может быть описана уравнением

$$\bar{\eta}_S = 1 - e^{-\alpha [\bar{S}]} \quad (8)$$

с использованием значений коэффициента α равных соответственно 17 и 18,1. Такой характер зависимости имеет место, когда реакция протекает на поверхности всплывающих в металле пузырей парообразного десульфуратора, а скорость ее ограничена массоотдачей серы из объема металла [7, 19].

Скорость реакции (1) определяется величиной площади поверхности раздела парообразного десульфуратора с чугуном и интенсивностью перемешивания металла, от которой зависит величина коэффициента массоотдачи серы из объема чугуна. Авторами работ [26, 28] при об-

работке природнолегированного чугуна в 30-т заливочных ковшах изучена зависимость константы скорости в кинетическом уравнении реакции первого порядка относительно концентрации серы в чугуне от скорости диссипации энергии в металле. Десульфурацию чугуна вели с использованием гранулированного магния, который вводили в металл через фурму с испарительной камерой с одновременной независимой подачей в нее азота.

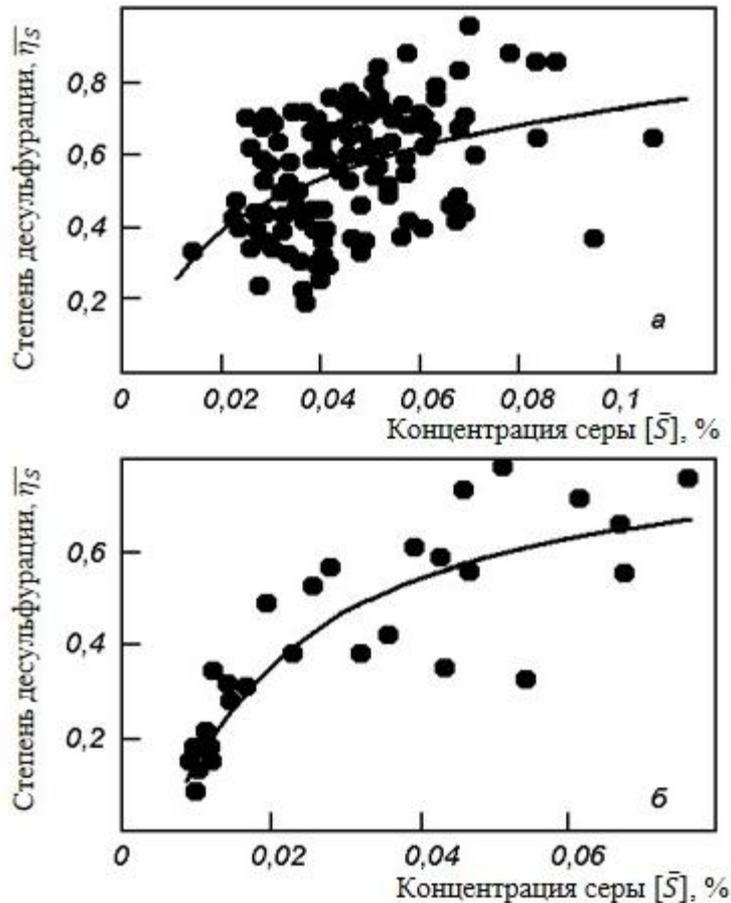


Рис. 3 – Зависимость степени использования магния на десульфурацию передельного чугуна от концентрации серы $[\bar{S}]$ в металле: а – при подаче воздуха в испарительную камеру; б – без подачи воздуха

Установлено (рис. 4), что при десульфурации металла в 30-т ковшах зависимость константы скорости реакции от величины скорости диссипации энергии описывается уравнением

$$k = 0,00363\varepsilon^{0,628}, \quad (9)$$

где k – константа скорости реакции, с^{-1} ; ε – скорость диссипации энергии, Вт/кг .

Из рис. 4 видно, что при сохранении скорости диссипации энергии на постоянном уровне изменение условий растворения магния в чугуне при различных соотношениях между количествами введенных в металл магния и азота не отражалось на величине константы скорости реакции.

В ходе описанных выше исследований отмечено, что в экспериментах, проведенных с ограниченной скоростью подачи в металл магния и повышенным расходом азота, степень использования магния на десульфурацию чугуна увеличивалась [28]. Результаты анализа влияния скорости диссипации энергии на величину коэффициента массоотдачи серы в чугуне, проведенного с использованием описанной в работах [7, 21] математической модели процесса десульфурации, свидетельствуют об отсутствии заметного роста коэффициента массоотдачи серы

при повышении скорости диссипации энергии от 0,5 до 1,5 Вт/кг [29]. Это позволяет утверждать, что отмеченное в проведенных экспериментах увеличение степени использования магния на десульфурацию чугуна было достигнуто в результате увеличения объема и площади поверхности раздела парообразного десульфуратора с металлом, отнесенных к единице массы введенного в расплав магния.



Рис. 4 – Влияние скорости диссипации энергии на величину константы скорости реакции при десульфурации природнолегированного чугуна: 1 – расход магния 0,058 – 0,066 кг/с, азота – 0,017 – 0,022 нм³/с; 2 – 0,033 кг/с и 0,017 – 0,022 нм³/с; 3 – 0,033 кг/с и 0,028 – 0,033 нм³/с

В пользу вывода о возможности повышения эффективности использования десульфуратора при ограничении скорости подачи магния в металл и увеличении расхода транспортирующего газа свидетельствует также анализ приведенных в работе [1] результатов десульфурации чугуна гранулированным магнием с использованием в качестве газа-носителя природного газа [21]. Использование природного газа позволило избежать окисления части вдуваемого в металл магния и уменьшило приход тепла в испарительную камеру. Это потребовало ограничения скорости ввода магния в металл с 12 – 15 до 5 – 8 кг/мин. При этом в результате термической диссоциации природного газа при температурах выше 1000°C по реакции



объем введенного в металл газа увеличивался вдвое. Это приводило к росту удельной площади поверхности раздела парообразного десульфуратора с металлом и увеличению степени использования магния на десульфурацию чугуна. Приведенные в работе [1] сведения об эффективности использования магния на десульфурацию металла при использовании в качестве газаносителя природного газа хорошо согласуются с результатами прогноза, выполненного с использованием математической модели, в основу которой положено предположение о взаимодействии между магнием и серой чугуна по реакции (1) [21].

Выводы

1. При обработке чугуна магнием основное количество серы удаляется из металла в результате взаимодействия с парообразным магнием у поверхности всплывающих в расплаве пузырей десульфуратора. Изменение условий растворения магния в обрабатываемом металле не оказывает существенного влияния на эффективность обработки.

2. Причиной повышения эффективности использования магния на десульфурацию металла при понижении температуры чугуна является уменьшение окисленности расплава.

При высокой температуре чугуна для повышения эффективности использования десульфуратора может быть использовано раскисление металла перед началом обработки, например, алюминием. Однако, учитывая высокую стоимость алюминиевой катанки и гранулированного алюминия, для выбора рациональной технологии ввода алюминия в металл и оценки экономи-

ческой эффективности предварительного раскисления чугуна алюминием требуются дополнительные исследования.

В связи с этим может представлять интерес использование для десульфурации чугуна вторичных магниевых сплавов. В ходе промышленных экспериментов показано, что при замене чистого магния вторичным сплавом, содержащим 12,2% алюминия, степень использования магния на десульфурацию чугуна увеличилась с 35,8 до 46,6% [30].

3. При инжектировании гранулированного магния в чугун в потоке аргона или азота использование режимов, когда концентрация магния в газе-носителе составляет 12 – 15 кг/м³ и более, оправдано, если оборудование отделения десульфурации чугуна должно обеспечивать максимально возможную его производительность. При низкой загрузке оборудования для повышения эффективности использования десульфуратора целесообразен переход к режимам, которые предусматривают ограничение скорости подачи магния и увеличение расхода газа.

Список использованных источников:

1. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием / Н.А. Воронова. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
2. Шевченко А.Ф. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах / А.Ф. Шевченко, В.И. Большаков, А.М. Башмаков. – Киев: НПП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2011. – 207 с.
3. Speer M.C., Parlee N.A.D. Dissolution and Desulfurization Reactions of Magnesium Vapor in Liquid Iron Alloys // AFS Cast Metals Research Journal. – 1972. – v.8. – №3. – P. 122-128.
4. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The kinetics of magnesium vapour dissolution into pig iron // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1976. – v.15. – №4. – P. 325-332.
5. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The kinetics of Molten Iron Desulfurization Using Magnesium Vapor // Metallurgical Transactions B. – v.12B. – December 1981. – P. 755-767.
6. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The role of an interfacial product layer in magnesium desulphurization of molten iron // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1982. – v.21. – №4. – P. 429-443.
7. Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок / А.М. Зборщик [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.
8. Зборщик А.М. Анализ термодинамики и кинетики десульфурации чугуна магнием. / А.М. Зборщик // Сталь. – 2001. – №7. – С. 17-20.
9. Исследование раскисления и десульфурации стали магнием. / Е.Ф. Мазуров [и др.] // Теория металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1977. – Вып. 4. – С. 32-45.
10. Мачикин В.И. О лимитирующем звене процессов десульфурации чугуна и стали магнием / В.И. Мачикин., А.М. Зборщик, Е.Н. Складановский // Известия вузов. Черная металлургия. – 1981. – №7. – С. 32-36.
11. Sandberg H. Desulphurization of hot metal // Ironmaking and Steelmaking. – 1977. – V.4. – №5. – P. 280-284.
12. Физико-химические основы металлургических процессов / А.А. Жуховицкий [и др.] – М.: Металлургия, 1973. – 392 с.
13. Зборщик А.М. Анализ результатов десульфурации чугуна инжектированием магния в потоке различных газов / А.М. Зборщик // Черная металлургия. – 2012. – №7. – С. 65-72.
14. Ефименко С.П. Внепечное рафинирование металла в газлифтах / С.П. Ефименко, В.И. Мачикин, Н.Т. Лифенко. – М.: Металлургия, 1986. – 264 с.
15. Мачикин В.И. Исследование десульфурации чугуна магнием / В.И. Мачикин, Е.Н. Складановский // Сталь. – 1979. – №4. – С. 251-254.
16. Сигарев Е.Н. Некоторые особенности десульфурации чугуна при внепечной обработке магнием / Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, К.И. Чубин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – №8. – С. 20-22.
17. Чернятевич А.Г. Особенности кинетики десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, К.И. Чубин // Теория и практика металлургии. – 2008. – №1. – С. 3-8.
18. Вергун А.С. Влияние количества ковшевого шлака на степень усвоения серы шлаком при внедоменной десульфурации чугуна гранулированным магнием / А.С. Вергун, А.Ф. Шевченко, П.С. Лындя // Теория и практика металлургии. – 2007. – №2-3. – С. 11-14.

19. Мачикин В.И. Математическое описание процессов десульфурации чугуна и стали щелочно-земельными металлами / В.И. Мачикин, А.М. Зборщик // Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. – №1. – С. 34-38.
20. Зборщик А.М. Математическая модель процесса десульфурации / А.М. Зборщик // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – №9. – С. 149-150.
21. Зборщик А.М. О десульфурации чугуна инжестированием магния в струе природного газа / А.М. Зборщик, Н.Т. Лифенко // Известия АН СССР. Металлы. – 1990. – №1. – С. 21-25.
22. Мачикин В.И. Оценка промышленных результатов обработки металла магнием по данным лабораторного исследования / В.И. Мачикин, А.М. Зборщик, И.В. Черкашин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – №12. – С. 145-146.
23. Зборщик А.М. Сравнение эффективности десульфурации магнием природно-легированного и передельного чугуна / А.М. Зборщик, Н.Т. Лифенко // Сталь. – 1998. – №2. – С. 10-12.
24. Мачикин В.И. Повышение качества черных металлов / В.И. Мачикин, А.М. Зборщик, Е.Н. Складановский. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.
25. Совершенствование оборудования для внепечной обработки чугуна / В.Ф. Омеляненко [и др.] // Металлург. – 1987. – №7. – С. 18-19.
26. Зборщик А.М. Влияние условий растворения магния в чугуне на эффективность десульфурации металла / А.М. Зборщик // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – №7. – С. 21-24.
27. Зборщик А.М. Особенности кинетики растворения магния в чугуне и их влияние на механизм десульфурации металла / А.М. Зборщик, Е.Н. Складановский // Известия вузов. – 2001. – №9. – С. 16-17.
28. Зборщик А.М. Влияние азота на эффективность десульфурации чугуна магнием / А.М. Зборщик, П.Е. Власов, И.В. Черкашин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. – №6. – С.157.
29. Зборщик А.М. Влияние скорости диссипации энергии на кинетику реакции десульфурации чугуна магнием / А.М. Зборщик // Металлы. – 1999. – №4. – С. 19-20.
30. Дворянинов В.А. Внедоменная десульфурация чугуна вторичным магниевым сплавом / В.А. Дворянинов [и др.] // Металлург. – 1979. – №9. – С. 14-17.

Bibliography:

1. Voronova N.A. Desulphurization with magnesium / N.A. Voronova. - Moscow: Metallurgiya, 1980. – 240 p. (Rus.)
2. Shevchenko A.F. Technology and equipment de sulfuratsii the magnesium in heavy buckets / A.F. Shevchenko, V.I. Bolshakov, A.M. Bashmakov. - Kiev: NPP «Vidavniststvo «Naukova Dumka» National Academy of Sciences of Ukraine», 2011. - 207 p. (Rus.)
3. Speer M.C., Parlee N.A.D. Dissolution and Desulfurization Reactions of Magnesium Va-por in Liquid Iron Alloys // AFS Cast Metals Research Journal. - 1972. - V.8. - № 3 . - P. 122-128.
4. rons G.A., Guthrie R.I.L. The kinetics of magnesium vapour dissolution into pig iron // Canadian Metallurgical Quarterly. - 1976. - V.15. - № 4. - P. 325-332.
5. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The kinetics of Molten Iron Desulfurization Using Magnesium Vapor // Metallurgical Transactions B. - V.12B. - December 1981 . - P. 755-767.
6. Irons G.A., Guthrie R.I.L. The role of an interfacial product layer in magnesium desul-phurization of molten iron // Canadian Metallurgical Quarterly. - 1982. - V.21. - № 4. - P. 429-443.
7. Pig iron with nodular graphite for large castings / A.M. Zborschik [etc.]. - M.: Mashinostroyeniye, 1995. - 128 p. (Rus.)
8. Zborschik A.M. Analysis of the thermodynamics and kinetics of magnesium desulphurization / A.M. Zborschik // Steel. - 2001. - №7. - P. 17-20. (Rus.)
9. Study steel deoxidation and desulfurization magnesium / E.F. Mazurov [etc.] // Theory of metallurgical webs. - Moscow: Metallurgy, 1977. - Issue 4. - P. 32-45. (Rus.)
10. Machikin V.I. About limiting link processes of iron and steel desulfurization magnesium / V.I. Machikin, A.M. Zborschik, E.N. Składanowski // Proceedings of the universities. Iron and steel. - 1981. - №7. - P. 32-36. (Rus.)
11. Sandberg H. Desulphurization of hot metal // Ironmaking and Steelmaking. - 1977. - V.4. - №5. -

- P. 280-284. (Rus.)
12. Physico-chemical basis of metallurgical processes / A.A. Zhukhovitskii [etc.]. - M.: Metallurgiya, 1973. – 392 p. (Rus.)
 13. Zborschik A.M. Analysis of the results desulphurization injection of magnesium in the flow of gases / A.M. Zborschik // Iron and steel. - 2012. - №7. - P. 65-72. (Rus.)
 14. Efimenko S.P. Furnace refining metal in gas lift / S.P. Efimenko, V.I. Machikin, N.T. Lifenko - Moscow: Metallurgiya, 1986. – 264 p. (Rus.)
 15. Machikin V.I. Investigation of hot metal desulphurization with magnesium / V.I. Machikin, E.N. Składanowski // Steel. - 1979. - №4. - P. 251-254. (Rus.)
 16. Sigarev E.N. Some features of desulphurization with magnesium furnace processing / E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich, K.I. Chubin // Proceedings of the universities. Iron and steel. - 2001. - № . - P. 20-22. (Rus.)
 17. Chernyatevich A.G. Chubin Kinetics of desulphurization injection of dispersed magnesium / A.G. Chernyatevich, E.N. Sigarev, K.I. Chubin // Theory and practice of metallurgy. - 2008. - №1. - P. 3-8. (Rus.)
 18. Vergun A.S. Effect of number of ladle slag on the degree of assimilation of sulfur in the slag is blast - hot metal desulphurization with granulated magnesium / A.S. Vergun, A.F. Shevchenko, P.S. Lyndya // Theory and practice of metallurgy. - 2007. - № 2-3. - P. 11-14. (Rus.)
 19. Machikin V.I. Mathematical description of the processes of iron and steel desulfurization alkaline earth metals / V.I. Machikin, A.M. Zborschik // Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy. - 1982. - №1. - P. 34-38. (Rus.)
 20. Zborschik A.M. Mathematical model of the desulfurization process / A.M. Zborschik // Proceedings vuschov. Iron and steel. - 1989. - №9. - P. 149-150. (Rus.)
 21. Zborschik A.M. On injection of magnesium desulphurization of natural gas in the jet A.M. Zborschik, N.T. Lifenko // Proceedings of the USSR. Metals. - 1990. - №1. - P. 21-25. (Rus.)
 22. Machikin V.I. Evaluation results of industrial metal processing magnesium according to laboratory research / V.I. Machikin, A.M. Zborschik, I.V. Tcherkashin // Proceedings of the universities. Iron and steel. - 1986. - № 12. - P. 145-146. (Rus.)
 23. Zborschik A.M. Comparison of the efficiency of desulfurization of natural magnesium - doped and pig iron / A.M.Zborschik, N.T. Lifenko // Steel. - 1998. - №2. - P. 10-12. (Rus.)
 24. Machikin V.I. Improving the quality of ferrous metals / V.I. Machikin, A.M. Zborschik, E.N. Składanowski. - K.: Tehnika, 1981. – 160 p. (Rus.)
 25. Improvement of equipment for secondary treatment of iron / V.F. Omel'yanenko[etc.] // Metallurg. - 1987. - №7. - P. 18-19. (Rus.)
 26. Zborschik A.M. Influence of conditions of dissolution of magnesium in the iron on the effectiveness of de sulfuratsii metal / A.M. Zborschik // Proceedings of the universities. Iron and steel. - 2010. - № 7. - P. 21-24. (Rus.)
 27. Zborschik A.M. Kinetics of dissolution of magnesium in the iron and their influence on the mechanism of metal desulfurization / A.M. Zborschik, E.N. Składanowski // Proceedings of the universities. - 2001. - №9. - P. 16-17. (Rus.)
 28. Zborschik A.M. Effect of nitrogen on the magnesium desulfurization efficiency / A.M. Zborschik, P.E. Vlasov, I.V. Cherkashin // Proceedings of the universities. Iron and steel. - 1986. – №6. – P. 157. (Rus.)
 29. Zborschik A.M. Influence of the energy dissipation rate on the reaction kinetics magnesium desulphurization / A.M. Zborschik // Metals. – 1999. – №4. – P. 19-20. (Rus.)
 30. Dvoryaninov V.A. Vnedomennaya desulphurization secondary magnesium alloy / V.A. Dvoryaninov [etc.] // Metallurg. - 1979. - №9. - P. 14-17. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 22.01.2014