

С. И. Семькин /к. т. н./, Т. С. Голуб /к. т. н./,
Е. В. Семькина
Институт черной металлургии НАН Украины

Особенности воздействия низковольтного потенциала на металлическую фазу в шлаке, формируемом при внепечной обработке чугуна гранулированным магнием

В работе приведены лабораторные данные по снижению потерь металла в виде корольков со шлаком в результате применения электрических воздействий малой удельной мощности при операциях внепечной обработки чугуна гранулированным магнием, подаваемым через погружную фурму. (Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.).

Ключевые слова: внепечная обработка чугуна, гранулированный магний, шлак, корольки металла, низковольтный электрический потенциал

The paper presents laboratory data to reduce losses of metal with slag like metal drops as a result of the effects of electrical influence of low power density at operations out of furnace treatment of iron with granulated magnesium supplied through an immersion lance.

Key words: out of furnace treatment of iron, granulated magnesium, slag, metal drops, low-voltage electrical potential

В Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ) выполняются работы по развитию научно-технических основ и изучению возможности расширения перечня технологических вариантов использования метода наложения низковольтных потенциалов [1], в частности на этапе внепечной обработки чугуна. В результате проведения комплекса теоретических, аналитических и технологических исследований на лабораторной установке при обработке чугуна порошковыми материалами в условиях наложения низковольтных потенциалов на фурму и металлический расплав было отмечено увеличение степени десульфурации металла и снижение потерь температуры за время обработки [2].

Целью данной работы было исследование характера воздействия низковольтного потенциала на металлическую фазу в шлаковом расплаве, формируемом при внепечной обработке чугуна гранулированным магнием.

Методика исследований

На лабораторном участке ИЧМ были выполнены опыты по обработке расплава чугуна гранулированным магнием (МПП-99 с фракцией $0,35 \times 10^{-3} \div 1,45 \times 10^{-3}$ м) в потоке нейтрального газа в ковше емкостью 100 кг, футерованном шамотным огнеупором, в том числе с применением метода наложения низковольтных потенциалов. Метод предполагает активизацию ра-

финировочных процессов при внепечной обработке чугуна газопорошковыми струями путем подвода низковольтного потенциала от источника постоянного тока к продувочному модулю и электроду.

Опыты проводили по двум методикам: 1) при использовании только гранулированного магния; 2) с дополнительной добавкой в ковш порошковой извести.

Основным правилом осуществляемых экспериментов было проведение парных опытов на металле одного состава, выплавленном в индукционной печи и разделенном на две примерно равные порции. При проведении экспериментов поддерживали сопоставимые расходные параметры по интенсивности ввода магния и количеству добавки извести в случае ее применения. Один из опытов был с подводом низковольтного потенциала к фурме и погружаемому контактному графитовому электроду (вариант 1), а второй – сравнительный, без электрических воздействий (вариант 2).

В опытах использовали синтетический чугуны, получаемый путем расплавления чугуновых отходов в индукционной печи ИП-100, который нагревали до температуры порядка 1500–1520 °С. Перед началом экспериментов выполняли подогрев футеровки ковша.

Перед продувкой и после ее окончания из ковша стальной ложкой отбирали начальную

и конечную пробу металла и шлака для последующего химического или спектрального анализа. После измельчения покровного шлака из него извлекали металлическую фазу – корольки, которую разделяли на фракции по их размерам, и выполняли химический анализ.

В табл. 1 приведены усредненные в пределах опытных вариантов данные о количестве металлических корольков в шлаковой фазе до и после обработки гранулированным магнием. Как показывает анализ, первичный (печной) шлак содержит порядка 10–17 % металлической фазы в виде мелких корольков. Шлак, сформированный после продувки магнием в потоке нейтрального газа, насыщен металлической фазой до 46,2 и 56,4 % соответственно, в вариантах с применением электрических потенциалов и без электрических воздействий.

Из табл. 1 видно, что за счет применения электрических потенциалов происходит снижение количества корольков в шлаке по сравнению с результатами опытов без электрических воздействий (на 9,2 и 10,2 %, соответственно, при использовании добавки извести и продувки только гранулированным магнием), а добавка извести в ковш на поверхность расплава приводит к существенному снижению доли корольков в конечном шлаке, несмотря на более высокое содержание корольков в первичном (печном) шлаке, причем в этом случае по сравнению с первичным (печным) шлаком в варианте с применением электрических потенциалов количество корольков за время обработки увеличилось только на 1,7 %, а без электрических воздействий – на 10,9 %.

Установленный факт существенного снижения доли корольков при корректировке химического состава покровного шлака, вероятно, можно пояснить механизмом, изложенным в работах [3–4], т. е. за счет увеличения поверхностных сил на границе шлака и металлических капель, препятствующих проникновению последних в шлак. В вариантах с применением электрических потенциалов определенную роль играет дополнительный разогрев шлакового расплава от прохождения тока, что снижает вязкость шлакового покрова, кроме того, возможен направленный перенос металлических капель в электрическом поле, как показано в работе [5].

Анализ фракционного состава металлических корольков (табл. 2) указывает еще на один возможный механизм влияния электрических потенциалов на снижение уровня насыщения шлака металлической фазой: создание условий для объединения мелких корольков в более крупную фракцию, которая быстрее оседает из шлакового расплава в металл. Так, установлено, что в варианте с применением электрического потенциала увеличивается доля корольков фракции $(1 \div 2) \times 10^{-3}$ м, и уменьшается доля фракции $(0,16 \div 0,25) \times 10^{-3}$ м.

Химический анализ корольков из различных по размерам фракций показал, что содержание серы и марганца в корольке зависит от его размера: чем меньше корольки, тем выше в нем содержание серы и марганца (рис. 1), что коррелируется с результатами работ других исследователей [6]. Однако следует отметить, что при обработке металла с применением низковольт-

Таблица 1

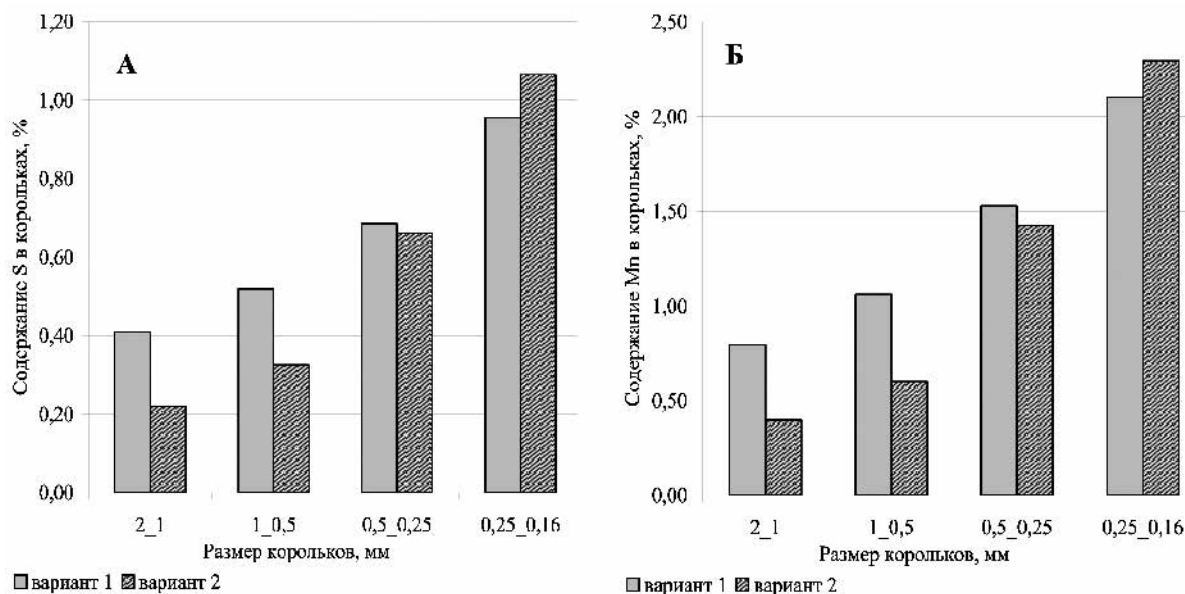
Усредненные за серию плавок параметры начального и конечного шлака при обработке чугуна гранулированным магнием

№ п/п	Опытные варианты	Вес пробы, кг	Вес шлака, кг	Вес корольков, кг	Доля корольков, %
Эксперименты без добавки извести в ковш					
1	Первичный шлак	0,0834	0,0750	0,0084	10,0
2	Шлак по варианту 1	0,0752	0,0391	0,0344	46,2
3	Шлак по варианту 2	0,0848	0,0368	0,0483	56,4
Эксперименты с добавкой извести в ковш					
1	Первичный шлак	0,0700	0,0580	0,0120	17,1
2	Шлак по варианту 1	0,1650	0,1300	0,0300	18,8
3	Шлак по варианту 2	0,1250	0,0900	0,0350	28,0

Таблица 2

Фракционный состав металлических корольков в шлаковой фазе, усредненный по опытным вариантам

№ п/п	Опытный вариант	Доля корольков в шлаковой фазе по фракциям, %				
		$0,16-0,25 \cdot 10^{-3}$ м	$0,25-0,50 \cdot 10^{-3}$ м	$0,50-1,0 \cdot 10^{-3}$ м	$1,0-2,0 \cdot 10^{-3}$ м	Более $2,0 \cdot 10^{-3}$ м
1	По варианту 1	19,6	20,7	17,5	35,1	7,1
2	По варианту 2	23,8	20,8	17,4	30,0	8,0



Вариант 1 – с электрическими воздействиями
Вариант 2 – без воздействий

Рис. 1. Усредненные показатели содержания серы (А) и марганца (Б) в корольках в зависимости от фракционного состава

ного потенциала уровень содержания оцениваемых компонентов был заметно выше, чем в варианте без электрических воздействий, только в более крупных корольках ($0,5 \times 10^{-3} \div 2,0 \times 10^{-3}$ м), а в мелких корольках ($0,16 \times 10^{-3} \div 0,5 \times 10^{-3}$ м) их содержание было меньше. Уровень содержания серы в корольках самой мелкой фракции (менее $0,16 \times 10^{-3}$ м) при экстраполяции величин на микроразмеры приближался к уровню содержания серы в шлаковой фазе для конкретного варианта. Это указывает на возможный процесс формирования части мелкой фракции корольков в результате химического взаимодействия с оксидами шлака и, соответственно, частичного перехода металлической матрицы из крупных корольков в шлак путем формирования в нем оксидов железа. При этом электрические воздействия, вероятно, усиливают процесс окисления железа из корольков, о чем свидетельствует снижение количества именно самой мелкой фракции корольков.

Было установлено, что содержание серы в корольках фракции $0,16 \times 10^{-3} \div 0,25 \times 10^{-3}$ м на плавках без воздействий увеличивается в 8,0–10,0 раз по сравнению с ее содержанием в конечном обработанном металле, в то время как на плавках с электрическими воздействиями это увеличение существенно больше и составляет 15–18 раз. При этом содержание марганца в корольках увеличивается только в 1,4–1,7 раза. Это можно пояснить тем, что сера, в первую очередь, является ярко выраженным поверхностно-активным элементом, и ее концентрация в поверхност-

ном слое выше, нежели в объеме металлического расплава.

При рассмотрении механизма формирования корольков можно выделить два этапа: 1) при операции обработки чугуна магнием, попадая в расплав, образует парогазовые пузырьки размером $2 \times 10^{-3} \div 10 \times 10^{-3}$ м, на поверхности которых адсорбируется сера; 2) при всплывании пузырьков происходит раскрытие газовой полости и схлопывание внутренней поверхности, обогащенной серой, с формированием металлических капель (корольков) размером $1,5 \times 10^{-3} \div 3,0 \times 10^{-3}$ м. Размер капли тесно связан с размером предшествующего ее появлению пузырька пара-газа магния. Так, для появления корольков со средним размером 2×10^{-3} м парогазовый пузырек должен иметь размеры порядка $8 \times 10^{-3} \div 10 \times 10^{-3}$ м. Металлическая капля, попадая в шлаковый расплав, начинает взаимодействовать с ним, в результате чего ее размер уменьшается за счет указанного выше процесса «растворения» матрицы – железа королька. Таким образом, содержание серы в корольках в значительной мере определяется процессом формирования капли металла и последующим изменением ее размера: чем меньше размер королька, тем выше содержание в нем остаточной серы.

Что касается марганца, то изменение уровня его содержания в корольке при диспергировании металла в большей мере определяется объемным распределением его в расплаве. Следовательно, при отрыве капли металла (королька)

уровень содержания в нем марганца практически не изменяется по сравнению с начальным содержанием марганца в основном металле, что можно проследить при анализе зависимостей, представленных на рис. 2.

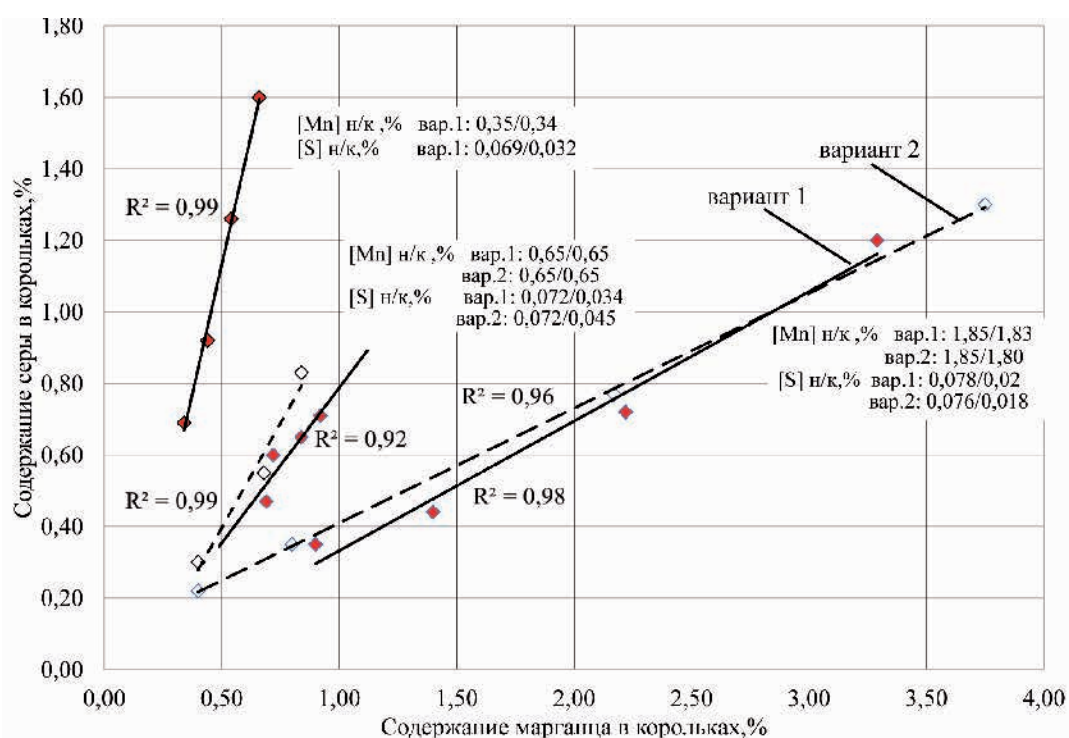
Дополнительное увеличение содержания серы и марганца в крупных корольках ($1 \times 10^{-3} \div 2 \times 10^{-3}$ м) при воздействии низковольтного потенциала, вероятно, определяется влиянием потенциала на одновременный перенос этих элементов из объема металла к поверхностным слоям расплава, из фрагментов которых впоследствии формируются металлические корольки.

Высокая степень связи между содержанием марганца и серы в корольках подтверждается также высокими коэффициентами корреляции ($R^2 : 0,92 - 0,99$) зависимостей (рис. 2). Это может свидетельствовать о том, что данные компоненты в корольках находятся во взаимосвязанных обобщенных комплексах, в результате чего перемещение этих элементов может происходить параллельно. Такой эффект уже отмечался ранее при анализе изменения содержания марганца и серы в металле при конвертерном процессе [7].

Как следует из анализа зависимостей, представленных на рис. 3, во всем изученном диапа-

зоне размеров корольков существует конкретное соотношение между количеством атомов серы и марганца, зависящее от начального содержания марганца в чугуна. Так, при содержании марганца в чугуна от 0,35 до 1,85 % соотношение количества атомов серы к количеству атомов марганца изменялось от 3 до 0,3 таким образом, что при низких содержаниях марганца в чугуна (на уровне 0,35 % мас.) по стехиометрии каждый атом марганца может удерживать возле себя три атома серы и, наоборот, при более высоком содержании марганца (на уровне 1,85 % мас.) уже один атом серы удерживает три атома марганца. Следовательно, в рамках каждого выбранного химического состава чугуна формируются корольки с конкретным химическим составом, причем соотношение серы и марганца выдерживается на определенном уровне, определяемом начальным содержанием марганца, независимо от размеров корольков металла, формируемых в шлаке.

При анализе распределения долей удаленной серы между тремя фазами – металлом корольков, шлаком и газовой фазой (рис. 3) – было установлено, что в варианте без воздействий (вариант 2) удаленная из основного расплава сера в большей мере поступает в шлако-



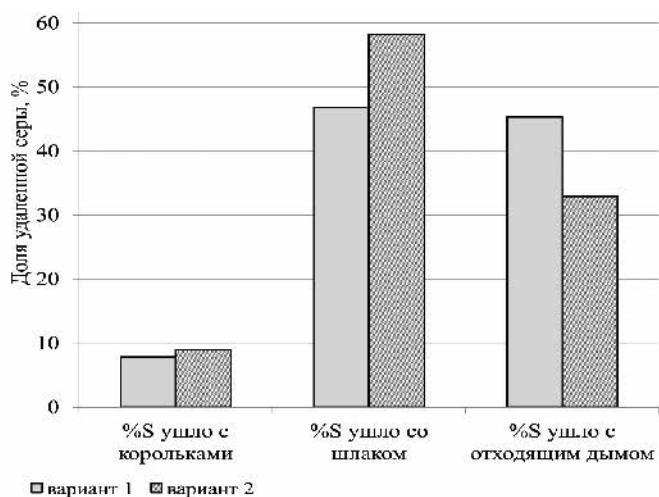
Вариант 1 – с электрическими воздействиями

Вариант 2 – без воздействий

«н» – начальный уровень содержания марганца [Mn] и серы [S] в металле

«к» – конечный уровень содержания марганца [Mn] и серы [S] в металле

Рис. 2. Зависимость содержания серы от содержания марганца в корольках, разделенных по фракциям, при различном начальном содержании марганца в металле



Вариант 1 – с электрическими воздействиями
 Вариант 2 – без воздействий

Рис. 3. Распределение удаленной серы между корольками, шлаком и газовой фазой

вый расплав и в меньшей мере аккумулируется в корольках, что коррелирует с данными других исследователей [8]. В варианте с воздействиями электрических потенциалов (вариант 1) было отмечено увеличение доли серы, уходящей в газовую фазу, что может быть результатом ее анодного выгорания. В составе корольков в этом варианте фиксируется меньше серы, что свидетельствует о снижении возможной ресульфурации основного металла при возврате части корольков за счет электрических воздействий.

Выводы

Таким образом, проведенные в ИЧМ лабораторные исследования по оценке применения метода наложения низковольтного потенциала на систему «продувочная фурма – жидкий металлический расплав» при обработке чугуна гранулированным магнием в потоке нейтрального газа показали положительное влияние электрических воздействий на шлаковую и металлическую фазу: заметно снизились неизбежные потери чугуна при его внепечной обработке в виде запутавшихся металлических корольков в шлаке, а также снизился уровень возможной ресульфурации чугуна при возврате корольков в металл.

Выявлено, что содержание серы в корольках в значительной мере определяется процессом формирования капли металла и последующим ее размером: чем меньше размер королька, тем выше содержание серы в нем.

Также было выявлено, что содержание серы и марганца в корольках при обработке чугуна магнием тесно взаимосвязаны.

Библиографический список

1. Ресурсо- и энергосберегающая технология конвертерной плавки с электрическими воздействиями / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, Е. В. Семькина, В. А. Шеремет [и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 11. – С. 46–48.
2. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях ИЧМ эффективности влияния электрических воздействий на расплав чугуна при его внепечном рафинировании гранулированным магнием / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, С. А. Дудченко, Т. С. Голуб, В. В. Вакульчук, Е. В. Семькина // *Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии*, сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ, 2013.
3. Опыт применения электрического воздействия при конвертерной плавке / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, В. А. Шеремет, А. В. Кекух, С. В. Троцкий, В. И. Макаренко // *Сталь*. – 2004. – № 6. – С. 37–38.
4. Технология конвертерной плавки с электрическим воздействием на ванну / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, Е. В. Семькина, А. Д. Зражевский [и др.] // *Литье и металлургия*. – Минск, 2002. – № 4. – С. 175–177.
5. Разработка и промышленное применение технологии конвертерной плавки с электрическими воздействиями на предприятиях Украины / С. И. Семькин, В. Ф. Поляков, Е. В. Семькина, В. И. Пищида [и др.] // *Труды IX Международной конференции сталеплавателей*, г. Старый Оскол, 27–28 октября 2006 г. – М.: Черметинформация, 2006. – С. 111–113.
6. Особенности структуры металлической и неметаллической фаз шлака, формирующегося в ковше в процессе десульфурации чугуна магнием без добавок / А. С. Вергун, А. М. Нестеренко, В. Г. Кисляков, А. Ф. Шевченко // *Теория и практика металлургии*. – 2009. – № 5–6. – С. 86–90.
7. Кияшко Т. С. Поведение серы и марганца в конвертерной ванне при воздействии низковольтного электрического потенциала / Т. С. Кияшко, С. И. Семькин // *Новости науки Приднепровья*. – 2008. – № 1. – С. 77–79.
8. Чернятевич А. Г. Особенности кинетики десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния / А. Г. Чернятевич, Е. Н. Сигарев, К. И. Чубин // *Теория практика металлургии*. – 2008. – № 1. – С. 3–8.

Поступила 11.08.2015