

Т. С. Голуб, С. И. Семькин, Е. В. Семькина

Институт чёрной металлургии НАН Украины, Днепропетровск

## Исследование возможностей повышения уровня остаточного марганца в металле при производстве низкоуглеродистых марок стали\*

*Приведены результаты исследования закономерностей влияния низковольтного электрического потенциала на конечный уровень содержания марганца в конвертерном металле в зависимости от содержания марганца в чугуне и углерода в металле на выпуске. Разработан и опробован эффективный вариант технологии, обеспечивающий экономию марганецсодержащих материалов при производстве низкоуглеродистой стали.*

**Ключевые слова:** низковольтный электрический потенциал, кислородно- конвертерная плавка, шлакометаллическая ванна, смена полярности потенциала, жидкофазное восстановление марганца

Как известно [1], в сталеплавильном производстве марганец в металл поступает с чугуном, в котором его содержание в среднем находится в пределах 0,3...1,0 %, и в небольших количествах с металлическим ломом, содержащим до 1,0 % марганца, однако в последнее время все чаще на переработку поступают низкомарганцовистые чугуны. Большая часть марганца, поступившего из чугуна, при конвертерной плавке окисляется и безвозвратно теряется со шлаком, особенно при наличии операции промежуточного его скачивания.

Ранее было показано [2, 3], что применение сменного варианта наложения низковольтного потенциала оказывает благоприятное воздействие на рафинировочные процессы и создаёт условия для повышенного уровня остаточного марганца в металле при производстве средне-углеродистых марок стали в кислородном конвертере.

В данной работе проанализировано влияние на степень окисления марганца из металла по ходу продувки, а также их возможность и величина восстановления марганца из шлака в металл при кислородной конвертерной плавке при производстве низкоуглеродистых марок стали (с содержанием углерода к окончанию продувки на уровне менее 0,25 %мас.).

**Цель работы.** Разработка и исследование эффективного варианта технологии наложения низковольтного электрического потенциала, обеспечивающего экономию марганецсодержащих материалов при производстве низкоуглеродистой стали в условиях пониженного начального уровня марганца в чугуне.

Проведённые опытно-промышленные исследования влияния электрического потенциала различной полярности на процессы шлакообразования в условиях 60-тонного конвертера позволили установить, что каждая из полярностей в тот или иной период кислородной продувки (первая треть продувки – интенсивное окисление кремния и марганца,

середина продувки – преимущественное окисление углерода и последняя треть продувки – возрастание скорости окисления железа) оказывает различное воздействие на динамику поведения компонентов металла и шлака, что, в результате, обеспечивает получение эффектов от применения низковольтного потенциала [2-4]. Опытным путём было установлено, что определённая ранее последовательность полярностей наложения маломощного электрического потенциала [3] не позволит решить поставленную в данной работе задачу. Однако было установлено, что для середины продувки плавки наиболее рациональной всё же является отрицательная полярность потенциала. В связи с этим задачей данной работы является определение влияния знака определённой полярности маломощного потенциала в начальный и конечный периоды продувки плавки в условиях производства низкоуглеродистых марок стали с низким уровнем начального содержания марганца.

Первоначально было проведено аналитическое исследование по установлению зависимости уровня конечного содержания марганца в металле в условиях применения неизменного по ходу продувки низковольтного электрического потенциала от: начального содержания марганца в чугуне, глубины обезуглероживания металлического расплава, а также по определению роли операции скачивания промежуточного шлака (на 8-9 минутах продувки).

Исследование выполнено по данным опытно-промышленных плавков, проведённых в условиях 60-тонного промышленного конвертера, оборудованного системой наложения маломощного электрического потенциала по вариантам: без воздействий; на фурме отрицательная полярность потенциала в течение всей продувки плавки; на фурме положительная полярность потенциала в течение всей продувки плавки; по двум технологическим схемам ведения плавки: А – без промежуточного скачиванием шлака и Б – со скачиванием промежуточного шлака.

\**Публикация содержит результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по конкурсному проекту (GP/F56/171)*

Известно, что конечный уровень марганца в металле тем выше, чем выше его начальный уровень в чугуна, и тем ниже, чем меньше уровень конечного содержания углерода в расплаве [1]. В связи с этим для анализа общий массив опытных плавков был разделён по исходному содержанию марганца в чугуна на три группы: [Mn] 0,1-0,3 – с содержанием марганца в чугуна 0,1-0,3 %мас.; [Mn] 0,3-0,6 – с содержанием марганца в чугуна 0,3-0,6 %мас. и [Mn] 0,6-0,9 – с содержанием марганца в чугуна 0,6-0,9 %мас. Затем каждая из групп в соответствии с вариантами была разделена по содержанию углерода в металле на выпуске, то есть к окончанию продувки плавки: [C] < 0,25 – содержание углерода до 0,25 %мас. (выплавка низкоуглеродистых марок стали) и [C] > 0,25 – содержание углерода в металле более 0,25 %мас. (выплавка среднеуглеродистых марок стали). Средние значения степени удаления марганца по вариантам опытных плавков и группам представлены в табл.1.

Для всех опытных вариантов отмечено, как и следовало ожидать [1] – чем ниже уровень конечного содержания углерода в металле, тем выше степень окисления марганца из расплава. К тому же на плавках, проведённых с операцией скачивания промежуточного шлака, величина степени окисления марганца была выше, чем на плавках, выполненных без такой операции.

Для всех опытных вариантов для плавков, проведённых без скачивания шлака, следует отметить, что, независимо от конечного содержания углерода в металле, наибольший уровень степеней удаления марганца из металла наблюдается при начальном содержании марганца в чугуна 0,3-0,6 %мас. В то же время на плавках, проведённых с промежуточным скачиванием шлака, отмечена тенденция к повышению величин степени окисления марганца с увеличением его начального содержания в чугуна.

На плавках, проведённых по варианту 2, уровень степени окисления марганца по группам плавков близкий к величинам, полученным по варианту 1 при раз-

личном содержании углерода в металле как на плавках со скачиванием промежуточного шлака, так и на плавках без скачивания (при конечном уровне содержания углерода в металле менее 0,25 %мас. на плавках без скачивания, проведённых по варианту 1, диапазон степеней окисления марганца 63,9-70,9 %, а по варианту 2 – 62,4-69,4 %; на плавках, проведённых со скачиванием, для варианта 1 – 71,7-75,3 %, а для варианта 2 – 67,2-75,2 %; при конечном содержании углерода в металле более 0,25 %мас. на плавках без скачивания уровень степени окисления марганца для плавков, проведённых по варианту 1 – 63,0-65,3 %, а по варианту 2- 59,87-63,36 %; на плавках, проведённых со скачиванием, для варианта 1 – 68,7-70,2 %, для варианта 2 – 68,94-72,04 %).

Следует подчеркнуть, что для плавков, проведённых по варианту 3, отмечены наиболее низкие значения степеней окисления марганца по анализируемым группам, в частности для сталей с пониженным начальным содержанием марганца в чугуна и более низким конечным содержанием углерода в металле (на плавках, проведённых без скачивания промежуточного шлака при конечном содержании углерода в металле менее 0,25 %мас. – 59,6-66,9 %, а на плавках, проведённых со скачиванием шлака – 64,4-71,8 %).

Анализ результатов расчёта основных физических свойств шлака с применением теории направленной химической связи [4] показал следующее: исходя из анализа свойств шлака в условиях пониженного начального содержания марганца в чугуна (группы плавков с содержанием марганца 0,1-0,3 %мас.), а также при проведении продувки до низкого уровня содержания углерода (менее 0,25 %мас.) при применении маломощного электрического потенциала для обеих полярностей потенциала (варианты 2 и 3) для плавков без промежуточного скачивания шлака к окончанию продувки плавки формируются шлаки с повышенным уровнем вязкости (средние значения для вариантов 2 и 3 – 68 Па·с против 66 в варианте 1), поверхностного натяжения (средние значения для вариантов 2 и 3 370 и 371 мН/м<sup>2</sup> против 367 в варианте 1), и при

Таблица 1

**Средние значения степени удаления марганца по вариантам опытных плавков**

Варианты опытных плавков		Группы по начальному содержанию марганца и углерода		
		[Mn] 0,1-0,3	[Mn] 0,3-0,6	[Mn] 0,6-0,9
Плавки без скачивания шлака	1	<u>63,9</u> 63,0	<u>70,2</u> 66,0	<u>70,9</u> 65,3
	2	<u>62,4</u> 59,4	<u>69,9</u> 65,4	<u>69,4</u> 63,4
	3	<u>59,6</u> 56,8	<u>67,7</u> 63,7	<u>66,9</u> 61,2
Плавки со скачиванием шлака	1	<u>71,7</u> 68,7	<u>71,8</u> 72,4	<u>75,3</u> 72,0
	2	<u>67,2</u> 68,9	<u>74,2</u> 72,1	<u>75,2</u> 72,0
	3	<u>64,4</u> 63,9	<u>69,1</u> 68,0	<u>71,8</u> 70,6

Примечание: числитель – [C] < 0,25, знаменатель – [C] > 0,25

отрицательной полярности на фурме – с повышенной активностью FeO (для вариантов 2 и 3 25,08 и 24,7 ед против 25,9 в варианте 1).

Для плавков, проведённых со скачиванием шлака, при применении низковольтного электрического потенциала в отношении шлакообразования благоприятны оба варианта подведения потенциала к фурме с небольшим преимуществом варианта 2: шлаки в вариантах применения потенциала менее вязкие (для вариантов 2 и 3 средние значения на уровне 59,0 и 63,0 Па·с против 61,0 в варианте 1) с невысоким поверхностным натяжением (для вариантов 2 и 3 средние значения 361 и 364 мН/м<sup>2</sup> против 367 в варианте 1) и повышенной активностью FeO (в варианта

2 и 3 средние значения 28,03 и 26,0 ед. против 26,15 ед. в варианте 1).

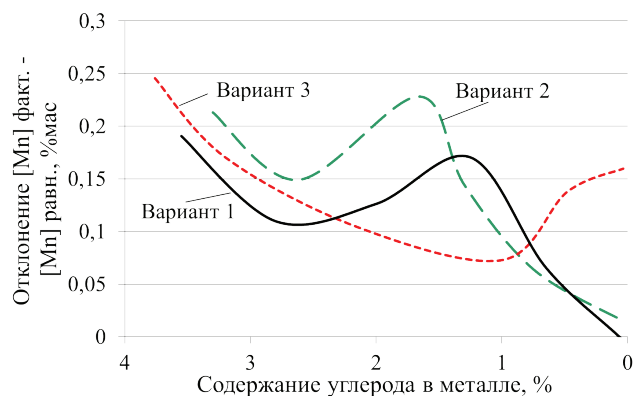
Следовательно, было установлено, что для плавок, проводимых как без скачивания шлака, так и со скачиванием, с точки зрения обеспечения восстановительных процессов к концу продувки, более благоприятен вариант с положительной полярностью потенциала – вариант 3.

Низковольтный электрический потенциал каждой из полярностей по ходу продувки может создавать условия, обеспечивающие поддержание высокого уровня марганца в металле. В частности, в условиях пониженного начального уровня содержания марганца в чугуне и низких значениях уровня содержания углерода в металле к концу продувки, в том числе с учётом термодинамической возможности протекания восстановительных процессов, которая может быть оценена по отклонению фактического содержания марганца в металле от равновесного со шлаком, рассчитаным по данным [5] в привязке к процессу окисления углерода (рисунок) можно предложить следующий вариант режима наложения потенциала. Для обеспечения протекания восстановительных процессов по марганцу из шлака в металл в течение всей продувки плавки необходима смена полярности потенциала: с начала продувки и до достижения содержания углерода 1 % – отрицательная полярность (вариант 2), а далее – положительная полярность (вариант 3), что характеризуется областями линий изменения данного параметра, расположенными выше других линий.

Усовершенствованный режим использования маломощного электрического потенциала, при котором 2/3 длительности продувки поддерживается отрицательная полярность, а в конце продувки – положительная, был опробован в условиях 60-тонного конвертера ПАО «Евраз – ДМЗ им. Петровского» при производстве низкоуглеродистой марки стали типа 09Г2С. Точные временные интервалы смены полярности были определены, исходя из результатов исследования, выполненного ранее [6].

Методика проведения экспериментов и стандартные технологические операции, производимые при проведении экспериментов по оценке технологии конвертерной плавки с заданным режимом смены полярности и оценке результатов, соответствовали принятой на заводе ТИ для 60-тонных конвертеров для плавок без скачивания шлака.

В таблице 2 представлены средние значения результатов плавок при выплавке стали в конвертере по технологии без скачивания шлака при пониженном начальном уровне содержания марганца в чугуне и выплавке металла до низкого (порядка 0,1 %мас.) уровня содер-



Отклонение фактического содержания марганца в металле от равновесного со шлаком в зависимости от изменения содержания углерода в металле (по данным исследований [5]): 1 – плавки без воздействий, 2 и 3 – с отрицательной и положительной полярностью потенциала на фурме

жания углерода на повалке по усовершенствованному режиму наложения маломощного электрического потенциала, при котором 2/3 длительности продувки поддерживается отрицательная полярность, а в конце продувки – положительная.

Вариант 1 – без воздействий, вариант 2 – с наложением маломощного электрического потенциала отрицательной полярности, вариант 3 – с наложением маломощного электрического потенциала положительной полярности, вариант 4 – 2/3 продувки отрицательная полярность, в конце продувки – положительная полярность.

Из табл. 2 следует, что входные параметры сопоставляемых плавок варьировались незначительно. По выходным параметрам сравниваемых плавок видно,

Таблица 2

**Сопоставление вариантов с наложением электрического потенциала (в том числе со сменой полярности) с вариантом без воздействий (выплавка стали типа 09Г2С)**

Параметры плавки	Варианты опытных плавок			
	1	2	3	4
Масса, т:				
чугуна	54,2	53,6	54,5	54,2
металлолома	9,8	11,0	10,55	10,8
Химический состав чугуна, %:				
Si	0,83	0,82	0,86	0,80
Mn	0,38	0,37	0,35	0,38
Температура чугуна, °С	1300	1280	1290	1280
Масса раскислителей, кг/т:				
SiMn	25,88	25,11 (-0,77)	25,00 (-0,88)	24,20 (-1,68)
Химический состав металла, %:				
C	0,08	0,07	0,08	0,09
Mn	0,10	0,13	0,15	0,17
Выход жидкой стали, %	94,3	93,6	95,9	94,5
Температура фактическая, °С	1630	1632	1634	1640
Прирост температуры фактический, °С	330	352	344	360
Степень окисления марганца, %	75,3	70,8	64,0	59,7 (-20%отн)
Содержание FeO в шлаке, %	15,13	15,62	14,63	14,79

что плавки, проведённые по варианту 4, отличаются наиболее высоким приростом температуры металла за плавку по сравнению с вариантом 1 (без воздействий) – на 30 °С. Также видно, что уровень остаточного марганца в металле при применении варианта 4 выше, чем в опытах без воздействий и с постоянной полярностью потенциала в течение всей продувки: степень окисления марганца снижена на 20 % отн. по сравнению с вариантом 1 с соответствующим повышением содержания марганца в металле с 0,10 до 0,17 %мас.

Полученные результаты по повышению содержания марганца в металле под воздействием низковольтного электрического потенциала по усовершенствованному эффективному режиму смены полярности подтверждаются снижением количества израсходованных на плавку раскислителей, содержащих марганец (см. табл. 2) – на 1,68 кг/т меньше SiMn, чем на плавках без воздействий.

Для опытных вариантов была рассчитана достоверность полученных результатов по критерию Стьюдента при сравнении с плавками без воздействий при условии достоверности 95 %. Расчётные значения коэффициентов Стьюдента для марганца получены на уровне 7 и 9, что, при необходимом табличном его значении 2,01, свидетельствует о достаточности данного количества плавков и достоверности полученного результата, также является подтверждением существенности полученной разницы для плавков, проведённых по предлагаемой технологии использования низковольтного электрического потенциала при конвертировании с заданным режимом смены полярности потенциала.

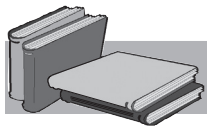
## Выводы

В результате проведённого исследования установлено, что для обеспечения более низкого уровня окисления марганца из расплава к концу продувки, в случае проведения конвертирования до низкого содержания углерода в металле, наиболее благоприятно применение положительной полярности на фурме независимо от наличия операции скачивания шлака и уровня начального содержания марганца в чугуне.

В случае применения низкомарганцовистых чугунов для обеспечения активного шлакообразования и сохранения в начальный и средний периоды продувки плавки более высокого содержания марганца в металле благоприятно применение отрицательной полярности потенциала на фурме.

Для обеспечения минимального окисления марганца из расплава по ходу продувки и создания условия для его восстановления из шлака в металл при производстве низкоуглеродистых марок стали был разработан режим изменения полярности потенциала на фурме: со сменой отрицательной полярности потенциала по истечении 2/3 длительности продувки на положительную полярность.

Опробование разработанной технологии конвертирования с эффективным режимом смены полярности потенциала в промышленных условиях на 60-тонных конвертерах при выплавке стали с низким конечным содержанием углерода марки 09Г2С показало, что на таких плавках остаточный марганец в металле, по сравнению с плавками без воздействий, повысился с 0,10 до 0,17 % при снижении степени его окисления на 20 %отн.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Бойченко Б. М. Конвертерное производство стали / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин – РИА «ДнепрВАЛ». – 2006. – 455 с.
2. Кияшко Т. С. Разработка и опробование ресурсосберегающей технологии рафинирования металла при выплавке в конвертере с низковольтными воздействиями / Т. С. Кияшко, С. И. Семькин, Е. В. Семькина, В. И. Пищида [и др.] // Металл и литьё Украины. – 2011. — № 11. – С. 20-23.
3. Семькин С. И. Исследование особенностей влияния низковольтного потенциала на процессы рафинирования металла в кислородном конвертере / С. И. Семькин, Т. С. Кияшко, Е. В. Семькина // Там же. – 2011. – № 7. – С. 29-33.
4. Кияшко Т. С. Поведение серы и марганца в конвертерной ванне при воздействии низковольтного электрического потенциала / Т. С. Кияшко, С. И. Семькин, Е. В. Семькина // ОАО «Черметинформация», Бюл. Чёрная металлургия. – 2009. – № 1. – С. 48-50.
5. Семькин С. И. Исследование в 1,5-тонном конвертере характера окисления примеси чугуна при подведении к сталеплавильной ванне низковольтного потенциала / С. И. Семькин // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2005. – Вып. 11. – С. 96-105.

### Анотація

Голуб Т. С., Семькин С. И., Семькина Е. В.

Дослідження можливостей підвищення рівня залишкового марганцю в металі при виробництві низьковуглецевих марок сталі

Наведено результати дослідження закономірностей впливу низковольтного електричного потенціалу на кінцевий рівень вмісту марганцю в конвертерному металі залежно від вмісту марганцю в чавуні і вуглецю в металі на випуску. Розроблено та випробувано ефективний варіант технології, що забезпечує економію марганцевмісних матеріалів при виробництві низьковуглецевої сталі.

### Ключові слова

низковольтний електричний потенціал, киснево-конвертерна плавка, шлакометалева ванна, зміна полярності потенціалу, рідкофазне відновлення марганцю

*The results of the researches of influence of low-voltage electric potential on the final level of manganese in the converter metal depending on the content of manganese in cast iron and carbon in the metal are represented. The effective technology that provides savings of manganese materials at the production of low-carbon is developed and tested.*

**ВНИМАНИЮ АВТОРОВ И ПОДПИСЧИКОВ!****Порядок приёма статей в редакцию журнала****«Металл и литьё Украины»**

*В журнале «Металл и литьё Украины» публикуются результаты исследований, которые ранее не издавались и законченные экспериментальные работы, оформленные в виде статей.*

*Статьи публикуются на русском языке.*

**Комплект документов, необходимых для регистрации статьи:**

- *один экземпляр рукописи (включая: УДК; организацию; ФИО авторов, резюме и ключевые слова (не меньше 6-ти) на 3-х языках – русском, украинском и английском; таблицы; рисунки и подписи к ним, а также список литературы), пронумерованной с первой до последней страницы и подписанной на последней странице текста всеми авторами, а также электронный вариант статьи;*
- *соглашение о передаче авторских прав, подписанное всеми авторами и рецензия на статью*
- *сведения об авторах (ФИО – полностью)*

**В электронном виде по e-mail: [mlu@ptima.kiev.ua](mailto:mlu@ptima.kiev.ua) предоставляются:**

- *рукопись, идентичная бумажной версии (просьба называть файл по фамилии первого автора статьи, например, sidorov.doc или Сидоров.doc);*
- *все иллюстрации в чёрно-белом варианте в одном из стандартных графических форматов «tif» или «jpeg»;*
- *информация об авторах: фамилии, имена и отчества всех авторов, выделив одного из них, с кем следует вести переписку, факс и номер телефона (с кодом), а также названия учреждений, в которых выполнена работа.*