

С.И.Семыкин, Е.В.Семыкина, Т.С.Голуб

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАСТЫЛИ НА КОНВЕРТЕРНОЙ ФУРМЕ ПРИ ПОДВОДЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ВО ВРЕМЯ ПРОДУВКИ ПЛАВКИ

Путем промышленных исследований конвертерного процесса и анализа образцов настыли изучено влияние низковольтного электрического потенциала на особенности ее образования на фурме. Установлен комплексный характер влияния потенциала на ряд основных факторов, снижающих интенсивность образования настыли на фурме. Показано, что срок службы фурм при использовании низковольтного потенциала отрицательной полярности был увеличен примерно в 1,5-2,0 раза по сравнению с работой без электрических воздействий, количество обрезков уменьшено в 1,3-1,7 раза, а время на выполнение операции обрезки настыли сократилось примерно в 1,6-1,7 раз.

Ключевые слова: конвертерный процесс, настыль на продувочной фурме, электрический потенциал

Состояние вопроса. Известно, что образование настыли на корпусе фурмы во время продувки ухудшает показатели работы агрегатов на многих предприятиях не только в Украине, но и за рубежом, из-за необходимости выполнения операции ее обрезки либо замены фурмы, а также из-за потерь жидкого металла с короляками и окислами железа в настыли, и зависит от химического состава чугуна, системы охлаждения и положения фурмы, а также процесса шлакообразования. При этом интенсивность образования настыли на продувочной фурме в значительной степени определяется шлаковым режимом плавки, на который влияют многие технологические факторы. В начальный период продувки плавки, когда процесс окисления кремния еще не завершен, после присадки извести поступление большого количества окиси кальция (CaO) в случае недостаточного количества в этот период закиси железа (FeO) приводит к образованию прочных соединений с окислами кремния (например, $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ с температурой плавления 2130°C), которые блокируют поверхность отдельных кусков извести и замедляют процесс ее растворения, в результате чего наводимый шлак переходит в гетерогенное состояние, что приводит к работе фурмы в режиме открытой струи, характеризующийся повышением разбрызгивания частиц металла и шлака.

Процесс образования настыли на фурме ускоряется также при использовании высокомагнезиальных добавок, применяемых для повышения стойкости футеровки конвертеров, поскольку в шлаке повышается содержание окислов MgO (до 12-13 %), и шлаки такого состава в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ смещаются в тугоплавкую гетерогенную область [1], и в интервале температур $1450\text{-}1500^\circ\text{C}$ характеризуются высокой вязкостью, превышающей $0,15\text{-}0,20 \text{ П} \times \text{с}$ [2], что также приводит к работе в режиме открытой струи.

В Институте черной металлургии разработана технология ведения конвертерной плавки с наложением на сталеплавильную ванну низковольтных электрических потенциалов и ведутся исследования по изучению особенностей этой технологии, в том числе выполнены исследования по определению возможности продления срока службы продувочных фурм за счет использования электрических потенциалов. Ранее полученные результаты опубликованы в работах [3, 4].

Целью данной работы было изучение особенностей влияния низковольтного электрического потенциала, подводимого к продувочной фурме во время продувки плавки, на процесс образования на ее корпусе настыви. Работа выполнена с участием сотрудников ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» В.И. Макаренко, В.А. Шеремета, А.В. Кекуха

Изложение основных материалов исследования. Исследование выполнено сотрудниками ИЧМ на 160-т конвертерах металлургического комбината ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» при переработке чугунов следующего состава, %: $4,2 \div 4,7$ – С; $0,54 \div 0,97$ – Si; $0,24 \div 0,46$ – Mn; $0,018 \div 0,042$ – S; $0,056 \div 0,070$ – P, с температурой порядка 1320 – 1328 °С. Расход кислорода через фурму в зависимости от продуваемости ванны и запаса давления кислорода в цеховой сети составлял 380 – 420 $\text{нм}^3/\text{мин}$. На плавках с электрическими воздействиями использовали подведение к фурме и сталеплавильной ванне низковольтного электрического потенциала от источника тока ВДУ-1400.

Исследования, выполненные по изучению характеристик и свойств шлакового расплава, показали, что подведение к фурме электрического потенциала отрицательной полярности способствует образованию уже на начальной стадии продувки (в период до процедуры технологического скачивания шлака) достаточного количества закиси железа (FeO), которая, вступая во взаимодействие с окислами кремния, образует легкоплавкие соединения типа $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ и $(\text{FeO})_3 \cdot \text{SiO}_2$ с температурами плавления 1200 °С и 1100 °С соответственно, которые, в свою очередь, вступают в соединение с СаО, способствуя быстрому усвоению извести и получению жидкоподвижного покровного шлака с вязкостью $0,096 \text{ П} \times \text{с}$ (на сравнительных плавках вязкость шлака в этот период составляет $0,232 \text{ П} \times \text{с}$), что приводит к работе фурмы в режиме заглубленной струи и уменьшает разбрызгивание металла и шлака.

При погружении в шлак отрицательно заряженный наконечник и корпус фурмы создают избыток отрицательного заряда в окружающей их зоне, поэтому в случае попадания отрицательно заряженных частиц шлака с металлическими каплями (корольками) на отрицательно заряженный корпус фурмы происходит их взаимное электрическое отталкивание. В этом случае, возможно налипание на корпус фурмы только положительно заряженных комплексов, например на основе ферритов кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, образующих плохо смачиваемую настывль, которая способна легко растрескиваться из-за большого коэффициента термического расширения

при охлаждении и осыпаться под тяжестью собственного веса при подъеме фурмы. Возможность образования таких ферритов обоснована доокислением закиси железа (FeO) за счет отрицательного потенциала до его окиси (Fe₂O₃). Температура плавления (Fe₂O₃) – 1566°С, а образованный феррит кальция имеет еще более низкую температуру плавления (1220°С), поэтому шлак на такой основе характеризуется жидкоподвижностью.

В табл.1. приведены усредненные по опытным вариантам параметры конечных конвертерных шлаков, отобранных в период проведения экспериментов. Как видно из таблицы, отношение содержаний Fe₂O₃/ FeO в шлаке, сформированном при отрицательной полярности потенциала, больше, чем на плавках без воздействий. Это подтверждает высказанное выше предположение и должно способствовать уменьшению интенсивности образования настыва на корпусе продувочной фурмы.

Таблица 1 – Параметры конечного шлака

Параметры шлака	Варианты исследований	
	С низковольтным потенциалом	Без электрических воздействий
FeO, %	14,17	15,65
Fe ₂ O ₃ , %	8,62	7,79
Fe ₂ O ₃ / FeO, %	60,83	49,78
Fe _{общ.} , %	17,04	17,61
Основность, ед.	3,90	3,55

Для изучения особенностей настыва, сформированной при работе фурмы в условиях наложения на сталеплавильную ванну низковольтных электрических потенциалов, были исследованы ее образцы, взятые с корпусов фурм, отработавших с электрическими воздействиями и без них. На рис.1 приведены фотографии продувочных фурм, снятых с конвертерной установки после эксплуатации в период работы с электрическими воздействиями (А) и без их применения (Б). На фото видно, что после эксплуатации в условиях выплавки металла с применением низковольтного электрического потенциала слой настыва не полностью покрывает корпус продувочной фурмы и значительно меньше, чем на фурме, отработавшей без электрических воздействий. При отборе образцов настыва для определения химического состава было установлено, что с фурмы, работавшей при использовании низковольтного потенциала, настыв легко отламывалась, а с фурмы после эксплуатации без воздействий для взятия образцов пришлось применять специальный инструмент.

Рисунок 1 – Фотографии общего вида настыли на корпусе продувочных фурм после эксплуатации их с воздействием низковольтного электрического потенциала (А) и без электрических воздействий (Б)

А

Б

Описание образцов настыли. На рис.2 приведены фотографии образцов настыли, взятых с трех уровней по высоте корпуса фурм.

А	Б
В	Г
Д	Е

Рисунок 2 – Фото образцов настыли, взятых возле наконечника (А), средней части (Б), верхней части (В) продувочной фурмы, отработавшей на плавках с воздействием низковольтного потенциала, и с фурмы, эксплуатируемой без воздействий - образцы настыли Г, Д, Е (участки отбора соответствуют образцам, расположенным на фото выше)

Настыли, образовавшиеся на корпусе фурмы при выплавке металла с применением низковольтных потенциалов, имели визуальные различия в зависимости от места их образования. Так, на самом наконечнике фурмы образовалась тонкая хрупкая настыль (см.рис.2А), что, вероятно, связано с тем, что наконечник фурмы при продувке погружен в наиболее горячие слои шлакометаллической эмульсии, контактирующие с жидким металлом, где в результате движения шлако-металлического расплава, ускоряющегося не только в результате высоких температур, но и за счет ускорения обменных процессов в результате протекания электрического тока между настылью и жидким шлаком, произошло практически полное ее удаление. В средней части длины корпуса фурмы, также попадающей при продувке в слой жидкого шлака, отличающийся, однако, меньшей температурой от слоя, контактирующего с жидким металлом, под действием электрического потенциала отрицательной полярности, вероятно, происходит изменение структуры настыли, ее растрескивание при подъеме фурмы и обсыпание обратно в емкость конвертера, в результате чего корпус фурмы частично очищен от настыли, и только в отдельных местах сохранилась небольшой толщины слоистая настыль, которую можно разделить на два слоя: верхний - серого цвета с включением бурого оттенка и блестящих мелких корольков округлой формы и внутренний, прилегающий к корпусу фурмы, по внешнему виду похожий на настыль, сформированный на наконечнике фурмы

(см.рис.2Б). Настыль, образовавшаяся в верхней части корпуса продувочной фурмы (рис.2В), также многослойная, и, поскольку эта часть корпуса фурмы практически не заглубляется в слой шлака во время продувки, то образовавшуюся настыль можно разделить на три самостоятельных слоя: более тонкий плотный слой настыли толщиной 2-5 мм похожий на образец, взятый с наконечника фурмы (на образце, показанном на рис.2В не виден), средний слой толщиной 5-8 мм, содержащий включения мелких металлических корольков и внешне похожий на внешний слой образца, взятого со средней части настыли по длине корпуса фурмы (см.рис.2Б), наружный слой толщиной 8-12 мм, характеризующийся пористостью и окисленностью своей поверхности. Общая толщина слоев настыли составляла порядка 15 - 25 мм. После размола и магнитной сепарации было обнаружено, что образец, взятый с наружного окислившегося слоя настыли, на 20-25 % состоял из магнетита и металлических корольков округлой формы, причем доля корольков составляла порядка 17- 18 %. Образец, взятый со средней части настыли не имел в своем составе магнетита, но содержал порядка 20-22 % металлических корольков. Тонкий слой, прилегающий к корпусу фурмы, содержал высокую долю магнетита, но имел в своем составе только порядка 5-8 % металлических корольков. В среднем количество корольков по образцу составило порядка 16 %.

Настыли, образовавшиеся на корпусе фурмы при выплавке металла без электрических воздействий на контролируемых участках отбора проб по высоте фурмы (см. рис.2: Г, Д, Е), имели толщину порядка 40–65 мм с включениями в виде корольков в количестве порядка 25-30 %, отличающаяся повышенной механической прочностью, вследствие большей доли металлической составляющей в ее составе (на срезах образцов настыли просматривались слои, но разделить их не удалось).

В табл.2 приведен химический состав настыли на фурме без разделения на слои и участки отбора образцов по двум опытным вариантам исследований. При сравнении химического состава, полученного после анализа размолотых образцов настыли, с химическим составом типичных проб конечного шлака, взятых из конвертерной ванны в конце плавки, выявлено, что содержание закиси железа (FeO) в составе настыли находится в пределах состава конвертерных шлаков, в то время как количество Fe_2O_3 в образцах настыли, образованной как без воздействий, так и в условиях работы с наложением электрического потенциала, было больше, чем обнаружено в конечных конвертерных шлаках, что, вероятно, произошло за счет доокисления частиц шлакометаллической эмульсии налипшей на корпус фурмы в кислородном газовом потоке. Следует заметить, что в случае применения низковольтных потенциалов уровень доокисления FeO до Fe_2O_3 был практически в 2 раза большим, чем на сравнительных плавках без воздействий, что объясняется вероятной активизацией кислорода отрицательным зарядом, наведенным на корпус фурмы.

Таблица 2 – Средний химический состав образцов настыли на фурмах без

разделения на участки отбора и слои

Химический состав настыли	Варианты исследований	
	С низковольтным потенциалом	Без электрических воздействий
CaO	33,6	32,1
SiO ₂	11,3	10,9
MnO	6,0	6,8
MgO	6,0	4,6
FeO	12,4	21,9
Fe ₂ O ₃	21,5	14,9
Al ₂ O ₃	0,73	0,74
P ₂ O ₅	0,560	0,357
S	0,060	0,056
Fe _{общ.}	24,70	27,45
Fe ₂ O ₃ / FeO	173	68

Повышение доли Fe₂O₃ в образцах настыли по отношению к конечным шлакам подтверждает вероятность формирования легкоплавких ферритов типа CaO×Fe₂O₃ внутри уже налипшей настыли при использовании низковольтных потенциалов, что, вероятно, является причиной растрескивания и обсыпания настыли во время плавки и приводит к тому, что настыль на фурме задерживается преимущественно на тех участках, которые, возможно, имели повышенную шероховатость. При пересчете количества окислов железа в шлаке на железо общее (Fe_{общ.}) выявлено, что потери железа в окислах с настылью на фурме при применении низковольтного потенциала ниже, чем на сравнительных плавках (только по химическому анализу это уменьшение составляет порядка 3 %, а, в связи с тем, что настыль по величине значительно меньше, чем на плавках без воздействий, такое снижение существенно). Также, исходя из анализа образцов настыли, можно отметить, что при использовании низковольтного электрического потенциала более полно проходили процессы десульфурации, дефосфорации (большее количество серы и окислов фосфора в образцах настыли), меньше окислялся марганец (меньшее количество окислов марганца) при некотором увеличении количества окиси магния в настыли за счет использования на плавках с электрическими воздействиями доломитизированной извести, а не из футеровки, поскольку ранее отмечена возможность ее защиты при наведении низковольтного потенциала [5].

В табл.3 приведен подробный химический состав настыли, сформированной на фурме, работавшей в условиях применения низковольтных потенциалов, разделенной на три анализируемых и описанных выше слоя, и химический состав образцов настыли, образовавшейся на разных участках корпуса фурмы при работе без электрических воздействий, без деления на слои, поскольку разделить не удалось. Как видно из таблицы, химический анализ слоев различается и,

вероятно, в определенной степени отражает состав шлаков, сформированных на различных стадиях плавки и на разных плавках, отличающихся шихтовкой в зависимости от заказанной марки стали, используемых шлакообразующих и состава остающегося после очередного налипания и осыпания на определенных этапах эксплуатации фурмы фрагментов настыли. В то же время, установленное максимальное количество Fe_2O_3 в слое, прилегающем к корпусу фурмы, подтверждает предположение о дополнительном доокислении FeO за счет электрического заряда, наведенного на корпус фурмы, количество Fe_2O_3 в среднем слое настыли сопоставимо с полученным при исследовании конечного конвертерного шлака.

Таким образом, исследования свойств образцов настыли показали, что потенциал отрицательной полярности оказывает воздействие на структуру и свойства формируемой настыли, и способствует образованию легко удаляемой в процессе выплавки металла настыли. Кроме того, размеры настыли значительно меньше и этот вариант ведения конвертерной плавки характеризуется меньшим уровнем потерь железа совместно с удаляемой настылью. Следует отметить, что немаловажную роль в процессе образования настыли играет состояние поверхности фурмы. В случае отсутствия дефектов и шероховатостей поверхности проявляется эффект снижения скорости образования настыли за счет теплообмена, поэтому, чем меньшему количеству обрезков настыли подвергается фурма, тем медленнее нарастает на ней настыль и удлиняется срок эксплуатации фурмы.

Таблица 3 – Химический состав образцов слоев настывли, огобранных с 3-х уровней по высоте фурмы

Химический состав слоев настывли, %:											
СаО	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	Fe _{обш.}	(B)	Fe ₂ O ₃ / FeO
Образец «А», однослойный с наконечника фурмы:											
25,3	11,4	5,0	4,2	12,2	32,0	0,70	0,45	0,05	31,8	2,22	2,62раз
Образец «Б-1» со средней части настывли фурмы, наружный слой:											
35,5	12,0	6,45	7,30	13,2	15,3	0,73	0,59	0,08	20,8	2,96	1,16раз
Образец «Б-2», со средней части настывли слой, прилегающий к корпусу:											
25,1	10,9	5,2	3,9	16,8	30,0	0,55	0,47	0,05	34,0	2,31	1,79раз
Образец «В-1» с верхней части настывли на фурме: наружный слой:											
38,1	10,7	4,3	6,7	10,2	21,9	0,76	0,42	0,098	23,2	3,56	2,15раз
Образец «В-2», с верхней части настывли, средний слой:											
32,0	14,3	8,8	7,8	16,0	36,2	0,69	0,58	0,069	37,7	2,24	2,26раз
Образец «В-3», с верхней части настывли слой, прилегающий к корпусу:											
20,5	13,4	4,9	3,7	11,1	30,1	0,74	0,450	0,052	29,65	1,53	2,71раз
Образцы настывли с фурмы, отработавшей без электрических воздействий:											
Образец «Г», взятыйazole наконечника фурмы:											
24,1	12,5	5,50	3,0	22,5	18,0	0,65	0,45	0,054	29,9	1,93	0,81раз
Образец «Д», взятый с середины настывли по высоте фурмы:											
32,8	13,0	6,9	4,7	22,1	14,5	0,70	0,57	0,056	27,8	2,52	0,65раз
Образец «Е», взятый с верхней части настывли на фурме:											
28,5	11,9	6,2	3,9	21,8	16,8	0,68	0,41	0,055	28,5	2,39	0,77раз

Выполненные по определению срока службы продувочных фурм исследования (табл. 4) показали, что при эксплуатации фурмы в условиях наложения электрических потенциалов удлиняется время до момента необходимости выполнения операции по очистке фурмы от настыли в примерно в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с работой без электрических воздействий. Также сокращается количество обрезков примерно в 1,3-1,7 раза и время на выполнение операции обрезки примерно в 1,6 – 1,7 раза. Эти эффекты способствует сохранению целостности поверхности корпуса фурмы, и снижает вероятность образования на нем настыли.

Таблица 4 – Средние показатели эксплуатации и ремонта фурм при работе с электрическими воздействиями и по обычной технологии

Показатели	Опытный конвертер		Другие конвертеры
	С электрическим потенциалом	Без воздействий	Без воздействий
Общая стойкость фурм (кол. плавков)	112	56	78
Количество обрезков на 100 плавков	4	7	5
Время обрезки настыли на одной фурме, мин.	11	18	19

Выводы. Таким образом, экспериментальные промышленные исследования и изучение конвертерных шлаков и образцов настыли, сформированной на корпусе продувочной фурмы, при проведении опытных плавках с применением электрического потенциала отрицательной полярности и на сравнительных плавках без электрических воздействий позволили установить комплексный характер влияния потенциала на ряд основных факторов, снижающих интенсивность образования настыли на фурме:

1. Ускорение процесса шлакообразования в начале продувки под воздействием электрического потенциала, прежде всего, при отрицательной полярности;

2. Электрическое взаимодействие (отталкивание) наведенного заряда на корпусе фурмы и зарядов, присущих мелким частицам разбрызгиваемого металла и шлака, формируемым под действием газовой струи.

3. Интенсификация процесса доокисления FeO до Fe_2O_3 в слое, прилегающем к корпусу фурмы, с образованием легкоплавких ферритов типа $CaO \times Fe_2O_3$ внутри уже налипшей настыли при использовании низковольтных потенциалов, что, вероятно, является причиной растрескивания и обсыпания настыли во время продувки конвертерной плавки.

4. Снижение при отрицательной полярности потенциала уровня

разбрызгивания во время продувки и налипания настыли на корпусе фурмы, в том числе корольков (содержание в настыли корольков составило с воздействиями в среднем 16 % против 25-30 % - без воздействий) и возвращение настыли в сталеплавильную ванну во время продувки способствует снижению потерь металла (при пересчете количества окислов железа в шлаке на железо общее ($Fe_{\text{общ}}$) выявлено, что потери железа с настылью на фурме при применении низковольтного потенциала ниже, чем на сравнительных плавках (только по химическому анализу это уменьшение составляет порядка 3 %, а, в связи с тем, что настыль по величине значительно меньше, чем на плавках без воздействий, такое снижение существенно).

5. Снижение примерно в 1,3-1,7 раза количества необходимых обрезков на корпусе фурмы и времени на обрезку настыли примерно в 1,6-1,7 раза при применении электрического потенциала способствует сохранению целостности поверхности корпуса фурмы, и, следовательно, снижает вероятность образования на нем настыли.

В результате показано, что срок службы продувочных фурм при использовании низковольтного потенциала отрицательной полярности был увеличен примерно в 1,5-2,0 раза по сравнению с работой без электрических воздействий.

1. *Бережной А.С.* Многокомпонентные системы окислов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 516 с.
2. *Зарвин Е.Я., Никитин Ю.П., Николаев А.Л.* Влияние MnO и MgO на некоторые физические свойства конвертерных шлаков и взаимодействие последних с флюсами. // Изв. Вузов. – 1973. – № 2. – С.51-54.
3. Опыт использования низковольтных электрических потенциалов в условиях ККЦ металлургического комбината «Криворожсталь» / С.И.Семькин, В.Ф.Поляков, Е.В.Семькина и др./сб. ИЧМ Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2003. – Вып. 6. – С.129-136.
4. *Семькина Е. В., Семькин С.И., Поляков В.Ф.* Исследование возможности очистки продувочных фурм от сформированной настыли путем применения низковольтных потенциалов // сб. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2011. – Вып. 23. – С.149-153.
5. *Перспективы* повышения срока службы огнеупорной футеровки конвертеров при использовании электрических воздействий / С.И. Семькин, Е.В. Семькина, В.Ф. Поляков, Т.С. Семькина // сб. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2006. – Вып. 12. – С 160-165.

*Статья поступила в редакцию сборника 01.06.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

С.І.Семикін, О.В.Семикіна, Т.С.Голуб

Особливості формування настилю на конвертерній фурмі при підведенні низьковольтного потенціалу під час продувки плавки

Шляхом промислових досліджень та аналізу зразків настилу вивчено вплив низьковольтного електричного потенціалу на особливості його утворення на фурмі. Встановлено комплексний характер впливу потенціалу на основні факторів, що знижують інтенсивність утворення настилу на фурмі. Показано, що срок служби фурм при використанні низьковольтного потенціалу негативної полярності було збільшено приблизно у 1,5-2,0 рази у порівнянні з роботою без електричних впливів, кількість обрізків зменшено у 1,3 -1,7 разів, а час на виконання операції обрізки настилу зменшено приблизно у 1,6 -1,7 рази.

Ключові слова: конвертерний процес, шлакоутворення, настиль на продувочній фурмі, низьковольтний потенціал

S.I.Semykin, E.V.Semykina, T.S.Golub

The features of manganese liquid-phase reduction in the converter process with low-voltage electric potential

The article reports on the results of the experimental and analytical studies of the manganese behavior when blowing the converter heat under conditions of applying low-voltage electric potentials of various polarities for the steel bath. The role of intermediate deslagging operation is shown. The research has revealed that under studied conditions the use of positive polarity on a lance in general permits us to have the smallest level of manganese oxidation in the metal during the heat.

Keywords: converter process, slag formation, accretion to purge the lance, the low voltage potential