

© Д.К. Егизарьян, А.Н. Шаманов, И.В. Некрасов, О.Ю. Шешуков,
В.Т. Луценко, В.Н. Бондаренко, 2012 г.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

г. Екатеринбург

ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

avari@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ЗОН ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Современные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) с наиболее широкими возможностями контроля и управления процессом плавки поставляются иностранными фирмами, однако поставляемое оборудование имеет «закрытое» программное обеспечение с минимальными возможностями оперативной настройки заводскими специалистами. Печи же отечественной постройки зачастую не предоставляют персоналу современных инструментов управления плавкой. Это не позволяет операторам печи адекватно реагировать на изменения производственных условий, в результате снижается эффективность технологических режимов ДСП. В частности, колебания окисленности лома и качества обжига извести, поставляемых на отечественные предприятия, вызывают нестабильность состава печного шлака и его технологических свойств, прежде всего, вспениваемости. Известная проблема нестабильности насыпной плотности лома, вызванная несоответствием отечественной ломоподготовки мировым стандартам, приводит к снижению эффективности теплопередачи к металлу по ходу расплавления при использовании директивно заданного электрического режима. Все это вызывает повышение расхода электроэнергии и затягивание плавки, в результате ДСП не достигают показателей, характерных для условий их эксплуатации за рубежом. Зачастую для сокращения потребления электроэнергии и продолжительности плавки повышают расход химического топлива, однако при этом возрастает окисленность металла и шлака и, как следствие, резко снижается качество металлопродукции, повышается уровень ее брака, снижается стойкость футеровки печи.

Проблемы с качеством лома и шлакообразующих носят объективный и долгосрочный характер. Поэтому решение вопроса о повышении эффективности работы ДСП за счет снижения влияния на ее показатели качества лома и шлакообразующих следует искать в оптимизации режимов работы самих ДСП, а именно реализации нескольких рабочих режимов ДСП, гибко адаптирующихся под условия конкретной плавки. Однако это требует разработки инструмента оценки состояния рабочей зоны печи, которая не-

доступна для прямых наблюдений и является чрезвычайно агрессивной средой для разного рода датчиков. Предлагаемый нами подход заключается в том, что в качестве такого инструмента рассматривается сама электрическая дуга, поскольку зона ее горения, по существу, является зоной технологического процесса, вследствие чего ряд важных особенностей хода технологического процесса отражается в особенностях режима горения дуги. Использование модельных представлений о связи параметров электрического режима и особенностей технологического процесса позволяет создать информационный комплекс, предоставляющий оператору печи недоступные ранее данные о состоянии технологического процесса в режиме реального времени. В результате повысится качество управления электроплавкой.

В качестве примера решения подобных задач приведем результаты наших исследований по контролю окисленности расплавов в другом электросталеплавильном агрегате – агрегате «ковш-печь» (АКП). АКП во многих отношениях являются ключевыми агрегатами современной металлургии, они решают задачи удаления неметаллических включений, серы и кислорода из стали. Успех в решении этих задач в первую очередь определяется окисленностью ковшевого шлака, оценка которой по содержанию оксидов железа не должна превышать $\text{FeO} = 1\text{--}2\%$.

На практике не всегда удается обеспечить минимальную окисленность ковшевого шлака. Зачастую попадание печного шлака в ковш приводит к тому, что обработку стали на АКП приходится начинать при содержании в шлаке FeO от 3 до 10 %. Причем для конвертерных цехов эта проблема более существенна, чем для производств, оснащенных сверхмощными электропечами (ДСП). Эркерный выпуск ДСП, по сути, аналогичен, способу отсечки конвертерного шлака «металлическим затвором» и стабилизирует количество попадающего в ковш шлака на низком уровне. В настоящее время, в том числе из-за распространения технологий нанесения гарнисажа, работа конвертеров с «металлическим затвором» не практикуется, что при отсутствии средств отсечки шлака приводит к попаданию значительных количеств конвертерного шлака в ковш, особенно при выплавке низкоуглеродистых сталей. Но даже использование средств отсечки шлака полностью указанную проблему не решает. Не обсуждая «усредненную» эффективность этих средств, можно заметить, что их работа нестабильна, это вызывает попадание в ковш неконтролируемых количеств шлака и резкие колебания окисленности ковшевого шлака. Повышенная окисленность шлака увеличивает угар ферросплавов и вынуждает повышать их расход, что негативно сказывается на качестве и себестоимости стали, производительности АКП.

В табл. 1 приведены составы ковшевых шлаков в начале и конце обработки низкоуглеродистых сталей 08Ю по данным одного из российских конвертерных цехов, а также оптимальный состав шлаков для рафиниро-

вания раскисленных алюминием сталей [1]. Из представленных данных следует, что состав ковшевых шлаков только в конце обработки приближается к оптимальному. С учетом требований по своевременной подготовке стали к разливке и обеспечения ее качества, персоналу АКП следует принимать оперативные и адекватные меры для раскисления шлака. Поэтому возникает необходимость оперативного получения точных данных о содержании FeO в шлаке.

Таблица 1

Составы ковшевых шлаков в начале и конце обработки низкоуглеродистых сталей на АКП и оптимальный состав рафинировочного шлака

Состав шлака	Массовая доля компонентов в шлаке, %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO
в начале обработки	42 – 46	10 – 14	7 – 11	8 – 12	1 – 2	12 – 20
в конце обработки	42 – 46	10 – 14	16 – 19	7 – 10	1 – 2	5 – 14
Оптимальный [1]	58 – 62	6 – 10	20 – 25	6 – 8	0	0,5 – 1,5

Имеются сведения о попытках использования в 70-80 гг. XX в. контроля постоянной составляющей напряжения дуги (ПСНД) для оперативной оценки окисленности шлака восстановительного периода плавки в ДСП классическим процессом. Однако с того времени выплавка стали этим процессом существенно сократилась, снизился интерес к этим ДСП и их технологии, разработки остались не востребованными. С другой стороны, можно сказать, что восстановительный период электроплавки из большой металлургии не исчез, а «превратился» в процесс обработки стали на АКП. Кроме того, сейчас появились новые более совершенные аппаратные и методические возможности контроля параметров электрического режима, их математической обработки.

На лабораторной печи обнаружена поддающаяся формализации связь состава шлака с ПСНД (рис. 1) [2]. На сверхмощной ДСП-135 подтверждена принципиальная возможность оценки окисленности шлака по величине ПСНД в промышленных условиях. С учетом этих результатов нами разработан измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий в режиме реального времени предоставлять операторам АКП информацию о параметрах горения дуги, которые коррелируют с окисленностью шлака. Операторы АКП по этим данным могут принимать оперативные решения о вводе раскислителей шлака и шлакообразующих.

Другой проблемой многих АКП является невозможность обеспечения необходимого заглубления электродов в шлак. Степень заглубления электродов в шлак влияет на скорость нагрева металла, степень насыщения его атмосферным азотом и стойкость футеровки, т.е. влияет на производительность АКП, качество стали. Поэтому возникает задача оперативного и

объективного контроля качества укрытия дуг шлаком, что особенно важно для АКП, на которых по разным причинам не получается поддерживать достаточно толстый слой шлака (например, случай ККЦ ММК).

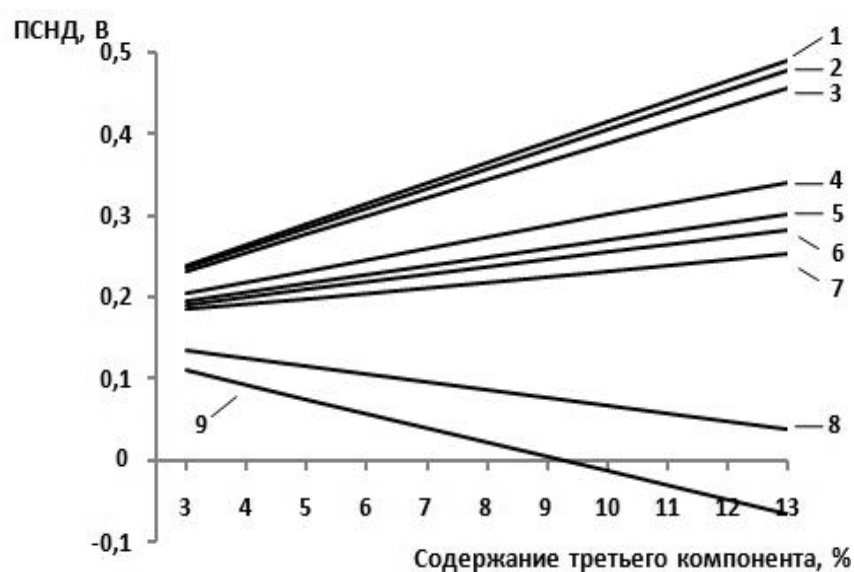


Рис. 1. Зависимость ПСНД от содержания различных компонентов:

1 – WO₃; 2 – FeO; 3 – MnO; 4 – MgO; 5 – Cr₂O₃;
6 – TiO₂; 7 – CaF₂; 8 – V₂O₅; 9 – Al₂O₃

ИМЕТ УрО РАН имеет разработки по автоматизации ферросплавных процессов, используемые на практике, в частности, метод оценки глубины посадки электродов в шихту по величине шунтирующего дугу сопротивления [3]. На этой основе нами создан и опробован на ДСП-135 ОАО «СТЗ» измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий оценивать степень заглубления электродов в шлак и предоставлять в режиме реального времени соответствующую информацию операторам ДСП, которые могут принимать решения по смене ступени трансформатора (или корректировке уставки тока), введении шлакообразующих, корректировке вдувания углерода.

Схемы замещения рабочего пространства ДСП и АКП аналогичны (рис. 2), что позволяет применить этот же комплекс для решения аналогичной задачи на АКП. Кроме того, эта система может, как контролировать степень заглубления электрода в шлак, так и окисленность шлака, т.е. решать обе описанные выше задачи.

Дуги ДСП и АКП шунтируются сопротивлением шлака или шихты (ферросплавная печь), сопротивление короткой сети и расплава, на который горит дуга, «включается» последовательно с параллельной цепью дуга-шихта. На вольтамперной характеристике (ВАХ) контура низкой стороны трансформатора для этого случая (рис. 2, б) $tg\alpha$ равен сопротивлению

короткой сети, расплава и шунта, а $tg\beta$ – сопротивлению короткой сети и расплава [2]:

$$tg\alpha = \frac{du}{di} = R_{ш} + R_{кс} + R_p, \quad (1)$$

$$tg\beta = \frac{du}{di} = R_{кс} + R_p, \quad (2)$$

где, $R_{ш}$ – сопротивление, шунтирующее дугу, $R_{кс}$ и R_p – сопротивления короткой сети и расплава, на который горит дуга.

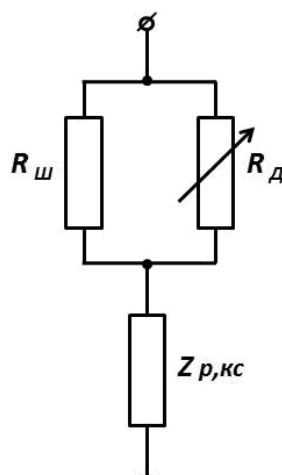


Рис. 2. Схема замещения рабочего пространства ДСП, АКП и ферросплавных печей, осуществляющих шлаковый процесс выплавки ферросплавов (а); идеализированная ВАХ полезной нагрузки (б):

R_d – сопротивление дуги; $R_{ш}$ – сопротивление, шунтирующее дугу; $Z_{р,кс}$ – полное сопротивление короткой сети и расплава, на который горит дуга [2]

Расчет нагрузки по $tg\alpha$ и $tg\beta$ позволяет оценивать глубину «посадки» электрода в шихту: чем меньше значение $tg\alpha$, тем глубже «посадка» электрода. Данная зависимость используется в разработанных ИМЕТ УрО РАН методах оперативного регулирования технологических режимов выплавки ферросплавов [3]. В случае ДСП и АКП вариации $tg\alpha$ отражают степень заглубления электрода в шлак.

В ходе промышленных экспериментов на ДСП-135 для проверки адекватности метода ВАХ использовались данные о гармоническом составе напряжений, а также непосредственные наблюдения за рабочим пространством. Установлено, что в режиме «плохого вспенивания» $R_{ш}$ всегда, по крайней мере, для одной из фаз, больше 30 мОм. Для остальных фаз значения $R_{ш}$ могут изменяться от 12 до 30 мОм. На осциллограммах вторичных токов и напряжений фаз, которые имеют значение $R_{ш}$ больше 30 мОм, обнаруживаются пики зажигания и участки негладкости функции тока, соответствующие разрывам производной тока и напоминающие его паузы (рис. 3, а и рис. 3, б). Для фаз с наименьшим погружением электро-

дов в шлак также характерен повышенный уровень амплитуд высших гармоник фазного напряжения, что принято связывать с ухудшением теплоизоляции дуги и качества вспенивания шлака.

Напротив, при «хорошем» вспенивании шлака, когда уровень шлака в печи выше, $R_{ш}$ по фазам стабильны и близки друг к другу, составляя 13–17 мОм, что свидетельствует о стабильном погружении электродов всех фаз в шлак. Причем уровень такого погружения достаточен для теплоизоляции зоны разряда, поскольку на осциллограммах и ВАХ токов и напряжений не наблюдаются пики зажигания и участки негладкости функции тока (рис. 3в, рис. 3г). Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фазных напряжений «хорошего» вспенивания обнаруживают достаточно низкий и ровный уровень высших гармоник по всем фазам, в сравнении с АЧХ «плохого вспенивания».

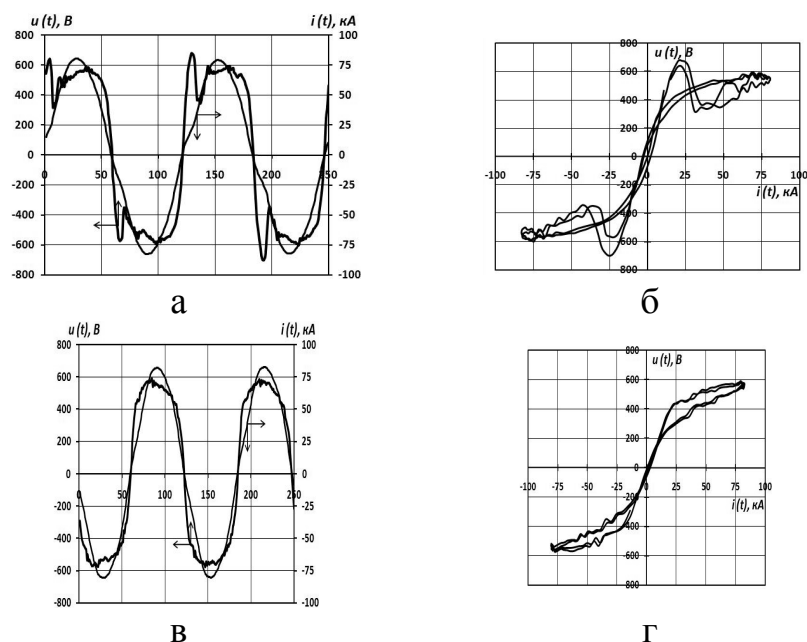


Рис. 3. Осциллограммы и динамические ВАХ токов и напряжений низкой стороны трансформатора при «плохом» (а, б) и «хорошем» (в, г) вспенивании шлака

Список использованных источников

1. Дюдкин Д.А. Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Оптимизация состава рафинировочного шлака ковша-печи // Сталь. 2003. № 5. С. 17–19.
2. Некрасов И.В. Автоматический контроль состав шлака при обработке стали на агрегатах ковш-печь по параметрам электрического режима // И.В. Некрасов, О.Ю. Шешуков, А.В. Сысолин, В.Т. Луценко, В.Н. Бондаренко // Известия вузов «Черная металлургия». 2009. № 10. С. 18–21.
3. Воробьёв В.П. Сивцов А.В., Возжеников С.Г. Автоматизация дуговых электропечей // Черные металлы. 1999. № 5. С. 12–14.