



УДК 669.187.56.002

## О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭШП

**А. А. Троянский, А. Д. Рябцев, В. Л. Петренко,  
Л. Б. Медовар, А. Х. Дымнич,  
В. Ю. Мастепан, С. Н. Ратиев**

На основании анализа характера плавления расходующихся электродов малого сечения под флюсами различной электропроводности показана возможность возникновения явлений «самовибрации» электродов при ЭШП.

The possibility of occurrence of phenomena of "self-vibration" of electrodes in ESR is shown on the basis of analysis of nature of melting of small-section consumable electrodes under fluxes of various electric conductivity

**Ключевые слова:** ЭШП; система управления; затвердевание; торец расходующего электрода; сопротивление шлака; вибрация; массообменные процессы

Электрошлаковый переплав (ЭШП) — хорошо изученный процесс производства сталей и сплавов самого высокого качества. В современном виде ЭШП существует уже около 50 лет, прежде всего благодаря работам ученых ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Однако и в этом процессе не все до конца изучено и понятно. Например, основные физико-химические реакции, обуславливающие протекание рафинирующих процессов (удаление вредных примесей, газов и неметаллических включений), протекают в местах контакта расплавленного металла со шлаком, т. е. на границе раздела двух фаз — металла и рафинирующего шлака [1]. Следовательно, существует три стадии (зоны протекания процессов рафинирования): на торце расходующего электрода, при движении капель расплавленного металла от электрода через расплавленный шлак к металлической ванне и на границе шлаковой и металлической ванн. При этом имеются данные, указывающие на то, что основное рафинирование металла может происходить не только на торце электрода, но и на третьей стадии (третьей зоне рафинирования) — границе раздела металл–шлак [2]. Интенсивность рафинирования зависит от многих параметров: химического состава и температуры шлака, времени реагирования расплавленного металла со шлаком, скорости доставки реагентов из объема металла к межфазной поверхности и отвода продуктов реакции в объем шлака и др. [3–6].

Современная практика ведения ЭШП нацелена на использование его возможностей прежде всего для рафинирования структуры металла, получения слитка с минимальным развитием процессов сегрегации, поскольку очистку металла от газов, вредных примесей и неметаллических включений можно весьма эффективно производить при изготовлении расходующего электрода для ЭШП. С этой точки зрения процесс ЭШП должен быть построен таким образом, чтобы переплав происходил в «квазистационарных» условиях с минимально возможным изменением основных параметров процесса, включая заглубливание расходующего электрода в шлак.

Попытки ряда отечественных и зарубежных исследователей интенсифицировать процессы рафинирования путем вибрации расходующего электрода, вращения и другими способами сегодня должны рассматриваться под иным углом зрения.

Эти способы дают неплохие результаты лишь для слитков малого диаметра на опытных, в крайнем случае, опытно-промышленных образцах. При переходе на промышленные слитки сталей и сплавов, склонных к сегрегации, с большой протяженностью двухфазной зоны (например высокоуглеродистые инструментальные стали и суперсплавы) указанные возмущения в процессе переплава неизбежно приводят к усилению сегрегации.

Поэтому современные системы управления ЭШП строят таким образом, чтобы исключить дополнительные возмущения, нарушения прежде всего гидродинамики шлаковой и металлической ванн при получении слитка ЭШП.



Вместе с тем, во всех системах управления ЭШП одним из основных параметров, измеряемых косвенно, однако используемым для управления процессом, является сопротивление шлаковой ванны. Очевидно, что этот параметр колеблется в процессе переплава не только из-за изменения химического состава шлака (который различными технологическими приемами можно поддерживать более или менее стабильным довольно долго), но и из-за постоянного движения металлических капель от торца расходуемого электрода к границе раздела шлаковой и металлической ванн. В этой связи исследования, проводимые в последние годы в области ЭШП под шлаками, содержащими металлический кальций, позволяют по-новому подойти к построению систем управления ЭШП [7–9].

Данные исследования проводятся с целью повышения эффективности ЭШП именно как процесса очистки переплавляемого металла. Повысить эффективность ЭШП (с точки зрения рафинирования металла от вредных примесей) можно путем интенсификации протекания массообменных процессов между жидким металлом и шлаком посредством как увеличения поверхности жидкой пленки на торце электрода, так и сокращения цикла ее обновления. Эта поверхность зависит от технологических режимов плавки, определяющих форму и размер заглобленного в шлак торца электрода.

В частности, при проведении экспериментов по ЭШП со стандартной системой управления, всегда реагирующей на изменение сопротивления шлаковой ванны перемещением расходуемого электрода, обнаружены некоторые интересные, по мнению авторов, факты. Например, при переплаве электродов небольших диаметров (до 100 мм) под шлаком  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$ , характеризующимся большой электропроводностью [7–9], обнаружены небольшие заглобления электрода. Он оплавляется вблизи поверхности шлаковой ванны, и его торец остается практически плоским.

При прочих равных параметрах переплава заглобление электрода в шлак увеличивается с уменьшением электропроводности флюса в следующей последовательности для использованных в экспериментах шлаках ЭШП:  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$ ,  $\text{CaF}_2$ , АНФ-1П,

АНФ-6. Наибольшее заглобление характерно для флюса АНФ-6. В данном случае электрод имеет конусный торец с развитой поверхностью металлической пленки, что дает основание (при прочих равных условиях) предположить возможность глубокого рафинирования. Однако на практике это справедливо только при сравнении с переплавами под флюсами АНФ-1П и  $\text{CaF}_2$ . Наилучшее рафинирование зафиксировано при переплаве под флюсом  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$  [7, 10]. Вероятно, в рафинирующих процессах, наряду с другими параметрами, немаловажную роль играет и скорость обновления поверхности реагирования, т. е. скорость формирования пленки и отрыва капель металла от торца электрода.

На толщину пленки и скорость обновления поверхности реагирования можно воздействовать внешними механическими способами, в частности вращением либо вибрацией расходуемого электрода [11–13]. Однако современная практика ЭШП не допускает применения указанных подходов из-за их отрицательного влияния на металлургическое качество слитков ЭШП.

Для определения возможностей более точного учета влияния указанных процессов на ЭШП как объект управления провели ряд экспериментов.

Рассмотрим механизм возникновения вибраций и факторы, влияющие на изменение скорости подачи электрода при ЭШП.

Периодические изменения скорости движения электрододержателя (верхней каретки печи ЭШП), а значит, и расходуемого электрода при ЭШП заготовок небольших сечений вызваны колебаниями значений тока переплава в результате периодического нарастания капли и понижения сопротивления шлаковой ванны из-за уменьшения в данном месте расстояния между торцом электрода и металлической ванной  $h_{\text{шл}}$ . Так, нарастающая на торце стального электрода капля металла уменьшает этот промежуток, вызывая кратковременное повышение тока. Например, при переплаве стального электрода диаметром 70 мм в шлаковой ванне из АНФ-6 высотой 50 мм превышение тока в момент отрыва капли составляет в среднем 20 % заданного значения тока переплава. При этом стандартная система автоматического управления ЭШП вызывает реверсное движение подающей расходуемый электрод каретки для приведения текущего значения тока к заданному. Это связано с тем, что система управления скоростью подачи электрода имеет обратную связь по току переплава —  $I_{\text{пер}} = I_{\text{зад}}$ . Ток переплава определяется подводимым напряжением  $U_{\text{пер}}$  и сопротивлением шлаковой ванны  $R^0$  ( $I_{\text{пер}} = U_{\text{пер}} / R^0$ ). Напряжение переплава имеет относительно стабильное значение, которое практически не изменяется в процессе переплава (за исключением переключения ступеней напряжения и падения напряжения на электроде). Сопротивление шлаковой ванны может изменяться,

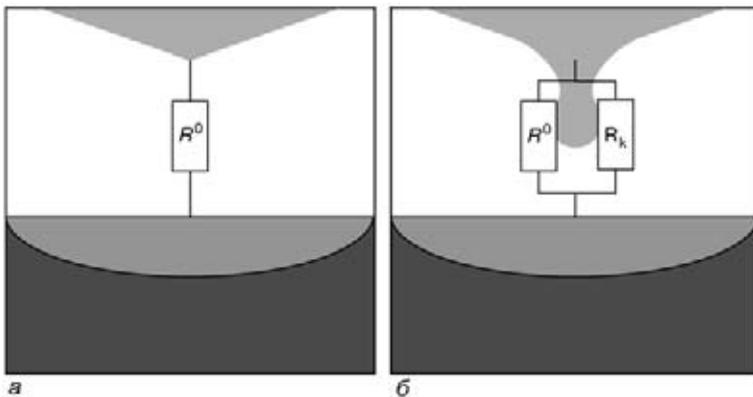


Рис. 1. Электрическая схема замещения процесса ЭШП: а — при отсутствии капил; б — с каплей



поскольку оно зависит как от физических свойств шлака ( $T_{пер}$ , химический состав), так и от значения  $h_{шл}$ . Принято, что при постоянной скорости плавления  $h_{шл}$  остается неизменным и за счет этого достигается стабильность тока переплава. На самом же деле это справедливо лишь для усредненных данных.

Сопротивление шлака — это функция  $h_{шл}$  и удельного сопротивления шлака  $R^0 \approx f(h_{раз}, \rho_{шл})$ . Тогда максимальное изменение сопротивления шлака при нарастании капли можно записать как  $\Delta R \approx f(h_{кап}, \rho_{шл})$ , где  $h_{кап}$  — длина капли перед отрывом от торца электрода. Уровень рассогласования по току составит

$$\Delta I = \frac{U_{пер}}{R^0} - \frac{U_{пер}}{R^0 - \Delta R} \Rightarrow \Delta I = \frac{U(R^0 - \Delta R) - UR^0}{R^0(R^0 - \Delta R)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta I = \frac{-U\Delta R}{R^0(R^0 - \Delta R)} \Rightarrow \Delta I = \frac{U_{пер}}{R^0} \frac{\Delta R}{\Delta R - R^0}$$

Значение  $K = \Delta R / (\Delta R - R^0)$  непосредственно определяет степень рассогласования. Этот коэффициент, характеризующий варьирование тока переплава, определяет изменение  $h_{шл}$  в результате каплеобразования. В «квазистационарных» условиях он должен быть постоянным.

Со скоростью подачи расходуемого электрода рассогласование тока связано прямо пропорционально. Чем больше рассогласование по току  $\Delta I$ , тем больше приращение скорости подачи  $\Delta v$ .

Делать выводы, анализируя коэффициент  $K$ , о причинах возникновения вибраций электрода при ЭШП сложно, поскольку  $\Delta R$  является функцией  $R^0$ .

Представим процесс ЭШП в виде известной схемы замещения с двумя параллельно соединенными сопротивлениями (рис. 1).

При этом левая ветвь представляет собой сопротивление шлаковой ванны в начальный момент (до образования капли), а правая соответствует моменту образования капли и зависит от ее геометрических размеров  $R_k$ .

Тогда можно записать

$$\frac{1}{R^0 - \Delta R} = \frac{1}{R^0} + \frac{1}{R_k}$$

Отсюда  $\Delta R = R^0 / (R_k / R^0 + 1)$ .

Примем, что при плавлении электрода у поверхности шлаковой ванны (маленькое заглубление) сопротивление в системе до образования капли равно  $R''^0$ , а при большом заглублении —  $R'^0$ . Поскольку можно допустить, что образующиеся капли имеют некий одинаковый размер, то  $R_k = \text{const}$ . В начальный момент плавления при отсутствии капли электрод находится в среднем положении и  $R^0 > R''^0 > R'^0$ . При увеличении разрядного промежутка  $R^0$  повышается, стремясь к  $R''^0$ . Тогда  $\Delta R$  возрастает, что приводит к увеличению  $|K|$ . При

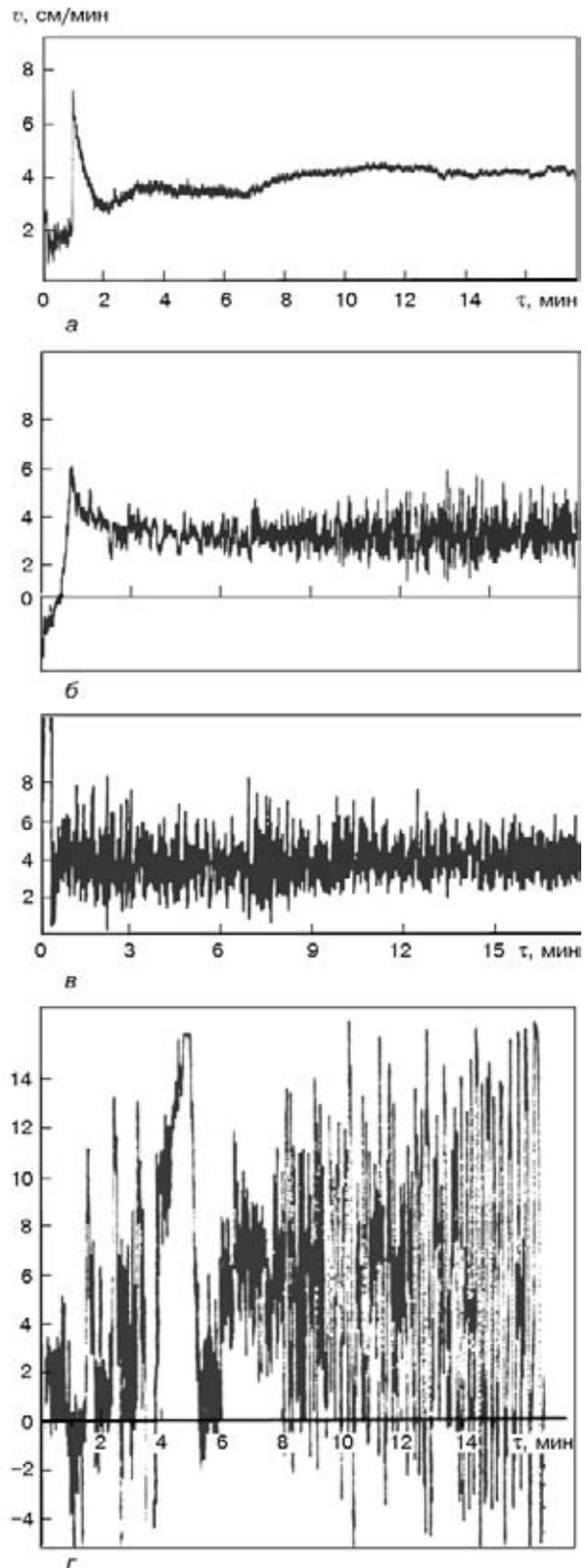


Рис. 2. Характер изменения скорости движения электрода при ЭШП под флюсами АНФ-6 (а), АНФ-1П (б) из чистого  $\text{CaF}_2$  (в),  $\text{CaF}_2$ -Ca (8 %) (г)

этом амплитуда движения расходуемого электрода увеличивается.

При уменьшении  $h_{шл}$   $R^0$  снижается и стремится к  $R''^0$ . Тогда  $\Delta R$  также уменьшается и  $|K|$  снижается, амплитуда движения электрода сокращается.



Таким образом, от заглупления электрода в шлак может зависеть возможность возникновения условий, при которых расходуемый электрод (каретка электрододержателя) двигаясь вниз, совершает возвратно-поступательные перемещения (вибрации). С учетом отмеченных колебаний по току возмущения, вызываемые такими колебаниями (вибрацией) электрода, могут быть весьма заметными и приводить к нежелательному усилению сегрегации в затвердевающем слитке. Контролировать возникновение указанных явлений можно путем постоянного отслеживания изменений скорости движения каретки во времени.

С этой целью разработали специальное устройство, представляющее собой блок из двух параллельно работающих систем измерения: аналогового датчика напряжения и цифрового импульсного датчика углового вращения. Использование подобного сочетания вызвано особенностями возможных технологических режимов переплава.

Так, например, при периодическом реверсном движении электрода использование цифрового датчика становится затруднительным из-за рассогласования частоты обновления информации о скорости и частоте вибрации электрода. В то же время использование аналогового датчика позволяет с достаточной степенью точности контролировать реверсивные скорости перемещения электрода и скорость его суммарного движения. При отсутствии вибрации применение цифрового датчика позволяет представить информацию в наглядном виде.

С помощью разработанной измерительной системы оценивали изменение скорости движения электрода в процессе ЭШП под различными флюсами (АНФ-6, АНФ-1П, из чистого  $\text{CaF}_2$  и  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$ ) при соблюдении постоянными всех прочих технологических параметров (ток, напряжение переплава, высота шлаковой ванны, размер электродов и коэффициент заполнения кристаллизатора).

Установили, что характер изменения скорости при прочих равных условиях строго связан с химическим составом флюса. Так, при использовании флюса АНФ-6 электрод подается в шлак равномерно, без заметных колебаний (рис. 2, а).

При переплаве под флюсом АНФ-1П и чистым фтористым кальцием появляются пульсации скорости движения электрода, достигающие 30 (для АНФ-1П) и 40 % (для  $\text{CaF}_2$ ) ее среднего значения (рис. 2, б, в).

Использование металлического кальция в качестве добавки к чистому  $\text{CaF}_2$  приводит к существенному увеличению пульсаций скорости подачи электрода (рис. 2, г).

Электропроводность флюса АНФ-6 гораздо ниже, чем у флюса, содержащего металлический кальций [8, 9]. Поэтому при его использовании для ЭШП электрод заглупляется в шлак на довольно большое расстояние. При переплаве под шлаком системы  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$  электрод находится в поверхностных слоях шлаковой ванны, что приводит к его неизбежным колебаниям по ходу плавления — самовибрации.

Вместе с тем современные измерительные приборы и быстродействующая вычислительная техни-

ка позволяют нивелировать рассмотренные явления и отбрасывать их как нежелательный «шум», который не будет восприниматься системой управления в качестве управляющего сигнала и приводить к ненужным перемещениям расходуемого электрода в процессе переплава. В свою очередь, это позволяет улучшить качество металла ЭШП.

Полученные результаты подтвердили концепцию принципиально новой системы управления ЭШП, созданную в ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы, которая основана и на подавлении самовибрации расходуемого электрода [14]. На промышленных печах ЭШП применение этой системы позволяет при переплаве под любыми типами флюсов достаточно точно фиксировать минимальное заглупление расходуемого электрода в шлак. Новая система управления успешно работает на 2,5-тонной печи ЭШП и проходит промышленную проверку на 10-тонных печах.

1. Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. Электрошлаковый переплав. — М.: Металлургия, 1969. — 240 с.
2. *Металлургия электрошлакового процесса* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. // — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
3. Григоренко Г. М., Лакомский В. В., Помарин Ю. М. О месте протекания физико-химических процессов при ЭШП // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1988. — № 2. — С. 70–75.
4. Клоев М. М., Каблуковский А. Ф. Металлургия электрошлакового переплава — М.: Металлургия, 1969. — 256 с.
5. Троянский А. А. К оценке лимитирующей стадии массопередачи в системе жидкий металл-шлак // Теория и практика металлургии. — 2005. — № 1–2. — С. 54–57.
6. Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП / А. Х. Дымнич, Л. Б. Медовар, А. А. Троянский, А. Д. Рябцев // Современ. электрометаллургия. — 2005 — № 4. — С. 6–9.
7. Рябцев А. Д. Электрошлаковый переплав металлов и сплавов под флюсами с активными добавками в печах камерного типа: Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 2004. — 334 с. — Машинопись.
8. Об электропроводности флюсов системы  $\text{CaF}_2\text{-Ca}$  / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, В. Ю. Мастепан, М. В. Самборский // Современ. электрометаллургия. — 2003 — № 1. — С. 3–4.
9. Атлас шлаков: Справ. изд. / Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1985. — 208 с.
10. Рябцев А. Д., Троянский А. А., Зац Е. Л. Рафинирование, модифицирование и микролегирование нержавеющей стали ЭИ 847Б // Металлург. и горноруд. пром-сть. — 2004. — № 8. — С. 73–76.
11. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Челябинск, 2002. — 40 с.
12. Чуманов В. И., Роцин В. Е., Чуманов И. В. Разработка технологии получения отливок переменного сечения методом ЭШП с вращением расходуемого электрода // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 1. — С. 5–11.
13. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. Влияние вибрации электрода на капельный перенос электродного металла при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка. — 1959. — № 1. — С. 35–38.
14. Ланцман И. А., Яковлев С. Г., Медовар Л. Б. Система автоматизации печи электрошлакового переплава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2001. — № 1. — С. 12–18.

Донец. нац. техн. ун-т

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 16.01.07