

О. С. Иванова

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

О ПРОБЛЕМАХ В УПРАВЛЕНИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ЭШТП В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА И УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПЛАВКИ

Приведены основные проблемы в управлении и автоматизации ЭШТП. Выявлено, что существующие методики выбора электрического режима ЭШТП рассматривают установку отдельно, вне комплекса, что не позволяет оптимизировать работу установки с точки зрения выполнения главных технологических требований для ЭШТП.

Ключевые слова: межэлектродный промежуток, управление, автоматизация, электрошлаковая тигельная плавка (ЭШТП), оптимизация.

Наведено основні проблеми в управлінні та автоматизації ЕШТП. Виявлено, що існуючі методики вибору електричного режиму ЕШТП розглядають установку окремо, поза комплексу, що не дозволяє оптимізувати роботу установки з точки зору виконання основних технологічних вимог для ЕШТП.

Ключові слова: міжелектродний проміжок, управління, автоматизація, електрошлакова тигельна плавка (ЕШТП), оптимізація.

The main problems of the control and automation ESCR are depicted. Revealed that the existing procedures for the selection of the electric mode ESCR consider installing separately, outside the complex doesn't allow to optimize the operation of the system in terms of performance of the main technological requirements for ESCR.

Keywords: interelectrode gap, control, automation, electroslag crucible remelting (ESCR) optimization.

Введение

Важнейшим направлением обеспечения качества и увеличения производительности металлургической продукции является создание автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Вместе с тем, металлургические процессы – одни из наиболее энергоёмких в промышленности. Энергосбережение при производстве продукции различными энергоносителями (электроэнергией, природным газом, инертными газами, кислородом, мазутом) – одно из важнейших направлений снижения себестоимости выплавляемой стали.

Проблема совершенствования существующих и создание новых систем управления процессами специальной электрометаллургии, в частности электрошлаковой тигельной плавкой (ЭШТП), не утратила своей актуальности. Наоборот, в связи с растущей потребностью в слитках, так называемых суперсплавов, для нужд энергетики, металлурги столкнулись с тем, что существующие сегодня системы управления ЭШТП не обеспечивают достаточной стабильности процесса, особенно контроля заглупления электрода в шлак и стабильной производительности [2].

Передовыми заграничными и отечественными фирмами в настоящее время разработано несколько моделей и систем управления ЭШТП. Иностранцы ориентируются на высокое качество исходных материалов, практически недостижимое для предприятий Украины. Поэтому внедрение таких разработок на отечественных предприятиях не приводит к положительному результату.

Отечественные разработки, как правило, ориентированы на стабилизацию отдельных параметров процесса, чего явно недостаточно. Поэтому, прежде всего, необходимо обратить внимание на улучшение автоматической системы управления печами ЭШТП (АСУ ТП ЭШТП), основанной на соответствующей математической модели.

Постановка задачи

В отличие от установок электрошлакового переплава (ЭШП), в технологическом смысле автономных, оптимизация режимов установок ЭШТП возможна только в составе технологической линии фасонного электрошлакового литья (ФЭЛ), центрострежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) или электрошлакового кокильного литья (ЭКЛ), так как продукт ЭШТП – жидкий металл – является промежуточным.

Главным технологическим требованием, предъявляемым к ЭШТП, является совпадение во времени в момент окончания плавки двух условий: накопление заданного количества жидкого металла и достижение им заданной температуры.

Возможны два варианта работы комплекса ФЭЛ, ЦЭШЛ или ЭКЛ, когда порядок работы комплекса определяется в первом случае – тигельной плавкой, а во втором – литейным оборудованием. В первом случае необходимость повышения производительности, а во втором – необходимость согласования плавильного и литейного оборудования ставят вопросы управления электрическим режимом ЭШТП не только с целью удовлетворения главного технологического требования, но и с целью минимизации времени плавки (в первом случае), окончания плавки к заданному моменту времени (во втором).

Обзор литературных данных показал, что существующие методики выбора электрического режима ЭШТП рассматривают установку отдельно, вне комплекса, что не позволяет оптимизировать работу установки с точки зрения выполнения главных технологических требований для ЭШТП [3].

Решение по управлению требует наличия описания электрошлакового тигля, как накопителя и непосредственно объекта управления. Если для классического электрошлакового переплава этот вопрос достаточно хорошо рассмотрен, то для установок ЭШТП в литературных источниках такой информации выявлено недостаточно.

Поэтому по результатам анализа нужно сформулировать пути решения данного вопроса.

В результате анализа установлено, что работу необходимо проводить по двум направлениям: создание автоматизированной системы контроля и управления; разработка математической модели с целью исследования процесса электрошлакового переплава и создание оптимальной математической модели управления в функции сосредоточенных параметров производительности.

Целью исследований является изучение регулировочных характеристик установки ЭШТП, так как они отражают влияние на режим печи воздействий, которые непосредственно и есть управляющими – изменение положения электрода в шлаковой ванне и изменение напряжения. С целью оценки влияния на эти факторы тепловых процессов в условиях нелинейности шлаковой ванны необходимо построить статические и динамические регулировочные характеристики с и без учёта нелинейности.

Результаты исследований

Особое значение имеет регулировочная характеристика при изменении положения электрода в шлаковой ванне – одном из основных воздействий при динамическом управлении режимом плавки.

В то же время прямое измерение межэлектродного промежутка затруднено, и для описания положения электрода в шлаке необходимо использовать косвенные параметры – электрический ток или электрическое сопротивление шлаковой ванны. В связи с этим, вместо регулировочной характеристики при изменении положения электрода в шлаковой ванне обычно строятся регулировочные характеристики, которые принадлежат функции указанных косвенных параметров.

Такие характеристики называются электрическими. Фактически они являются внешними характеристиками источника питания с добавочным сопротивлением в виде сопротивления токоподводов и не отражают электротехнологических процессов в самой ванне.

Определение связей параметров электрического режима шлаковой ванны осуществляют с помощью электрических характеристик, полученных экспериментальным или расчётным путём зависимостей входного сопротивления ванны и положения электрода в ней [1]. Так как шлаковая ванна в общем случае является условно-нелинейным элементом, зависимость величины межэлектродного промежутка от сопротивления ванны является неоднозначной.

Таким образом, регулировочная характеристика может быть представлена в виде совокупности электрической характеристики, описывающей процессы в электрической цепи независимо от электротехнологических режимов установки, и зависимости величины межэлектродного промежутка от сопротивления шлаковой ванны, отражающей влияние электротехнологических режимов ванны на её электрический режим.

В установках электрошлакового переплава нелинейностью шлаковой ванны часто можно пренебречь, что в значительной мере упрощает расчёты электрических режимов печей. В установках электрошлаковой тигельной плавки шлаковая ванна обладает существенной нелинейностью, и поэтому возможность такого упрощения требует специального анализа.

Проявление этой нелинейности из-за высокой инерционности процессов преобразования электрической энергии в тепловую различно при разных скоростях изменения режимов. С этой точки зрения все задачи управления установками ЭШТП можно разделить на 2 группы: статические, связанные с выбором оптимальных режимов плавки; динамические, сопряженные с анализом быстро изменяющихся режимов (например, при автоматическом регулировании режимов).

Мы определили, что для мощности ванны, как являющейся одним из параметров режимов шлаковой ванны, операторное уравнение в относительных отклонениях, описывающее регулировочные характеристики как по положению электрода в шлаке, так и по напряжению, имеет вид:

$$\Delta P_{\text{ш}} = \frac{2}{1 + \psi W_{\text{пр}}} \cdot \Delta U_2(p) + \frac{\psi / C}{1 + W_{\text{пр}}} \cdot \Delta h(p), \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ш}}(p)$, $\Delta U_2(p)$, $\Delta h_{\text{ш}}(p)$ – относительные отклонения мощности шлаковой ванны вторичного напряжения трансформатора и межэлектродного промежутка в операторной форме соответственно; ψ – характерный параметр подводящей сети печи.

Здесь передаточная функция $W_{\text{пр}}(p)$ выступает как характеристика тепловой условной нелинейности шлаковой ванны.

Поэтому при рассмотрении установки как квазилинейной можно считать $W_{\text{пр}}(p) = 0$, тогда выражение (1) превращается в известное:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 2\Delta U_2(p) + \frac{\psi}{C} \cdot \Delta h_{\text{ш}}(p). \quad (2)$$

где $C = (R_{\text{ш}}/R_{\text{ш}}) \cdot h$ – коэффициент, зависящий от положения электрода в шлаке; $R_{\text{ш}} = dR_{\text{ш}}/dh$.

При учёте нелинейности для статических характеристик можно вместо передаточной функции $W_{\text{пр}}(p)$ использовать коэффициент передачи $K_{\text{пр}}$ (так как в установившемся режиме $W_{\text{пр}}(p)|_{p=0} = K_{\text{пр}}$). Тогда вместо (1) имеем:

$$\Delta P_{\text{ш}} = \frac{2}{1 + \psi K_{\text{пг}}} \cdot \Delta U_2(p) + \frac{\psi / C}{1 + K_{\text{пг}}} \cdot \Delta k(p). \quad (3)$$

Зависимости межэлектродного промежутка от сопротивления шлаковой ванны имеют особое самостоятельное значение, поскольку сопротивление шлаковой ванны используется в качестве косвенного параметра управления, отражающего величину межэлектродного промежутка.

Считая постоянными химсостав и высоту ванны и учитывая, что для статических режимов $W_{\text{пг}}(p)|_{p=0} = K_{\text{пг}}$, можно записать:

$$\Delta h = C \cdot \frac{1 + \psi K_{\text{пг}}}{1 + CK_{\text{пг}}} \cdot R_{\text{ш}}. \quad (4)$$

Анализ уравнения показывает, что нелинейность шлаковой ванны, влияние которой выражается через коэффициент $K_{\text{пг}}$ уменьшает крутизну статической зависимости

$$h = f(R_{\text{ш}}).$$

Влияние нелинейности проявляется в различной степени в зависимости от положения рабочей точки режима. При приближении к режиму максимальной мощности (ψ стремится к нулю) влияние нелинейности ослабевает.

Статическая зависимость сопротивления ванны от межэлектродного промежутка при учёте нелинейности неоднозначна. Увеличение мощности при росте питающего напряжения приводит к увеличению межэлектродного промежутка при неизменном сопротивлении ванны.

Известно, что для электрошлаковых печей режим максимальной мощности наступает независимо от ступени напряжения при неизменном сопротивлении шлаковой ванны, равно полном сопротивлению токоподвода, то есть при условии $R_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}/Z = 1$

Для квазилинейных печей, где сопротивление ванны однозначно определяется величиной h , максимум регулировочной характеристики $P_{\text{ш}} = f(h)$ независимо от ступени, напряжения соответствует одному и тому же значению h .

Аналогично увеличиваются межэлектродные промежутки и в других режимах, что нарушает условия оптимальности технологии. Для снятия этого противоречия необходимо уменьшать сопротивление ванны, из зоны экономичных режимов ($R_{\text{ш}} > 1$), что сужает зону режимов с понижением расходов энергии. Учёт этого явления особенно важен для крупных печей с повышенными сопротивлениями токоподводов и с низкими сопротивлениям ванны.

Эти положения позволяют сделать вывод о том, что при стабилизации сопротивления шлаковой ванны проявление нелинейности будет вести к изменению положения электрода в шлаке.

Это явление необходимо принимать во внимание при наиболее распространённом на практике управлении режимом плавки со стабилизацией сопротивления шлаковой ванны. Во избежание отклонения положения электрода в шлаке от заданного требуется введение в задание коррекции функции мощности шлаковой ванны по $R_{\text{ш}}$.

Исходя из выражения (3) можно сделать вывод о непосредственном влиянии нелинейности шлаковой ванны на ход статических регулировочных характеристик через коэффициент $K_{\text{пг}}$.

Направленность и степень влияния нелинейности определяются положением рабочего режима, который характеризуется параметром ψ .

Отсюда следует, что влияние нелинейности ВАХ шлаковой ванны на её мощность, описанное для статических характеристик коэффициентом $K_{пл}$, наиболее существенно в начальный период плавки, когда значение сопротивления подводящей сети печи из-за большей ширины электрода велико, и режим максимальной мощности расположен наиболее близко к точке рабочего режима. В дальнейшем по мере плавления электрода и уменьшения его сопротивления параметры подводящей сети улучшаются, режим максимальной мощности смещается в нижнюю часть шлаковой ванны и влияние нелинейности ослабевает.

Применительно к одному и тому же периоду плавки влияние нелинейности проявляется сильнее на более крупных печах, характеризующихся большими значениями сопротивлений подводящей сети печи.

Важным следствием вышесказанного может являться то, что пренебрежение нелинейностью ВАХ шлаковой ванны при расчётах не позволит определить момент возможного перехода через точку максимума мощности при регулировании режима установки, что нарушает работу регулятора режима из-за изменения направления отработки возмущения и может привести к некорректной работе регулятора и возникновению аварийного режима.

Из приведённого анализа ясно, что при решении статических задач – выборе области оптимальных режимов установки ЭШТП, если не учитывать влияние нелинейности шлаковой ванны как приёмника электроэнергии, будут значительные погрешности в расчётах.

Так, максимальная погрешность определения мощности шлаковой ванны при анализе всего диапазона изменения положения электрода в ванне достигает 15 %. Вблизи рабочего для ЭШТП режима (малое заглубление электрода в шлак) при отклонении межэлектродного промежутка на 10 % погрешность определения мощности ванны составляет 5-8 %. Для массовой скорости плавки значения погрешностей аналогичны.

Значения соответствующих погрешностей для напряжения шлаковой ванны составляют 40 и 20 %, а для тока печи – 30 и 6-8 %.

Наиболее существенна погрешность определения сопротивления шлаковой ванны. Максимальная погрешность достигает 80 %, а при 10%-ном отклонении от рабочего режима погрешность доходит до 8-10 %.

Приведённые данные не оставляют сомнений в том, что для целей статического анализа установки ЭШТП должны использоваться регулировочные характеристики, полученные при представлении шлаковой ванны как приёмника электроэнергии условно-нелинейным элементом.

Выводы

- Все задачи управления установками ЭШТП можно разделить на 2 группы: статические, связанные с выбором оптимальных режимов плавки; динамические, связанные с анализом быстро меняющихся режимов (например, при автоматическом регулировании режимов).

- Математическая модель процесса ЭШТП должна позволять определять: в электроде – температурное поле и скорость плавления; в шлаковом слое – температурное поле, поля гидродинамических скоростей и поля электрических потенциалов; в жидком металле – температурное поле.

- Регулировочная характеристика может быть представлена в виде совокупности электрической характеристики.

- Для целей статического анализа установки ЭШТП должны использоваться регулировочные характеристики, полученные при представлении шлаковой ванны как приёмника электроэнергии условно-нелинейным элементом.



Список литературы

1. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др. / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара; АН УССР, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – Киев : Наук. думка, 1988. – 170-175 с.
2. Один миллион тонн стали ЭШП выплавлен с использованием ЭВМ / В. В. Моисеев, М. К. Закамаркин, М. А. Лоиферман, В. В. Четвертных // Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. – Киев: Проблемы специальной электрометаллургии: Международный научно-теоретический и производственный журнал НАН Украины. 2001. – № 3. – С. 15-19.
3. *Миронов Ю. М.* Основы управления электрошлаковыми печами : Учеб. пособие / Ю. М. Миронов // Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова. – Чебоксары : ЧГУ, 1987. – 57-67 с.

Поступил 10.02.2015

**К сведению читателей
и подписчиков!**

**Телефон редакции
журнала «Процессы литья»:
(044) 424-04-10**