

УДК 621.365.61

Исследование процессов, приводящих к поломке электродных свечей в дуговой сталеплавильной печи

Д. В. Маслов*, В. П. Рубцов

Исследованы механические процессы, проходящие в системе электрод–шихта на первой стадии плавки в момент зажигания дуги. Предложена математическая модель, описывающая механизм удара электрода о шихту. Приведены результаты исследования удара на математической модели в диапазоне наиболее часто используемых насыпных плотностей загружаемой шихты. Определен диапазон безопасных с точки зрения целостности электродов скоростей перемещения.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, регулятор мощности, электрод.

Введение

В настоящее время доля производства стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) растет с каждым годом. По состоянию на 2011 г. она составила 28%. По прогнозам к 2017 г. она составит 37%, постепенно вытесняя с рынка мартеновский способ в связи с его экологическими и энергетическими недостатками. Большинство сталелитейных заводов на которых используются дуговые печи были построены в 1960 — 1980 гг. На сегодняшний день почти все электротехнологическое оборудование таких предприятий технически устарело и требует модернизации или полной замены.

Применение описываемого в данной статье технического решения наиболее актуально при модернизации и техническом перевооружении действующих дуговых печей. Объясняется это отсутствием необходимости полной замены оборудования на новое для получения положительного экономического эффекта от снижения расхода электродов.

Постановка задачи

За быстродействие, производительность и качество работы ДСП отвечает регулятор мощности. Это самостоятельный агрегат, в состав которого входят приводы перемещения электрода и система управления ими. Задача регулятора состоит в поддержании заданного значения вводимой в печь активной мощности и реализуется за счет перемещения электродов для регулирования расстояния от нижнего торца электрода до загрузки, а именно длины дуги.

Известно, что быстродействие регулятора мощности ДСП зависит от скорости перемещения электрода, поэтому на сегодняшний день сформировалась тенденция увеличения скоростей перемещения электродов. Работа электродуговой печи на повышенных скоростях перемещения электрода на начальных этапах плавки приводят к возникновению процессов, пагубно влияющих на механическую целостность электродных свечей, узлов и механизмов печи. Опыт работы с высокими скоростями показывает увеличение расхода электродов, связанного с поломками при зажигании

* maslovdv@ya.ru

дуги на твердую шихту, поэтому стоит обратить особое внимание на процессы, протекающие при соприкосновении электрода и шихты, и влияние их на работу регулятора мощности.

От скорости перемещения электрода зависит сила его удара, возникающая на стадии зажигания дуги при упоре в шихту. Результатом воздействия этих сил зачастую является поломка электрода.

Данная работа посвящена изучению процессов, происходящих в момент соприкосновения электрода и загруженной в печь шихты на этапе зажигания дуги на холодную шихту.

Дуговые сталеплавильные печи широко используются на литейных и машиностроительных заводах. В качестве шихтового материала зачастую используется лом черных металлов. Состав лома зависит от завода и его продукции. Это могут быть отходы собственного производства — брак, литейные отходы, обрезь слитков, отходы при прокатке и ковке, стружка от обдирки слитков, отходы, возвращаемые заводами потребителями, направляемое на переплав изношенное и устаревшее оборудование, инструмент, а так же лом, собранный отделениями вторчермета. Очевидно, что такие составляющие загружаемого в печь лома неоднородны по составу и имеют разнообразную форму и размеры. При загрузке печи загрузочной корзиной или бадьей спрогнозировать распределение лома в ее пространстве практически невозможно. Велика вероятность попадания крупных элементов в верхние слои загруженного лома и в область горения дуги — подэлектродное пространство.

В начале плавки начинается процесс зажигания дуги. При этом электрод перемещается вниз до касания с шихтой. Момент касания сопровождается резким скачком тока, т. е. появляется ток короткого замыкания. Поскольку инерционность системы управления приводом достаточно велика, происходит перерегулирование, т.е. после касания электрода о шихту проходит некоторое время, когда сигнал о наличии короткого замыкания, по которому регулятор понимает, что электрод соприкоснулся с шихтой, уже сформировался, но электрод еще не остановился — он по-прежнему продолжает движение в шихту с прежней скоростью. В процессе взаимодействия электрода с куском шихты возникают усилия как в электроде так и в шихте. Результатом соударения может служить либо деформирования кусков шихты под электродом, либо, в случае плотной шихты, возникновение критических усилий в самом электроде.

Если при попадании торца электрода на ровную поверхность загруженной шихты в электроде возникают только осевые усилия, то при попадании на наклонную поверхность крупногабаритного элемента шихты помимо осевых, менее опасных, возникают радиальные усилия, которые в большинстве случаев приводят к поломке электродной свечи в месте их соединения (в ниппельном гнезде).

Помимо описанных выше причин поломок электродов, в связи с особенностями подготовки шихты, имеет место еще один алгоритм разрушения электрода — попадание неметаллических (токонепроводящих) элементов в печь при ее завалке. В таком случае в режиме зажигания дуги электрод соударяется с токонепроводящим куском шихты, а сигнал о касании электрода с шихтой не формируется, поскольку в цепи отсутствует ток, необходимый для определения момента прекращения движения электрода вниз и формирования сигнала на подъем и растягивания дуги.

Для снижения числа поломок электродов в момент зажигания дуги и разработки регулятора мощности с возможностью исключения поломок электродов нужно исследовать процессы, происходящих в момент соприкосновения торца электрода и куска шихты. Помимо этого следует иметь полное представление о параметрах шихты и их влиянии на вероятность поломок электродов. Результаты исследований были опубликованы ранее в [1].

В настоящей работе рассмотрен и смоделирован механизм осевого удара.

Структурная схема

Для изучения процессов, происходящих в момент соприкосновения электрода с шихтой, была составлена математическая модель системы механизм перемещения электрода–электрод–шихта (рис. 1), причем привод в этой модели отсутствует и заменяется только выходной характеристикой — крутящим моментом вала, что позволяет сделать ее инвариантной для разных типов электроприводов.

Отметим, что проблема поломок электродных свечей наиболее актуальна при использовании электромеханических регуляторов мощности. В гидравлических регуляторах проблема решается путем использования

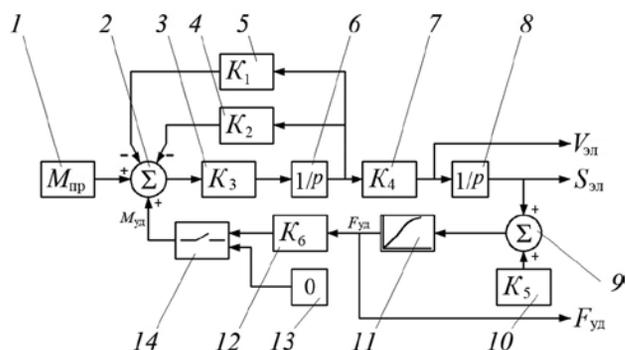


Рис. 1. Структурная схема системы механизм перемещения электрода–электрод–шихта:

1 — задающий сигнал; 2 — сумматор; 3 — коэффициент механической передачи; 4, 5 — блоки, учитывающие вязкое и сухое трения; 6, 8 — интеграторы; 7 — коэффициент механической передачи; 9 — сумматор; 10 — начальное положение электрода; 11 — упругие характеристики шихты; 12 — плечо действия силы; 13 — нулевой сигнал; 14 — ключевой элемент

в цепи управления перемещением электрода датчика давления гидравлической жидкости. В случае электро-механического привода установка подобных датчиков приводит к раскачиванию системы за счет использования в их конструктиве гибких частей, что отрицательно сказывается на качественных показателях регулятора мощности.

В качестве задающего сигнала в модели используется величина крутящего момента на валу электродвигателя (блок 1). Механизм перемещения электрода представлен в общем виде и включает в себя две механические передачи: преобразование крутящего момента в окружную скорость и окружной скорости в линейную. Крутящий момент с вала электродвигателя преобразуется в окружную скорость исполнительного элемента механизма перемещения, например редуктором. За это преобразование отвечают блоки 3 и 6. При этом учитываются потери на сухое и вязкое трение отдельных узлов и деталей (вязкость смазочного материала, трение в подшипниках и т.д.). Они соответственно вводятся в систему в виде отрицательных обратных связей по окружной скорости (блоки 4 и 5) при помощи сумматора 2. Преобразование окружной скорости в линейную происходит посредством механической передачи (шестерня–рейка, винт–гайка и т. д.), моделируемой при помощи усилительного блока 7. Заметим, что величина коэффициента усиления равна передаточному отношению механической передачи. Скорость движения стойки электрододержателя, приводимая в движение при помощи механической передачи, равна скорости движения электрода, поскольку электрод и стойка жестко связаны друг с другом посредством электрододержателя. Зная скорость перемещения электрода в каждый момент времени и его начальное положение, можно рассчитать положение электрода. Эта операция выполняется путем интегрирования скорости по времени и за нее отвечает интегрирующий блок 8.

Соударение электрода с шихтой моделируется следующим образом.

Движение электрода начинается из начального положения, задаваемого блоком 10, со скоростью v . Начальное положение электрода задается вручную и считается от нулевой точки. В данном случае в качестве нуля выбирается уровень завалки шихты, т.е. уровень касания нижнего торца электрода и шихты. Сигнал перемещения, полученный после пересчета количества оборотов в линейную скорость и дальнейшего ее интегрирования, сравнивается при помощи сумматора 9 с заданным значением положения электрода. Поскольку перемещение по умолчанию является отрицательным сигналом (направление движения электрода — от начального положения к нулю), то сумма сигналов постоянно уменьшается. До момента достижения суммы сигналов нулевого уровня на вход сумматора 2 подается нулевой сигнал, вырабатываемый блоком

13, через ключевой элемент 14. Когда сумма сигналов перемещения станет равной нулю, т.е. электрод коснется шихты, ключевой элемент меняет свое положение и вместо нулевого сигнала, обозначающего отсутствие тока в цепи, вводит в обратную связь элементы математической модели, описывающие упругие характеристики шихты (блок 11) и перевод усилия в электроде в момент сопротивления (блок 12). Далее происходит процесс сжатия шихты. Перемещение электрода после касания его с шихтой равно величине просадки шихты. Таким образом, на выходе блока 11 формируется сигнал — сила, возникающая в шихте пропорционально перемещению электрода после соударения с ней. Эта сила согласно третьему закону Ньютона будет действовать одинаково на шихту и электрод.

Нагрузка на механизм перемещения электрода будет возрастать с ростом усилия, создаваемого шихтой. Поэтому выходной сигнал блока 11 через усилительный блок 12 поступает на вход механизма перемещения с отрицательным знаком, замедляя движение электрода.

Исследование математической модели

По причине нелинейности предлагаемой системы дальнейший анализ и синтез целесообразно проводить методами структурного моделирования, используя пакет прикладных программ MatLAB Simulink. Предложенная структурная схема, описывающая механизм удара электрода о шихту, легла в основу математической модели, представленной на рис. 2. Наименования блоков, приведенных на рис. 2, соответствуют оригинальным звеньям используемого программного комплекса.

В качестве входного сигнала взяты два импульса крутящего момента, моделирующие разгон привода и выход его на установившийся режим.

Упругие характеристики шихты задаются в табличном виде в блок Lookup Table в виде зависимости усилия от просадки шихты.

В качестве ключевого элемента 14 (см. рис. 1) выступает переключатель Switch. Его функционал позволяет подавать на выход поочередно два разных сигнала в зависимости от уровня управляющего сигнала, сравниваемого с заданным значением (в нашем случае с нулем).

Проведем анализ построенной системы. Для проверки правильности ее работы разорвем связь по моменту сопротивления от удара электрода в шихту. На рис. 3 представлены осциллограммы скорости и перемещения электрода. Без ограничения расстояния под действием момента с электропривода электрод должен постоянно перемещаться вниз. Полученные осциллограммы подтверждают это предположение, вследствие чего можно сделать выбор об адекватности модели.

Теперь восстановим разорванную связь, введя тем самым ограничение нижнего положения в виде уровня положения загруженной шихты. Электрод должен

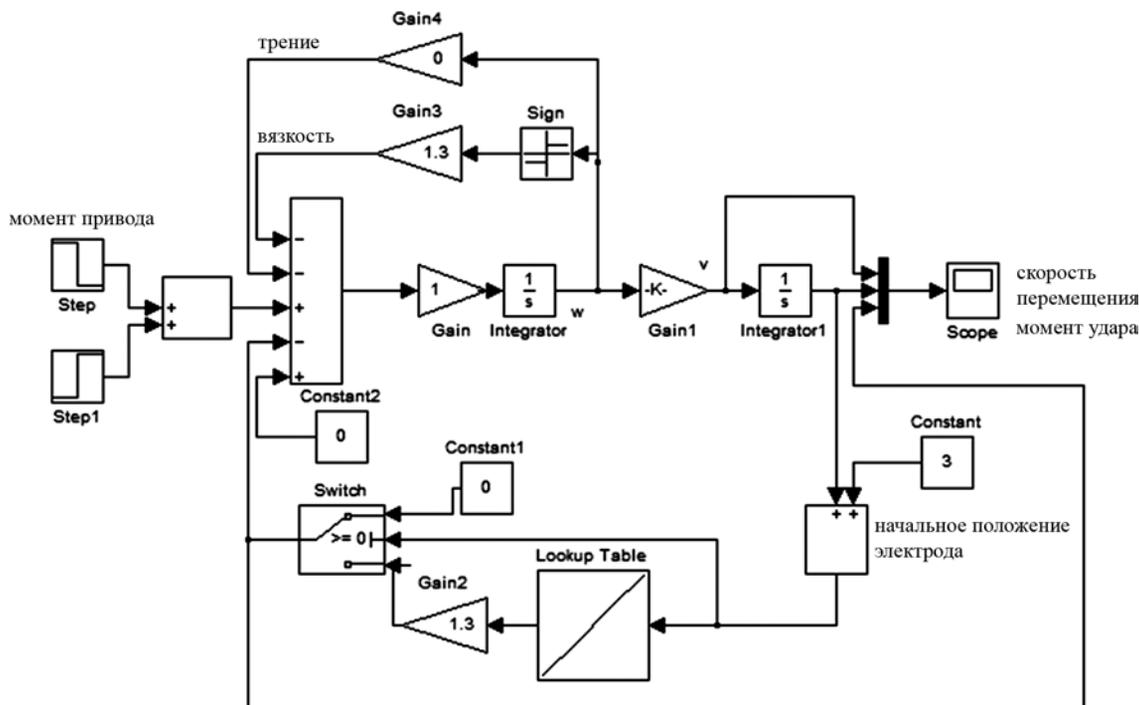


Рис. 2. Математическая модель системы механизма перемещения электрода–электрод–шихта без привода

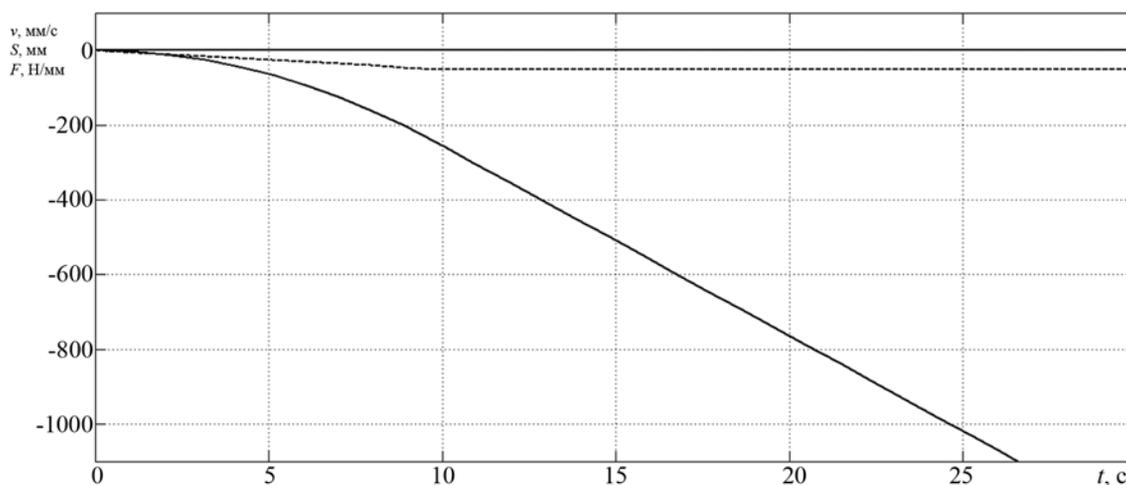


Рис. 3. Перемещение электрода вниз без ограничения

перемещаться от начального положения, задаваемого вручную и составляющего 1000 мм (среднее расстояние, которое проходит электрод от верхнего положения до касания с шихтой на начальной стадии плавки для электродуговых печей малой емкости). При этом должны наблюдаться момент касания, характеризующийся началом резкого возрастания напряжения в электроде, и дальнейшее его перемещение по инерции в шихте, т.е. перемещение ниже заданного уровня шихты.

Проведем анализ и синтез системы для шихты с насыпной плотностью $1,2 \text{ т/м}^3$. Построим осциллограммы скорости, перемещения и усилия при помощи предложенной модели (рис. 4).

Анализ полученных результатов показывает, что электрод опустился до уровня загруженной шихты

за 24,6 с, при этом в момент касания начинается резкое возрастание величины усилия в электроде; скорость начинает уменьшаться. Переход скорости через ноль означает, что электрод полностью остановился. При этом отметим, что произошло это через 0,6 с и электрод погрузился в шихту на 12 мм (рис 5). Усилие, действующее одновременно на шихту и на электрод, составило 61,5 Н. Для получения величины давления или напряжения в электроде следует ввести учет площади, на которую воздействует полученная сила. Обычно контакт электрода с шихтой происходит в точке с достаточно малым сечением (площадь контакта лежит в пределах $1 - 5 \text{ мм}^2$), поэтому для пересчета напряжения необходимо полученное усилие поделить на площадь соударения (принимается 3 мм^2). Таким

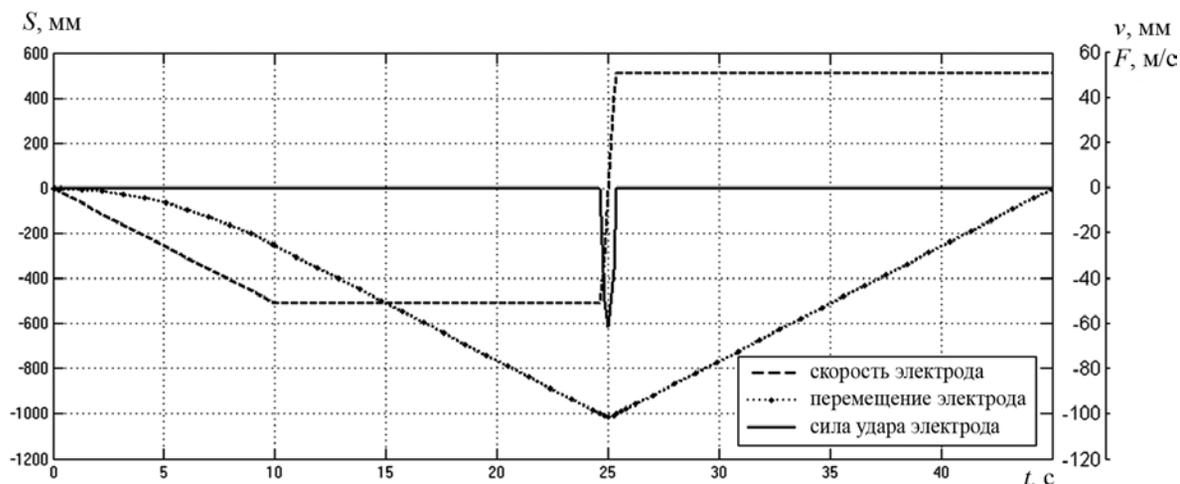


Рис. 4. Усилие, возникающее при ударе, скорость и перемещение электрода

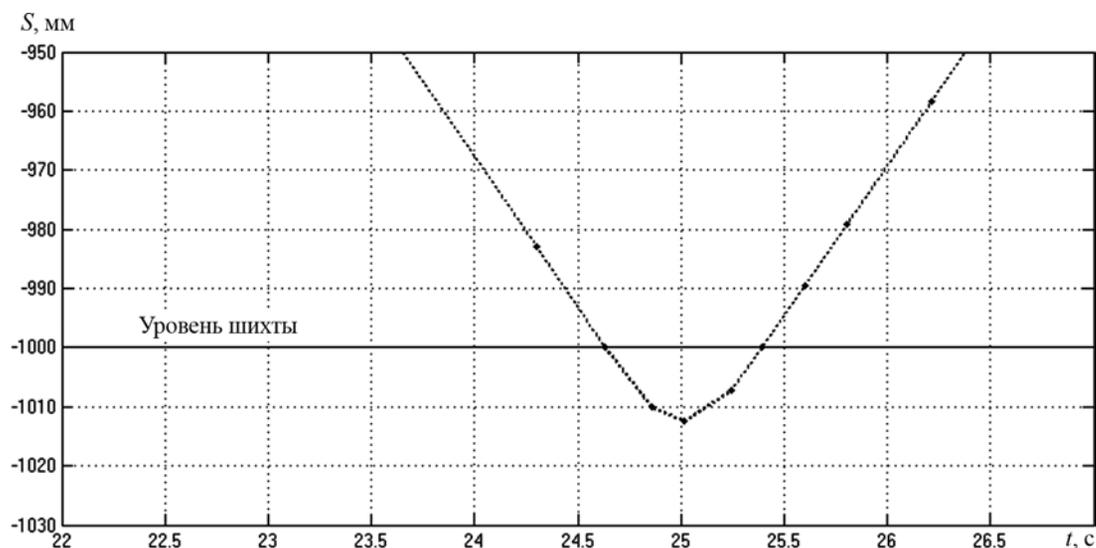


Рис. 5. Перемещение электрода

образом, максимальное напряжение в месте касания составит 20,5 МПа. Отметим, что дальнейшее уменьшение усилия, увеличение скорости и подъем электрода связаны исключительно со спецификой построения математической модели, а именно с отсутствием регулятора.

Очевидно, что механическое напряжение в электроде будет зависеть от двух параметров: шихты и скорости движения электрода в момент удара. Проведем на модели серию расчетов с различными комбинациями скоростей перемещения электрода и упругих характеристик шихты (т.е. для разных насыпных плотностей). По полученным данным можно построить семейство зависимостей продольного напряжения в электроде от скорости перемещения электрода для разных насыпных плотностей (рис. 6).

Большинство графитированных электродов, выпускаемых в нашей стране, имеют приблизительно одинаковые свойства. Так, предельно допустимое напряжение при сжатии составляет 20,6 МПа. Отметим это значение механического напряжения на семействе графиков, получим предельные скорости перемещения

электродов для разных плотностей загруженной шихты. Например, при завалке дуговой печи ломом с насыпной плотностью $1,2 \text{ т/м}^3$ в момент касания электрода с шихтой скорость не должна превышать 3,8 м/мин. В противном случае это приведет к поломке электродной свечи. Причем возможно не только скалывание части электрода в месте касания с куском шихты, но и поломка в более слабом месте — в ниппельном соединении, а, следовательно, большой кусок графитового электрода попадет в ванну печи и науглеродит металл.

Для предотвращения поломок электродных свечей при выборе скорости перемещения электродных свечей следует придерживаться уровня в 80 — 85% от предельно допустимых значений. Рекомендованные скорости с учетом запаса в 20% приведены в таблице.

Выводы

Предложенная в настоящей статье математическая модель системы механизм перемещения–электрододе-

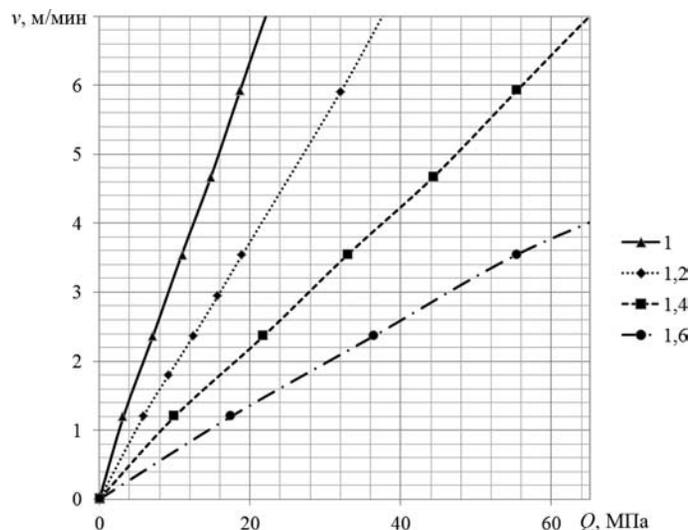


Рис. 6. Зависимость напряжения Q от скорости v

жатель–электрод является универсальным инструментом для описания механических процессов, проходящих при касании электрода с загруженной в дуговую печь шихтой на первой стадии плавки в момент зажигания дуги на холодную завалку. Универсальность модели заключается в ее инвариантности в отношении типа привода.

Рекомендуемые скорости перемещения электродов

Насыпная плотность шихты, 160 т/м^3	Скорость перемещения электрода, м/мин
1,0	5,5 - 5,8
1,2	3,3 - 3,5
1,4	1,9 - 2,0
1,6	1,2 - 1,3

Проведенные исследования на данной модели позволяют ввести ограничения при выборе величины скорости перемещения электрода при различных свойствах шихты, снижая тем самым риск поломки электродной свечи.

Использование данной модели в совокупности с математической моделью регулятора мощности позволило оценить качественные показатели его работы с точки зрения целостности электродных свечей и сохранения наивысшего быстродействия.

Литература

1. Маслов Д.В. Определение основных параметров, влияющих на целостность электродных свечей в дуговых печах // Электротехника. 2013. № 8. С. 43 — 47.

Статья поступила в редакцию 22.10.2015