УДК 669:658.011.54./011.56

П.В.ВОЛГИН
Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет)

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА КЛИНКЕРА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Рассматривается система автоматического управления процессом обжига клинкера во вращающейся печи, которая обеспечивает оптимальную стабилизацию показателей качества клинкера. Разработанные алгоритмы позволяют получить клинкер с необходимыми показателями качества, учитывая технологические особенности процесса и ряд факторов, отрицательно влияющих на качество управления.

The paper studies a system of automatic control of the clinker burning process in rotary furnace. This automatic control system provides optimum stabilization of clinker quality indicators. The algorithms developed enable clinker production with required characteristics taking into account technological peculiarities of the process and factors negatively affecting quality control.

Целью работы является создание системы автоматического управления процессом обжига клинкера, которая обеспечивает оптимальную стабилизацию показателей его качества. Обжиг клинкера во вращающейся печи можно рассматривать как типичный процесс, в котором показатели качества являются случайными величинами. Этот факт делает практически невозможным использование детерминированных математических моделей. Помимо этого появляется еще и ряд сложностей, непосредственно связанных с технологическими особенностями процесса.

Процесс обжига клинкера проходит во вращающейся печи, которая представляет собой длинный, расположенный под углом около 3° к горизонту цилиндр, сваренный из листовой стали с огнеупорной футеровкой. Печь работает по принципу противотока. Со стороны верхнего (холодного) конца автоматическим питателем подается сырье в виде шлама, а со стороны нижнего (горячего) конца вдувается природный газ, сгорающий в виде факела на протяжении 20-30 м длины печи. Горячие газы поступают навстречу сырью, которое занимает только часть печи по поперечному сечению и при ее вращении со скоростью 1-2 об/мин медленно движется к нижнему концу, проходя различные температурные зоны. В зависимости от характера протекающих процессов вращающуюся печь условно можно разделить на шесть температурных зон. Рассмотрим процессы, проходящие в зонах, начиная с подачи сырья.

В зоне испарения происходит высушивание поступившего сырья при постепенном повышении температуры от 70 до 200 °С, поэтому первую зону называют еще зоной сушки.

В зоне подогрева, которая следует за сушкой сырья, при постепенном нагревании сырья от 200 до 700 °С сгорают находящиеся в нем органические примеси. Из глинистых минералов удаляется кристаллохимическая вода (при 450-500 °С) и образуется каолинитовый ангидрид $A1_2O_3 \cdot SiO_2$ и другие подобные соединения.

В зоне кальцинирования (ее протяженность 20-23 % длины печи) температура обжигаемого материала поднимается от 700 до 1100 °С, здесь завершается процесс диссоциации углекислых солей кальция и магния и появляется значительное количество свободной окиси кальция. Также в этой зо-

не происходит термическая диссоциация $CaCO_3$ – эндотермический процесс, идущий с большим поглощением тепла (1780 кДж на 1 кг $CaCO_3$), поэтому потребление тепла в третьей зоне печи наибольшее. В этой же зоне происходит распад дегидратированных глинистых минералов на оксиды $A1_2O_3$, SiO_2, Fe_2O_3, которые вступают в химическое взаимодействие с CaO. В результате этих реакций, происходящих в твердом состоянии, образуются минералы $3CaO{\cdot}A1_2O_3$, $CaO{\cdot}A1_2O_3$ и частично $CaO{\cdot}SiO_2$.

В зоне экзотермических реакций (1100-1250 °С) проходят твердофазовые реакции образования $3CaO{\cdot}A1_2O_3$, $4CaO{\cdot}A1_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$ и белита. Эти экзотермические реакции сопровождаются выделением большого количества тепла (до 420 кДж на 1 кг клинкера) и интенсивным повышением температуры материала (на 150-200 °С) на сравнительно коротком участке печи (5-7 % ее длины).

В зоне спекания (1300-1450 °С) температура обжигаемого материала достигает наивысшего значения (1450 °С), необходимого для частичного плавления материала и образования главного минерала клинкера – алита. В начале спекания, начиная с 1300 °С, образуется расплав из относительно легкоплавких минералов $3CaO{\cdot}A1_2O_3$, $4CaO{\cdot}A1_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$, а также MgO и легкоплавких примесей в количестве 20-30 % объема обжигаемой массы. При повышении температуры до 1450 °С в клинкерной жидкости растворяются $2CaO{\cdot}SiO_2$ и CaO и из них в расплаве происходит образование алита $3CaO{\cdot}SiO_2$. Процесс проходит почти до полного связывания окиси кальция (в клинкере $CaO_{своб}$ не более 1 %). Алит плохо растворяется в расплаве и вследствие этого выделяется из него в виде мелких кристаллов, что влечет растворение в расплаве новых порций $2CaO{\cdot}SiO_2$ и CaO. Процесс образования алита заканчивается в течение 15-20 мин пребывания материала в зоне спекания (ее протяженность 10-15 % длины печи). Поскольку при вращении печи частично расплавленный материал непрерывно перекатывается, создаются условия для слипания мелких частичек в более крупные гранулы.

Понижение температуры от 1450 до 1300 °С вызывает кристаллизацию из расплава $3CaO{\cdot}A1_2O_3$, $4CaO{\cdot}A1_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$ и MgO (в виде периклаза), которая заканчивается в зоне охлаждения, следующей за спеканием. В зоне охлаждения температура клинкера понижается от 1300 до 1000 °С. Здесь полностью формируется его структура и состав, включающий алит C_3S, белит C_2S, C_3A, C_4AF, MgO (периклаз), стекловидную фазу и второстепенные составляющие.

Основной задачей системы автоматического управления процессом обжига является получение клинкера с заданными показателями качества. Наиболее важными показателями его качества для последующего получения цемента являются насыпной вес клинкера (НВ) и концентрация свободного CaO (C_{CaO}). Для определения параметров, оказывающих наибольшее влияние на показатели качества, было проведено исследование. Для этого с помощью существующей автоматической информационной системы был получен архив технологических параметров за месяц, включающий данные химических анализов поступающего шлама, характеристики температурного профиля печи (получаемые с помощью инфракрасного радиационного пирометра – термосканера), расходы шлама и газа, температуры отходящих газов и клинкера, а также данные химических анализов клинкера.

По результатам статистической обработки данных технологического процесса и корреляционного анализа было определено, что наибольшее влияние на показатели качества имеет начало и длина условной зоны спекания. Точная оценка этих параметров была получена путем обработки характеристик температурного профиля печи.

В ходе анализа условий сбора и обработки данных о технологическом процессе были выявлены следующие недостатки: большие погрешности химических анализов исходного сырья и качества получаемого клинкера, длительное время проведения химических анализов, несовершенство метода отбора проб и большие погрешности измерения параметров процесса (температура клинкера в горячем конце печи измеряется

радиационным пирометром в условиях повышенной запыленности). Исходя из этого, был сделан вывод о том, что оценки качества клинкера, состав подаваемого шлама, форма факела, по сути, являются случайными величинами. Также необходимо отметить, что данные химических анализов шлама поступают через 2 ч после его подачи в печь, а данные анализа клинкера – через 2 ч после его получения, температурный профиль печи поступает один раз в 15 мин, остальные параметры измеряют непрерывно.

Исходя из всех этих условий, было решено создать систему автоматического управления, в основе которой лежит регрессионная модель. Эта модель связывает насыпной вес клинкера, концентрацию свободного CaO, температуру клинкера и отходящих газов с расходами газа и шлама, длиной и началом условной зоны спекания, а также с характеристиками шлама (с данными химического анализа шлама).

Эта модель имеет следующий вид:

$$Y_i = a_{i0} + a_{i1}Q_{\text{шл}} + a_{i2}Q_{\text{г}} + a_{i3}X1 + a_{i4}\Delta X +$$

$$+ a_{i5}V_{\text{шл}} + a_{i6}\text{К}_{\text{н}} + a_{i7}p + a_{i8}n,$$

где $Y_1 = C_{\text{CaO}}$; $Y_2 = \text{НВ}$ клинкера; $Y_3 = T_{\text{кл}}$ – температура клинкера; $Y_4 = T_{\text{о.г}}$ – температура отходящих газов; $Q_{\text{шл}}$ – расход шлама; $Q_{\text{г}}$ – расход газа; $X1$ – начало условной зоны спекания; ΔX – длина условной зоны спекания; $V_{\text{шл}}$ – влажность шлама; $\text{К}_{\text{н}}$ – коэффициент насыщения; p – глиноземный модуль; n – кремнеземный модуль.

Для поиска коэффициентов этой модели используется нормированная матрица технологических параметров процесса, накопленная за сутки и обновляемая каждые 12 ч. После нахождения коэффициентов математической модели решается оптимизационная задача, целью которой является расчет расхода газа, длины и начала условной зоны спекания, при которых будут получены минимальные отклонения значений насыпного веса клинкера (НВ*) и концентрации свободного CaO (C^*_{CaO}) заданных:

$$I = \left(C_{\text{CaO}} - C^*_{\text{CaO}}\right)^2 + \left(HB - HB^*\right)^2 \to \min.$$

Далее для полученных значений $Q_{\text{г}}$, $X1$ и ΔX рассчитывают значения $T_{\text{о.г}}$ и $T_{\text{кл}}$ и проверяют условие их нахождения в заданных пределах:

$$T^{\min}_{\text{о.г}} \le T_{\text{о.г}} \le T^{\max}_{\text{о.г}};\ T^{\min}_{\text{кл}} \le T_{\text{кл}} \le T^{\max}_{\text{кл}}.$$

В случае выхода температуры за допустимые пределы она принимается равной ближайшей границе, после чего осуществляется перерасчет оптимизационной задачи. После этого окончательно рассчитанные значения $Q_{\text{г}}$, $X1$ и ΔX выдаются оператору в качестве рекомендуемых; оператору также выдаются рассчитанные по модели значения насыпного веса и концентрации свободного CaO.

В случае изменения расхода шлама система автоматически выдает новые рекомендации с учетом времени прохождения шлама по печи, а при неизменном расходе шлама – рекомендации каждый час.

Полученная система автоматического управления обеспечивает выполнение поставленных задач, т.е. оптимально стабилизирует показатели качества клинкера. Большое время накопления информационной матрицы параметров процесса позволяет избежать влияния случайных величин на качество управления. Данная система автоматического управления прошла промышленные испытания на комбинате «Глинозем» г.Пикалево Ленинградской обл.

Научный руководитель к.т.н. доц. *М.Р.Шапировский*