

К.В. Яшина, А.В. Садовой, Е.Н. Яловая, В.В. Завгородний
**АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ
ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ**

Аннотация. Приведен новый алгоритм управления активной мощностью дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Разработанный алгоритм основан на комплексной математической модели ДСП и составлении материального и энергетического балансов агрегата.

Ключевые слова. Дуговая сталеплавильная печь, активная мощность, материальный и энергетический балансы.

Постановка проблемы исследования

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) - один из наиболее энергоемких агрегатов, применяемых в черной металлургии. На сегодняшний день существует несколько способов снижения энергопотребления ДСП. При этом экономически целесообразной следует признать модернизацию ДСП путем создания современной автоматизированной системы управления, базирующейся на эффективном алгоритме управления значением активной мощности, подаваемой в печь [1].

Постановка задания

Ввиду множественных дестабилизирующих факторов (обвалы шихты, обрывы электрических дуг), которыми характеризуется выплавка стали в ДСП, и невозможности точного мониторинга основных параметров плавки (температура дуг, шихты, расплава, шлака, состав расплава и шлака) с помощью измерительных приборов задачей исследования является разработка алгоритма управления значением активной мощности печи на основе ее комплексной математической модели и составлении материального и энергетического балансов агрегата.

Основная часть

Одним из способов оценки эффективности работы ДСП является составление материального и энергетического балансов периода расплавления [2 - 5]. При этом используют информацию о геометрии

печи, времени плавки, массе, составе, температуре шихты, загружаемой в печь; массе, составе, температуре «болота», находящегося в печи до начала плавки; массе, составе, температуре полученного расплава и скаченного шлака; расходе электроэнергии на проведение плавки. Подробно составление материального и энергетического балансов ДСП для случая загрузки шихты на «болото» рассмотрено в [4].

Предлагаемый алгоритм управления процессом плавки в дуговой сталеплавильной печи переменного тока предполагает составление перед началом плавки «идеального» баланса печи, который представляет собой совокупность материального и энергетического балансов, состоящих из следующих статей [5]:

Материальный баланс:

- 1) масса и состав шихты;
- 2) масса и состав расплава;
- 3) масса и состав шлака.

Энергетический баланс:

- 4) тепло, вносимое шихтой ($Q_{Ш}^*$);
- 5) тепло, вносимое «болотом» ($Q_{Б}^*$);
- 6) тепло, вносимое электрическими дугами ($Q_{Д}^*$).

При этом значение первой статьи «идеального» баланса формируется из исходных данных, доступных перед началом плавки.

Для вычисления значений четвертой и пятой статей необходимо воспользоваться формулами:

$$Q_{Ш}^* = \sum_{i=1}^N c_i^{НАЧ} M_i^{НАЧ} T_i^{НАЧ}, \quad Q_{Б}^* = \sum_{i=1}^M c_i^{НАЧ} M_i^{НАЧ} T_i^{НАЧ},$$

где $M_i^{НАЧ}$ - масса i элемента, загружаемого в печь (кг), $T_i^{НАЧ}$ - температура i элемента, загружаемого в печь (К), $c_i^{НАЧ}$ - теплоемкость i элемента, загружаемого в печь при $T_i^{НАЧ}$ ($\frac{Дж}{кг \cdot К}$), N - количество химических элементов (соединений) в шихте, M - количество химических элементов (соединений) в «болоте».

Вторая и третья статьи «идеального» баланса задаются технологом до начала плавки, исходя из анализа исходных данных, протоколов предыдущих плавки и марки получаемой стали.

Начальное значение шестой статьи «идеального» баланса предполагается вычислять с помощью выражения:

$$Q_D^* = \sum_{i=1}^N c_i^{НАЧ} M_i^{НАЧ} (T_i^{РАСП} - T_i^{НАЧ}),$$

где $T_i^{РАСП}$ - температура расплавления i элемента (K).

Задачей системы управления является получение в процессе плавки характеристик расплава и шлака, заданных соответственно второй и третьей статьями «идеального» баланса. При этом количество тепла, затраченного на плавку не должно превышать значения, заданного шестой статьёй. Необходимо отметить, что первые пять статей «идеального» баланса являются статическими, а значение шестой статьи динамически изменяется (уточняется) по ходу плавки на основании анализа теплотерь через ограждающие конструкции (свод, стены, подину) и теплоты химических реакций.

Кроме того, для эффективной работы системы управления в начале плавки необходимо задать предполагаемое время расплавления шихты $t_{РАСП}$. Значение $t_{РАСП}$ не является постоянным, оно может уменьшаться либо увеличиваться по ходу плавки в зависимости от интенсивности расплавления шихты.

Пусть t - текущее время плавки; $\tilde{P}_i(t)$ - значения активной мощности, подаваемой в печь i электродом в промежуток времени от $t - \tau_1$ до t , $\tilde{q}_D(t)$ - количество тепла, вносимого в печь электрическими дугами в промежуток времени от $t - \tau_1$ до t , τ_1 - промежуток времени, через который вычисляются значения электрических параметров ДСП.

Предположим, что значения $\tilde{P}_i(t)$ одинаковы, постоянны на протяжении всего периода расплавления ($\tilde{P}_1(t) = \tilde{P}_2(t) = \tilde{P}_3(t) = const$) и равны P^* . Следовательно, величина $\tilde{q}_D(t)$ также является постоянной ($\tilde{q}_D(t) = const$) и равна q_D^* .

Тогда, зная Q_D^* - количество тепла, которое должно быть внесено в печь электрическими дугами за весь период расплавления шихты, и время расплавления $t_{РАСП}$, P^* и q_D^* найдем по формулам:

$$P^* = \frac{Q_D^*}{3t_{РАСП}}, \quad (1)$$

$$q_D^* = P^* \tau_1. \quad (2)$$

Пусть максимальная длина дуги $l_{ДМАХ}$. С помощью модели электрических процессов, происходящих в дуговых электросталеплавильных печах переменного тока, задав длину дуги каждой фазы равной $l_{ДМАХ}$, найдем U_2 - амплитудное значение напряжения на вторичных обмотках печного трансформатора, при котором $\tilde{P}_i(t)$ равно P^* .

Таким образом, начав плавку (текущее время плавки равно 0), напряжение на вторичных обмотках печного трансформатора задаем равным U_2 . Однако, длина электрических дуг на стадии их зажигания не может быть равна $l_{ДМАХ}$, поэтому в начале плавки $\tilde{P}_i(t) < P^*$. Следовательно, количество тепла, вносимого в печь электрическими дугами в промежуток времени от $t - \tau_1$ до t , меньше, чем q_D^* на величину $\Delta q_D(t)$, вычисляемую по формуле:

$$\Delta q_D(t) = \sum_{i=1}^3 (P^* - \tilde{P}_i(t)) \tau_1.$$

Для того, чтобы отклонение процесса от заданного «идеального» баланса было минимальным, необходимо, чтобы

$$\int_0^{t_{РАСП}} |\Delta q_D(t) dt| \rightarrow \min \text{ или } \tilde{P}_i(t) = P^*.$$

Поэтому, по мере проплавления колодцев и заглублиения дуг в шихту значения $\tilde{P}_i(t)$ увеличиваем, стремясь минимизировать $\int_0^t |\Delta q_D(t) dt|$. Необходимо отметить, что осуществление поставленной задачи усложняется в следствии обвалов шихты, которые могут происходить на рассматриваемой стадии плавки и необходимости контроля температуры стен и свода печи.

Кроме того, по ходу плавки необходимо осуществить расчет следующих величин:

$Q_{ПОТЕРЬ}(t)$ - суммарные теплотери через окружающие конструкции за время t с начала плавки; $Q_{ХИМ}(t)$ - суммарное тепло, выделяемое либо поглощаемое в результате химических реакции, произошедших за время t с начала плавки; $M_{Ш}^{РАСП}(t)$ - массы шихты, расплавившейся за время t с начала плавки; $M_i^{РАСП}(t)$ - масса i элемента, расплавившегося за время t с начала плавки.

В начале плавки при $t=0$:

$$Q_{ПОТЕРЬ}(t) = 0, \quad Q_{ХИМ}(t) = 0, \quad M_{Ш}^{РАСП}(t) = 0, \quad M_i^{РАСП}(t) = 0.$$

В дальнейшем $Q_{ПОТЕРЬ}(t)$, $Q_{ХИМ}(t)$, $M_{Ш}^{РАСП}(t)$, $M_i^{РАСП}(t)$ рассчитывается по формулам:

$$Q_{ПОТЕРЬ}(t) = Q_{ПОТЕРЬ}(t - \tau_2) + \tilde{Q}_{ПОТЕРЬ}(t),$$

$$Q_{ХИМ}(t) = Q_{ХИМ}(t - \tau_2) + \tilde{Q}_{ХИМ}(t),$$

$$M_{Ш}^{РАСП}(t) = M_{Ш}^{РАСП}(t - \tau_2) + \tilde{M}_{Ш}^{РАСП}(t),$$

$$M_i^{РАСП}(t) = M_i^{РАСП}(t - \tau_2) + \tilde{M}_i^{РАСП}(t),$$

где τ_2 - промежуток времени, через который вычисляются значения тепловых характеристик ДСП, $\tilde{Q}_{ПОТЕРЬ}(t)$ - теплотери за время от $t - \tau_2$ до t (Дж), $\tilde{Q}_{ХИМ}(t)$ - тепло, выделяемое либо поглощаемое в результате химических реакций в промежуток времени от $t - \tau_2$ до t (Дж).

После окончания стадии проплавления колодцев через промежуток времени τ_3 , зависящий от вместимости печи, целесообразно пересчитать время плавки и значение шестой статьи «идеального» баланса. Для этого воспользуемся выражениями:

$$t_{РАСП}^1 = \frac{(M_{Ш} - M_{Ш}^{РАСП})t}{M_{Ш}^{РАСП}},$$

$$Q_{Д}^1 = \sum_{i=1}^N c_i (M_i(t) - M_i^{РАСП}(t)) (T_i^{РАСП} - T_i(t)) + Q_{ПОТЕРЬ}(t) + Q_{ХИМ}(t),$$

где $M_i(t)$ - масса i элемента, не расплавившегося за время t с начала плавки, $T_i(t)$ - среднemasсовая температура не расплавившегося i элемента в момент времени t , c_i - теплоемкость i элемента при температуре T_i ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$).

Пусть $t_{РАСП} = t_{РАСП}^1$, $Q_D^* = Q_D^1$, тогда воспользовавшись формулами (1), (2), найдем новые значения P^* и q_D^* .

Таким образом, в основу алгоритма определения значения активной мощности, подаваемой в печь в ходе плавки положен подход, близкий к принципам динамического программирования, заключающийся в задании на различных стадиях процесса его «идеальных» характеристик и условий, выполнение которых позволяет минимизировать отклонение реальных параметров процесса от заранее заданных.

Предлагаемый авторами алгоритм управления активной мощностью, подаваемой в дуговую сталеплавильную печь, использован при разработке системы управления работой ДСП (рис. 1). Доказано, что применение этой системы управления обеспечивает экономию энергии на 13 – 14 % при сохранении качества выплавляемой продукции [1] (табл. 1 - 3).



Рисунок 1 – Структура разработанной системы управления дуговой сталеплавильной печью

Таблица 1

Данные о затратах энергии на проведение плавки

Затраты энергии на проведение плавки (МДж)							
Выплавки кордовой стали (16 % скрап и 84 % металлизированных окатышей)		Выплавки кордовой стали (61,5 % скрап и 38,5 % металлизированных окатышей)		Выплавки кордовой стали с использованием 100% лома		Выплавки кордовой стали с использованием 100% лома (завалка + две подвалки)	
Типовая диаграмма	Расчет	Типовая диаграмма	Расчет	Типовая диаграмма	Расчет	Типовая диаграмма	Расчет
225840	195976	191050	155441	184620	159400	149143	129820

Таблица 2

Содержание FeO , CaO , SiO_2 в шлаке

Химические соединения (элементы)	Содержание, % (протоколы плавки)			Содержание, % (расчет)		
	1	2	3	1	2	3
FeO	12,79	13,76	10,16	10,23	14,02	11,67
CaO	43,25	40,7	41,17	44,1	36,95	40,9
SiO_2	24,05	22,18	23,58	22,43	21,91	24,78

Таблица 3

Содержание Fe , C , Si в расплаве

Химические соединения (элементы)	Содержание, % (протоколы плавки)			Содержание, % (расчет)		
	1	2	3	1	2	3
Fe	97,2	97,4	96,43	95,99	96,96	97,02
C	2,25	2,21	3,007	2,14	2,93	2,97
Si	0,15	0,123	0,09	0,18	0,18	0,08

Выводы

Предлагаемый алгоритм, основанный на комплексной модели процесса выплавки стали в ДСП, позволяет определить совокупность материального и энергетического балансов печи, обеспечивающих максимальную энергетическую эффективность агрегата. Использование разработанного алгоритма при создании системы управления работой ДСП позволило достичь экономии энергии на 13-14% при сохранении качества выплавляемой продукции.

ЛІТЕРАТУРА

1. Садовой А.В. Об одном способе повышения энергетической эффективности дуговых сталеплавильных печей [текст] / А. В. Садовой, К. В. Яшина // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2012. – №1(18). – С. 36 – 40.
2. Скрябин В.Г. Модель расчета средней температуры металла в сверхмощной ДСП и ее применение в АСУТП [текст] / В. Г. Скрябин, Д. В. Скрябин // Материалы 2-ой международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – Москва: МИ-СиС, 2007. – С. 43 – 45.
3. John Z. Adaptive interval model control of arc welding process / Z. John, W. Bruce // IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. - 2006. - № 6. - P. 1127 – 1134.
4. Тимошпольский В.И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего уровня [текст] / Тимошпольский В. И. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 256с.
5. Яшина К.В. Усовершенствование способов автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели для снижения энергозатрат и повышения производительности агрегата [текст] / К.В. Яшина, В.Ю. Болотов, Ю.А. Болотова // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2007. – №8. – С. 217 – 221.