

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И УПРАВЛЕНИЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

А.В. Иванченко, Г.В. Слободянюк, С.А. Храпко

Интенсивные исследования в области термодинамики и физической химии металлургических систем привели к тому, что в настоящее время практически весь комплекс физико-химических процессов металлургической технологии поддается расчету с точностью, достаточной для построения высокоэффективных информационно-вычислительных систем управления плавкой и проектирования технологии.

Вместе с тем, существующие компьютерные системы управления сталеплавильными агрегатами, даже наиболее совершенные из реализованных к настоящему времени, практически полностью ориентированы на исполнение режимов, задаваемых технологами. Работа таких систем основывается на статистических моделях, синтезируемых путем обработки массивов данных прошлых плавов, или на простом копировании режимов и операций одной из предыдущих плавов, принятой за норму.

Детерминированная физико-химическая модель плавки, в отличие от статистической, исходит из строгого априорного расчета, опирающегося на базы фундаментальных законов и констант, поэтому ее прогностические возможности неизмеримо шире. Адекватность управляющих действий такой системы обеспечивается за счет обратной связи (адаптация). Кроме того, появляется возможность "проигрывать" мыслимые варианты плавки при проектировании новой технологии — функция, принципиально недоступная для статистических моделей.

В упрощенном виде распределение элементов между металлом и шлаком определяется из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} a_{(i)}/a_{[i]} &= K_i \cdot \exp(-\mu v_i/RT) \\ \sum_{i=1}^k x_{(i)} v_i &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Всего имеется  $2k$  ( $k$  — число компонентов) таких уравнений, в которых содержится  $2k$  неизвестных, кроме того необходимо задать температуру и давление системы, поскольку они входят в выражения для химических потенциалов. Разбив плавку на периоды между добавками и повторяя расчет, можно проследить за изменениями состава металла и шлака на протяжении всей плавки в равновесном приближении. Учет кинетических сдвигов реального процесса входит в функции системы адаптации к конкретным условиям и основан на том обстоятельстве, что отклонения от равновесия носят систематический характер (смещение в сторону исходного состояния). На этой основе был создан пакет прикладных программ «Оракул», позволяющий

имитировать плавку в научных и учебных целях. На практике мастеру приходится решать обратную задачу — по заданному составу конечного металла рассчитывать состав завалки и текущих добавок. Поэтому был разработан вариант обратной задачи, в которой задаются материалы, имеющиеся на складе, и марка выплавляемой стали. Система рассчитывает оптимальный по стоимости состав завалки и всех текущих добавок, включая шлакообразующие.

Расчет оптимальных количеств шлакообразующих материалов, обеспечивающих требуемый уровень дефосфорации, десульфурации, а также эффективное усвоение легирующих и раскислителей, является уникальной способностью системы «Оракул». В отличие от известных систем расчета легирующих добавок, основанных на линейных моделях равномерного смешения, система «Оракул» использует не среднестатистические коэффициенты усвоения, которые в действительности зависят от индивидуальных условий каждой плавки, а вычисляет их в результате совместного решения задачи оптимизации шихты и термодинамического расчета распределения элементов в системе металл-шлак. Это существенно расширяет возможности оптимального управления процессом. Задача решается путем вычисления матрицы дифференциальных коэффициентов усвоения  $U_{ij} = \partial m_{[i]} / \partial m_j$ , определяемых из текущего распределения элементов в ванне и отражающих изменение массы элемента  $i$  в металле при добавлении элемента  $j$  в систему. Выражая в (1) все величины через массы элементов, получим, что в общем виде задана система уравнений  $F(m_1, \dots, m_k, m_{[1]}, \dots, m_{[k]}) = 0$ , которая решается относительно  $m_{[1]}, \dots, m_{[k]}$  при заданных  $m_1, \dots, m_k$ , откуда по правилу неявного дифференцирования получим в матричных обозначениях:

$$U_{ij} = \left( \partial m_{[i]} / \partial m_j \right) = - \left( \partial F_i / \partial m_{[j]} \right)^{-1} \left( \partial F_i / \partial m_j \right) \quad (2)$$

Неравенства по составу металла в этом случае имеют вид:

$$F^H \leq \frac{M + UB\Delta X}{I^T (M + UB\Delta X)} \leq F^B \quad (3)$$

где  $F^H, F^B$  — векторы нижнего и верхнего пределов состава металла;  $M$  — вектор исходных масс элементов в металле;  $B$  — матрица состава материалов;  $I$  — единичный вектор;  $\Delta X = X - X^0$  — вектор изменения (приращения) масс материалов.

К системе (3) могут быть также добавлены любые другие возможные технологические или организационные ограничения. Приведение (3) к линейному виду дает систему, пригодную для решения симплекс-методом. Решение сформированной таким образом системы неравенств дает новый набор шихтовых материалов  $X = X^0 + \Delta X$ , обладающий минимальной стоимостью, после чего расчет повторяется при  $X^0 = X$ .

Интересно, что в процессе решения расчетные массы рекомендуемых шихтовых материалов претерпевают сильные изменения — взаимное исключение или замена одних

материалов другими, из чего можно сделать вывод, что система может самостоятельно находить весьма неочевидные решения, приводящие к экстремуму целевой функции.

Кроме того, при практической реализации алгоритма существенное повышение надежности расчета достигается за счет детального учета факторов неопределенности химического состава используемых материалов, массы и состава исходного металла, используемых констант распределения элементов между металлом и шлаком и т.д.

Возможны случаи, представляющие особый интерес для практики, когда решение указывает на невозможность гарантированного попадания в требуемый состав в заданных условиях. В таких случаях система предлагает перечень оперативных решений: снизить неопределенность заданных параметров; легировать в два приема с промежуточной пробой; перевести плавку в другую марку. По всем возможным вариантам сообщается новая шихтовка, сумма затрат и ожидаемый состав металла. В автоматическом режиме возможно самостоятельное принятие решения системой по заранее заданному списку приоритетов.

Вся информация о фактически полученном составе металла используется в системе адаптации параметров модели, учитывающих неравновесность реального процесса в зависимости от медленных изменений параметров агрегата с учетом периода плавки, марки стали и др.

Система ориентирована на работу в автоматическом режиме с выдачей сигнала непосредственно на исполнительные механизмы, а также работу в режиме советчика сталевара с выдачей рекомендаций и комментариев к фактическим действиям персонала. Вместе с тем она является достаточно гибкой для использования при ретроспективных анализах, краткосрочном и перспективном планировании в технологических разработках, оценки эффективности новых технологических решений и др. Система может быть использована при управлении самыми различными процессами производства стали, однако при разработке в первую очередь имелось в виду управление плавкой в ДСП и внепечной обработкой.