

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСКИСЛЕНИЕМ И ЛЕГИРОВАНИЕМ СТАЛИ

С.А. Храпко, А.В. Старосоцкий

Донецкий национальный технический университет  
ООО «НПП ОРАКУЛ», г. Донецк, Украина

В современном сталеплавильном производстве широкое распространение получило проведение раскисления и легирования стали при выпуске металла из печи в ковш с последующей десульфурацией на установке доводки металла или установке «печь-ковш». При этом для определенных групп марок сталей часто ставится условие минимизации или полного исключения коррекции химического состава при внепечной обработке. В связи с этим появляется задача точного расчета количества раскислителей и легирующих, необходимых для гарантированного получения заданного состава металла при минимальной стоимости использованных материалов. Минимизация стоимости материалов подразумевает выход на нижние (или заданные) пределы содержания элементов в готовом металле, что приводит к еще более жестким требованиям к системам управления. Особенно актуальной эта задача становится при многокомпонентном составе металла и легирующих и широком наборе регламентированных элементов.

Поставленная задача является задачей условной оптимизации, т.е. поиска таких значений оптимизируемых переменных (масс материалов  $X_j$ ), при которых достигается минимум целевой функции (суммарная стоимость материалов), при условии выполнения заданных ограничений на оптимизируемые переменные (требования к составу металла, который должен удовлетворять заданным пределам):

$$S = \sum Q_j X_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$P_i^u \leq P_i \leq P_i^s. \quad (2)$$

Отметим, что зависимость состава металла от масс материалов имеет сложный нелинейный характер, что связано с физико-химическим взаимодействием элементов и их перераспределением между металлом, шлаком и газом, поэтому ограничения (2) являются нелинейными функциями относительно оптимизируемых переменных.

Главный недостаток всех известных систем, реализованных в сталеплавильном производстве к настоящему времени, определяется линейным характером используемых в них моделей и отсутствием учёта зависимости усвоения элементов от текущего физико-химического состояния системы металл-шлак. Такие системы расчёта шихты оптимального состава основаны на модели равномерного смешения жидких веществ с заданными коэффициентами, учитывающими угар от-

дельных элементов из общей массы ферросплавов. Именно недостоверность коэффициентов усвоения (КУ) различных элементов и определяет низкую точность расчёта и прогнозирующую способность подобных систем, поскольку усвоение сложным образом зависит от многих факторов, главным из которых является физико-химическое состояние ванны (состав и окисленность металла, состав и количество шлака, температура и др.), а также взаимное влияние элементов друг на друга (например, раскислителей).

Принципиальным решением этой задачи является использование матрицы дифференциальных коэффициентов усвоения (ДКУ), представляющих собой изменение массы элемента  $i$  в металле при добавлении любого другого элемента  $j$  в систему:

$$U_{ij} = \partial m_{i1} / \partial m_j . \quad (3)$$

ДКУ (3) определяются из текущего распределения элементов между металлом, шлаком и другими фазами на основе термодинамической модели расчета равновесного состава многофазной многокомпонентной системы ОРАКУЛ [2]. Алгоритм расчета ДКУ изложен в предыдущей работе [1].

Наличие численных значений ДКУ позволяет строго вычислить влияние каждого материала на состав металла (а при необходимости, и шлака) с учетом окисленности системы, взаимного влияния элементов и их перераспределения между фазами, например, изменение массы элемента  $i$  в металле при добавлении материала  $j$ :

$$D_{ij} = \partial m_{i1} / \partial X_j = \sum U_{ip} B_{pj} , \quad (4)$$

где  $X_j$  — масса материала  $j$ ;  $B_{pj} = \partial m_p / \partial X_j$  — содержание элемента  $p$  в материале  $j$ .

Несложные преобразования позволяют получить аналогичные величины для всех фаз (шлак, газ и др.). В таблице приведен пример расчёта величин  $D_{ij}$  (4):

добавляемый материал $j$	изменение массы элемента $i$					
	Fe	Si	Mn	Cr	S	O
ФХ800Б	0.29	0.01	0.04	0.55	0	-0.01
ФСХ33	0.60	0.11	0.30	0.47	-0.02	-0.04
ФМн78	0.32	0.05	0.29	0.07	-0.01	-0.02
СМн17	0.43	0.10	0.39	0.12	-0.02	-0.04
ФС75	1.01	0.24	0.65	0.30	-0.03	-0.09
СаО	-0.01	0	-0.01	-0.00	-0.01	-0.00

ДКУ позволяют проанализировать взаимное влияние элементов; кроме того, можно следить за использованием элементов конкретного материала (см. таблицу). Например, 1 кг ферросиликохрома содержит всего 0.42 кг хрома, но за счёт восстановительного действия кремния даёт увеличение содержания хрома в металле на 0.47 кг, почти такое же, как и феррохром (0.55 кг), несмотря на существенно большее содержание хрома в последнем (0.67 кг). Другими словами,

извлечение хрома из феррохрома составляет 82%, а из ферросиликохрома — 112% (т. е. превышает в 1.36 раза!).

В случаях, когда решение указывает на невозможность в заданных условиях гарантированного попадания в требуемый состав, разработанная система предлагает перечень оперативных решений. В автоматическом режиме решения принимаются системой самостоятельно в пределах заранее заданного перечня и приоритетов. По окончании каждой плавки информация о фактически полученном составе металла автоматически используется для адаптации параметров модели (самообучения).

Разработанная система входит в состав пакета «ОРАКУЛ», внедрена на Молдавском металлургическом заводе, где используется для решения следующих задач: оперативное управление процессом плавки в режиме «советчика» (выдает рекомендации персоналу) и в составе АСУ ТП (выдает управляющие сигналы на дозаторы).

**Выводы.** Качественно новая информация, содержащаяся в величинах  $U_{ij}$ , позволяет принципиально расширить возможности оптимизации легирования, раскисления и рафинирования металла. При этом учитывается не только влияние элементов, содержащихся в металле, но и влияние состава шлака, например, на распределение серы. Становится возможной оптимизация не только легирующих, но и шлакообразующих материалов (например, извести для десульфурации). Эти задачи не решены ни в одной из других существующих систем.

### Литература

1. Управление сталеплавильными процессами на основе современных физико-химических представлений. Пономаренко А.Г., Окоукони П.И., Храпко С.А., Иноземцева Е.Н. Труды 4-го конгресса сталеплавильщиков.— Москва, 1997. С. 35-40.

2. Храпко С.А. Термодинамическая модель системы металл-шлак для АСУ и машинных экспериментов по оптимизации технологии сталеплавильного процесса / Дисс. канд. техн. наук. - Донецк, 1990.