

УДК 669.046:62-50

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ФОРВАРД» ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

*А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. А. Храпко, Е. Н. Иноземцева  
Изв. ВУЗов, Черная металлургия, 1991, №12, С. 89-91.*

В процессе автоматизации современного металлургического производства все большее значение приобретают многофункциональные системы, вырабатывающие управляющие сигналы для различных процессов выплавки стали и сплавов и позволяющие охватить все многообразие реальных ситуаций, в которых требуется принятие квалифицированных и точных решений. Например, выплавка стали включает ряд периодов (расплавление, обезуглероживание, десульфурацию, доводку состава и др.), в которых решается однотипная задача: определить массы добавок, обеспечивающих заданный состав металла при минимальных затратах. В основу таких расчетов, от качества и оперативности которых зависят все основные показатели плавки, могут быть положены те или иные детерминированные и эмпирические модели. Детерминированные модели [1] имеют ряд преимуществ перед эмпирическими, так как позволяют при малом количестве определяемых из опыта параметров точнее описывать процессы в системе металл – шлак – газ с точки зрения термодинамики равновесного состояния. Эмпирические модели, способные учесть неравновесность, требуют большого количества параметров, сопоставимого с количеством степеней свободы системы. На их коррекцию затрачивается, как правило, значительное машинное время.

Описываемая ниже система «Форвард» не содержит в явном виде функциональных связей, характерных для детерминированных и эмпирических моделей, и построена таким образом, что ее основным преимуществом является способность оперативно решать «обратную» задачу в терминах системы неравенств относительно управляющих переменных. Система «Форвард» рассчитывает количества шихтовых материалов, необходимые для гарантированного получения заданного состава стали (сплава) при минимальных затратах на легирование. Система ориентирована на практическое применение в металлургическом производстве, на оптимизацию процесса легирования в печи или ковше. В отличие от других известных систем аналогичного назначения [2, 3], в системе «Форвард» получение заданного состава стали (сплава) гарантируется путем совместного учета факторов неопределенности коэффициентов усвоения, содержания элементов в шихтовых материалах, точности взвешивания и массы исходного металла.

Отличительной чертой данной системы является также использование в основе вычислительной процедуры двойственного симплекс-метода решения задачи линейного программирования, что придает ей исключительное быстродействие и возможность работы в реальном масштабе времени.

В реальных производственных условиях система «Форвард» может работать в автономном режиме и в составе АСУ ТП металлургическим агрегатом или цехом. В автономном режиме в интерактивной форме выдаются необходимые сообщения и рекомендации по оптимальному набору шихтовых материалов и общей их стоимости. Принятие решения при этом остается за техническим персоналом. В составе АСУ ТП система «Форвард» выдает управляющие сигналы на дозаторы шихтовых материалов. И в том и другом случаях рассчитываются интервалы химического состава получаемого металла по каждому элементу, которые при необходимости находятся в заданных пределах.

Возможны случаи, и они представляют собой интерес для практики, когда решение указывает на невозможность в заданных условиях гарантированного попадания в требуемый состав (отсутствие необходимых ферросплавов, ошибка во взвешивании и т. п.). В таких случаях система заблаговременно, в начале периода, выдает соответствующее сообщение и благодаря способности анализировать причины возможного отклонения предлага-

ет следующий перечень оперативных решений: снизить неопределенность заданных параметров (уточнить состав того или иного ферросплава, массу задаваемых материалов и т. д.); легировать в два приема с промежуточной пробой металла; перевести плавку в другую марку в соответствии с имеющимся портфелем заказов; перевести в любую стандартную марку.

По всем возможным вариантам сообщается новая шихтовка и стоимость легирования. В автоматическом режиме возможно самостоятельное принятие решения системой в пределах заранее заданного перечня и приоритетов.

Линейный функционал, равный общей стоимости шихтовых материалов ( $Q$  – вектор оптовых цен)

$$J = Q^T X = \min, \tag{1}$$

минимизируется при линейных ограничениях – неравенствах, обусловленных технологическими и организационными факторами. В наиболее общем случае при этом решается система неравенств относительно вектора  $X$  масс шихтовых материалов:

$$\left\{ \left[ \text{diag} U^n - F^n (U^n)^T \right] B^n - F^n C^e \right\} X \geq (F^n - P) M_0^e; \tag{2}$$

$$\left\{ \left[ \text{diag} U^e - F^e (U^e)^T \right] B^e - F^e C^n \right\} X \leq (F^e - P) M_0^n, \tag{3}$$

где  $F^n (F^e)$  – нормируемый ГОСТом (ТУ) вектор нижнего (верхнего) ограничения состава готового металла;  $U^n (U^e)$  – вектор нижнего (верхнего) предела по усвоению элементов;  $B^n (B^e)$  – матрица нижнего (верхнего) предела по составу шихтовых материалов;  $M_0^n (M_0^e)$  – нижний (верхний) предел массы исходного металла;  $C^n (C^e)$  – строка нижнего (верхнего) массового извлечения железа из шихтовых материалов;  $P$  – вектор состава исходного металла.

К системе (1) – (3) могут быть добавлены другие возможные технологические ограничения, в частности, требование к общей массе вводимых шихтовых материалов

$$I^T X \leq M_{\max} \tag{4}$$

не превышать некоторого максимального значения ( $I$  – единичный вектор), а также ограничения, содержащие информацию о наличии материалов на складе и т. д.

В случае первоначальной завалки масса исходного металла равна нулю и вместо ограничения (4) вводится неравенство, обеспечивающее необходимое количество получаемого металла

$$M^n \geq M_{\min}. \tag{5}$$

В этом случае также находят свое применение формулы (2), (3), однако с нулевой правой частью. Для расчета количеств шлакообразующих компонентов требуются дополнительные данные в виде ограничений, нелинейных относительно  $X$ .

По фактически полученному составу металла усвоение элементов может быть рассчитано с учетом среднестатистического содержания элементов в шихтовых материалах. Пусть  $H$  – вектор фактически полученного состава, тогда в матричных обозначениях получим следующее линейное уравнение относительно вектора  $U$ :

$$\left( \text{diag} D - PD^T \right) U = \left( \bar{C} X - M_\phi \right) P + HM_\phi, \tag{6}$$

где  $M_\phi$  – фактически полученная масса металла;  $D$  – вектор  $\left( \frac{1}{2} \right) (B^n + B^e) X$ ;  $\bar{C}$  – строка  $\left( \frac{1}{2} \right) (C^n + C^e)$ .

Если фактически полученная масса металла неизвестна, то вектор  $U$  фактических усвоений может быть рассчитан из уравнения

$$\left( \text{diag} D - HD^T \right) U = \left( \bar{C} X - \bar{M}_0 \right) H - P \bar{M}_0, \tag{7}$$

где  $M_0 = \left( \frac{1}{2} \right) (M_0^n + M_0^e)$ .

Рассмотрим в качестве примера расчет шихтовых материалов при легировании стали 26ХГСН, химический состав которой должен соответствовать ТУ 14-1-4570–89. Известно, что на складе имеются в наличии следующие шихтовые материалы: ферросилиций марок ФС45, ФС65 и ФС75, ферромарганец ФМн78, силикомарганец МнС17, феррохром марок ФХ100Б и ФХ800Б, ферросиликохром ФСХ30, никель (обрезь), электродный бой. Исходные данные для расчета оптимального набора шихтовых материалов следующие:

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Требуемое содержание, % (по массе)	0.2	0.4	0.6	0.8	0.5	≤0.0	≤0.0
	0.3	0.7	0.9	1.1	0.8	2	2
Содержание в полупродукте, % (по массе)	0.11	0.10	0.12	0.08	0.05	0.01 0	0.01 0
Усвоение элемента, %	80	70	85	88	95	95	95
	85	80	90	93	100	100	100

Примечание. В числителе и знаменателе – верхние и нижние пределы значений.

Масса исходного металла (полупродукта) составляет 100...105 т.

Расчет шихтовки для легирования проведен по двум вариантам: без ограничений по массам (вариант I) и с ограничением 3,27 т общей массы вводимых шихтовых материалов (вариант II) исходя из температурных условий, емкости ковша и т. п. Результаты расчета оптимального набора шихтовых материалов представлены следующими данными:

Шихтовые материалы	Расчетное содержание материала, т, по вариантам			Цена, руб./т
	I	II	[2]	
ФС45	–	–	–	174.38
ФС65	–	–	–	235.51
ФС75	0.450	0.010	0.560	265.00
ФМн78	–	–	–	528.60
МнС17	0.890	0.890	1.100	308.19
ФХ100Б	–	–	–	270.00
ФХ800Б	1.400	0.740	1.550	245.27
ФСХ30	–	1.020	–	313.30
Ni (обрезь)	0.520	0.520	0.640	400.00
C(электродный бой)	0.050	0.090	0.070	100.00

Гарантируемый интервал химического состава шихтовых материалов приведен ниже:

Элемент	Содержание элемента, %, для варианта		
	I	II	[2]
C	0.220...0.250	0.220...0.250	0.26±ΔC
Si	0.400...0.540	0.400...0.530	0.55±ΔSi
Mn	0.600...0.690	0.600...0.690	0.75±ΔMn
Cr	0.820...0.950	0.800...0.950	0.95±ΔCr
Ni	0.500...0.550	0.500...0.550	0.65±ΔNi
S	0.010...0.011	0.010...0.011	–
P	0.013...0.016	0.013...0.016	–

Примечание. Масса завалки для вариантов I, II и по данным [2] соответственно составила 3.31, 3.27 и 3.92 т, а стоимость легирования равнялась 949.9, 995.0 и 1130.6 руб; ΔC, ΔSi, ΔMn, ΔCr и ΔNi – отклонения содержания соответствующего элемента от среднего.

Как видно из приведенных данных, гарантируемый интервал химического состава находится в пределах требуемого ТУ, но при этом тяготеет к нижнему пределу, так как оптимальный набор шихтовых материалов имеет в результате решения двойственной симплекс-задачи минимальную стоимость (949.90 руб по варианту I). Введение дополнительного ограничения на общую массу вводимых материалов в варианте II существенно изменяет оптимальные количества легирующих компонентов: необходимое количество ферросилиция марки ФС75 резко снижается за счет включения в набор ферросиликохрома марки ФСХ30 взамен части углеродистого феррохрома марки ФХ800Б. Уменьшение прихода углерода из феррохрома марки ФХ800Б компенсируется увеличением количества электродного боя до 90 кг. Стоимость легирующих шихтовых материалов возрастает при этом до 995,00 руб за счет более дорогого ферросиликохрома.

Для сравнения приведен также расчет по методике, изложенной в работе [2] и используемой в качестве электронного советчика сталевара. Расчет по этой методике ориентируется на средний химический состав и не гарантирует стопроцентного попадания в заданные пределы, так как основан на вычислении 95 %-ного доверительного интервала в результате статистического подбора коэффициентов усвоения. Кроме того, общая стоимость набора шихтовых материалов в этом случае оказывается примерно на 20 % выше, чем при легировании по варианту I.

Наиболее эффективной работа системы «Форвард» представляется совместно с системой «Оракул», предназначенной для расчета состава продуктов плавки. Система «Оракул», основанная на детерминированной нелинейной термодинамической модели равновесного состояния системы металл – шлак – газ, учитывает температурные условия и фактическое распределение элементов между металлом и шлаком, отслеживает некоторые нештатные ситуации [4]. Система «Форвард» в отличие от «Оракула» корректно решает «обратную» задачу расчета шихтовых материалов по заданным продуктам плавки на основе линейризованной «прямой» задачи. Таким образом, информационное взаимодействие между этими системами решает проблемы ограниченности каждой из них в отдельности. Интеграция обеих систем в рамках одного пакета представляется перспективной задачей, решение которой позволит перейти на качественно новый уровень в технологии производства сталей и сплавов.

*Выводы.* Изложены принципы построения и описано действие информационно-технологической системы «Форвард», работающей в реальном масштабе времени и ориентированной на практическое применение в металлургическом, в том числе сталеплавильном производстве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко А. Г. // Сталь. 1991. № 1. С. 19–23.
2. Колосов А. Ф., Литвин Л. М., Лукьянченко В. В. и др. // Сталь. 1989. № 3. С. 46–48.
3. Фомин Н. А., Чухов И. И., Кошелев А. Е. и др. // Сталь. 1989. № 3. С. 45, 46.
4. Храпко С. А., Иноземцева Е. Н. – В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного совещания «Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках». – М.: изд. ЦНИИ и ТЭИ ЧМ, 1989. С. 22, 23.

Донецкий политехнический институт. Поступила 14 мая 1991 г.