Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVI, вып. 3, 1966 г.

УДК 669. 0

К МЕТОДИКЕ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПО ОПЫТНЫМ ДАННЫМ

Ю. Б. Шмонин

Использование уравнений материального баланса лежит в основе многочисленных методов анализа и расчета металлургических процессов. Однако при составлении экспериментальных балансов такие уравнения применяются совершенно недостаточно.

В настоящей работе рассматривается метод получения показателей распределения материалов в металлургическом процессе на основе их составов, получаемых экспериментально. Он предполагает составление уравнений баланса нескольких химических элементов в форме, связывающей составы и количества материалов, и решение системы таких уравнений обычными алгебраическими способами.

Частная разновидность подобного метода применялась, например, В. А. Боголюбовым [1961]. В данном случае ставится задача получения более общей формулировки.

Наиболее интересным было бы использование такого метода для количественных определений, которые трудно осуществимы обычным взвешиванием (определение количества корольков одной фазы в другой, потерь материалов с пылью и т. д.). Поэтому ниже в общем виде получается уравнение баланса химического элемента, учитывающее потери шихты и продуктов процесса за время баланса.

Обозначив P и ΔP — весовые количества шихты, соответственно поступившие в процесс и потерянные за время баланса (настыли, пыль, гарнисаж); p_i и Δp_i — весовые количества продукта i, соответственно извлеченные из агрегата и теряемые (корольки, пыль и т. д.); n — общее число продуктов (фаз) процесса, можно написать уравнение баланса материалов

$$P - \Delta P = \sum_{i=1}^{n} (p_i + \Delta p_i). \tag{1}$$

Соответствующее этому уравнение баланса некоторого химического элемента, распределяющегося между m продуктами процесса ($m \leqslant n$),

$$CP - C_{\Delta}\,\Delta P = \sum_{i=1}^{m} (c_i p_i + c_{i\,\Delta}\,\Delta p_i) \tag{2}$$

или

$$1 - \frac{C_{\Delta}}{C} L = \sum_{i=1}^{m} a_i K_i + \sum_{i=1}^{m} a_{i\,\Delta} l_i, \tag{2'}$$

где C, C_Δ, c_i, $c_{i\Delta}$ — содержания элемента в материалах; $K_i = \frac{p_i}{P}$ — показатель материального баланса — выход извлеченного количества продукта i на весовую единицу загруженной шихты; $L = \frac{\Delta P}{P}$; $l_i = \frac{\Delta p_i}{P}$; $a_i = \frac{c_i}{C}$ и $a_{i\Delta} = \frac{c_{i\Delta}}{C}$.

Системы уравнений типа (2′) линейны и неоднородны. Их решить можно, в частности, по правилу Крамера [Мишина, Проскуряков, 1965]. Системы имеют единственные решения, когда число уравнений равно числу неизвестных. Система уравнений (2′) однозначно разрешима относительно всех показателей распределения материалов (K_i, l_i и L), если число уравнений в ней составит $2m + 1$. Таким образом, для полного решения системы необходимо все материалы проанализировать на содержания $2m + 1$ элементов, переходящих в m одних и тех же фаз.

Система уравнений (2′) имеет неопределенные или нулевые решения, когда во всех уравнениях ее $\frac{C_\Delta}{C} = 1$ и $a_i = a_{i\Delta}$. Между тем, эти условия подчас дают наилучшие приближения к практике (например, $\frac{C_\Delta}{C} \approx 1$, если ΔP — потери шихты с газами в виде пыли, и $a_i \approx a_{i\Delta}$, если Δp_i — потери фазы i в виде корольков в фазе $i + 1$). Решение системы в указанных приближениях можно получить после преобразований, в итоге которых меняется смысл показателей распределения материалов. При $\frac{C_\Delta}{C} = 1$ уравнение (2′) имеет решаемый вид

$$1 = \sum_{i=1}^{m} a_i K_i' + \sum_{i=1}^{m} a_{i\Delta} l_i', \tag{3}$$

при $a_i = a_{i\Delta}$

$$1 - \frac{C_\Delta}{C} L = \sum_{i=1}^{m} a_i K_i'', \tag{4}$$

при $\frac{C_\Delta}{C} = 1$ и $a_i = a_{i\Delta}$

$$1 = \sum_{i=1}^{m} a_i k_i. \tag{5}$$

Число уравнений, необходимое для однозначного решения систем (3), (4) и (5), соответственно равно $2m$, $(m + 1)$ и m.

Показатель $K_i' = \frac{K_i}{1-L} = \frac{p_i}{P - \Delta P}$ соответствует выходу извлеченного продукта i на весовую единицу переработанной шихты; $K_i'' = K_i + l_i = \frac{p_i + \Delta p_i}{P}$ — выходу полученного (извлеченного без потерь) продукта i на весовую единицу загруженной шихты; $k_i = \frac{K_i + l_i}{1-L} = \frac{p_i + \Delta p_i}{P - \Delta P}$ — выходу извлеченного без потерь продукта i на весовую единицу переработанной шихты.

Показатели k_i, K_i'', K_i' и K_i при совместном применении для данного материального баланса взаимосвязаны следующим образом:

$$k_i K_i = K_i' K_i''; \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned} K_i' &= K_i R; \\ K_i'' &= K_i r, \\ k_i &= K_i r R. \end{aligned}\right\} \tag{6'}$$

Величина показателя K_i известна обычно по результатам взвешивания материалов, $R = \frac{P}{P - \Delta P}$ и $r = \frac{p_i + \Delta p_i}{p_i}$ аналогичны поправочному коэффициенту веса, вводимому В. А. Боголюбовым [1961]. При этом r обратна извлечению данной фазы в конечный продукт, а R — степени использования (переработки) шихты в процессе. Соотношения (6) и (6′) позволяют определять потери материалов, когда материальный баланс описывается системами (3), (4) и (5).

Полное решение систем уравнений баланса химических элементов требует значительного числа данных в виде содержаний некоторых элементов в материалах процесса. Там не менее на основе этих систем можно построить методики определения потерь материалов и выходов продуктов, нахождения распределения отдельных элементов между фазами, уточнения теплового баланса и т. д. Нами системы подобных уравнений были применены, в частности, для определения расходных показателей выплавки высокотитановых шлаков из железо-титановых концентратов на брикетированной шихте. Обработке подвергнуты опытные данные, полученные на крупнолабораторной дуговой печи мощностью 50 *кв·а*. Расходные показатели K_i, определяемые для этой печи по результатам взвешивания, не характерны для рабочего режима крупных печей. В малой печи наблюдается быстрая смена гарнисажа (завышено ΔP) и повышенные потери продуктов (завышено Δp_i). В данном случае системы уравнений типа (5) позволяют автоматически учесть для малой печи неизвестные ΔP и Δp и исключить искажение расходных показателей, т. е. определить расходные показатели, характерные для опробуемого сырья и типа шихты в условиях стабильного гарнисажа и полной переработки загруженной шихты. Использование указанных систем равноценно допущению, что составы потерянных и извлекаемых из печи материалов одинаковы.

Большинство химических элементов в данном процессе распределяется между жидкими фазами [Резниченко, Рапопорт, Ткаченко, 1963]. Следовательно, уравнения баланса элементов будут в основном двухфазны ($m = 2$), и система (5) содержит два уравнения.

Представление о применении рассматриваемого алгебраического метода для решения данной конкретной задачи дает таблица.

Сравнение расчетных и опытных результатов некоторых плавок на печах мощностью 50 и 5000 *кв·а*

Показатели	50 *		5000 **	
Исходные данные				
Тип концентрата	Ильменитовый	Неильменитовый	Неильменитовый	Неильменитовый
Содержания в концентратах, %:				
Ti	30,0	36,6	36,6	36,0—37,8
Fe	31,8	20,5	20,5	18,0—21,0

Продолжение табл.

Показатели	50 *			5000 **
Состав шихты, %:				
концентрат	84,7	84,4	86,9	86,0—88,0
антрацит	—	—	8,3	7,0—7,2
газовый уголь . .	12,7	11,0	—	—
Содержание в шлаке, %:				
Ti	57,5	54,5	52,3	50,3
Fe	1,0	2,0	3,0	2,4
Расчетные и опытные показатели процесса				
Выходы шлака:				
опытный K_i	0,304	0,402	0,408	0,618
расчетный k_i	0,470	0,566	0,607	0,622
Выходы чугуна:				
опытный K_i	0,173	0,128	0,125	0,136
расчетный k_i	0,262	0,171	0,168	0,140
Расход электроэнергии на 1 m шлака, *квт·ч*:				
опытный	3780	2980	3060	2100
расчетный	2450	2120	2060	2090

* По опытным данным, полученным совместно с В. М. Козловым и Н. С. Гусевой.
** По опытным данным В. А. Резниченко, М. Б. Рапопорта, В. А. Ткаченко [1963]

Исходная система уравнений составлялась для железа и титана. Расходы электроэнергии на шлак получены пересчетом по выходам шлака известных расходов ее на шихту. Чугуны содержали 0,4—0,6% Ti и 95—97% Fe.

Расчетные и опытные показатели для мощной печи практически совпадают, что свидетельствует о возможности распространения расчетных показателей, полученных для опробуемых материалов на малой печи, на промышленные печи. Единственным дополнительным условием такого переноса результатов является возможность получения в мощной печи продуктов тех же составов. Для данного процесса это условие, по-видимому, всегда выполняется [Резниченко, Рапопорт, Ткаченко, 1963].

Задача прямого определения потерь материалов в данном случае не ставилась, но по расхождению опытных и расчетных показателей для печи 50 *кв·а* можно судить о степени искажения показателей, обусловленного работой на малой печи в условиях нестабильного процесса. Успешное применение анализируемой методики для такого случая делает ее весьма привлекательной .

В. А. Боголюбовым [1961] аналогичный метод применялся для уточнения материального и теплового балансов металлотермической плавки. Согласно нашим обозначениям им определяется $p_i + \Delta p_i$ металлической фазы при известном p_i, причем Δp_i считается равным весу корольков металла в шлаке. Искомый «полный» вес металла отыскивается как rp_i(r — поправочный коэффициент веса). Значение r далее вычисляется по балансу одного из легковосстановимых и неиспаряющихся в металлотермической плавке элементов (Fe, Co, Ni или Al) как $r = \frac{CP}{c_i p_i}$, т. е. согласно однофазному уравнению баланса, в котором $C_\Delta = 0$ и $c_i = c_{i\Delta}$. Таким образом, эта методика является таким конкретным случаем рассмотренной, когда отпадает необходимость в составлении системы уравнений, так как

исходные уравнения имеют одно неизвестное. Ее применение тем не менее позволило получить ряд интересных данных о тепловых свойствах металлотермической плавки и проведении некоторых химических элементов.

Выводы

1. Предлагаемый в работе метод нахождения показателей распределения материалов в металлургическом процессе основан на составлении и решении систем уравнений баланса химических элементов. Исходными данными для расчетов служат при этом содержания элементов в материалах процесса.

2. Полученные уравнения баланса охватывают значительное число металлургических, в частности, пирометаллургических процессов и позволяют построить ряд конкретных методик определения показателей процесса. Из них вытекает также система показателей распределения материалов.

3. Приведенные примеры конкретного применения методики для пирометаллургических процессов показывают возможность получения по этой методике интересных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

Боголюбов В. А. К вопросу о материальном и тепловом балансе металлотермической плавки. В сб. Физико-химические основы металлургических процессов. Металлургиздат, 1961.

Мишина А. П., Проскуряков И.В. Высшая алгебра. М., Наука, 1965.

Резниченко В. А., Рапопорт М. Б., Ткаченко В. А. Металлургия титана (исследование электроплавки титановых шлаков). Изд-во АН СССР, 1963.