

© Е.М. Харченко, К.Ж. Жумашиев, А.К. Торговец, 2012 г.  
РГП «Карагандинский государственный  
индустриальный университет»  
г. Темиртау, Республика Казахстан  
*harchenko271279mail@ru*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ МЕДНОГО ШЛАКА УГЛЕРОДОМ**

Процесс восстановления компонентов шлака медеплавильных заводов представляет собой совокупность целого ряда одновременно протекающих и находящихся в тесной взаимосвязи физических и химических процессов. Изучение литературных данных и результатов, полученных в ходе проведения экспериментов, позволили составить определенное представление о механизме процесса восстановления компонентов шлака. Были изучены процессы восстановления меди и свинца из состава медного шлака углеродом кокса, и путем обработки полученных данных были выведены уравнения частных и многофакторных зависимостей степени взаимодействия от расхода восстановителя (кокса); температуры восстановления; продолжительности восстановления. При выводе многофакторных зависимостей за основу принято уравнение М.М. Протодяконова, в котором частные зависимости объединяются как произведение [1].

Кривые ДТА на деривотограммах восстановления меди и свинца из синтезированных компонентов шлака углеродом кокса обрабатывались методом Пилюяна (разбивали пик на кривой ДТА на участки, измеряли их площадь, рассчитывали степень взаимодействия).

Полное восстановление ортоарсената свинца углеродом проходит при соотношении 1 моль  $Pb_3As_2O_8 \div 8$  атомов углерода и выше с образованием металлического свинца и возгонкой триоксида мышьяка в температурном интервале 390–720 °С [2]. При обработке результатов ДТА восстановления свинца из состава ортоарсената углеродом выведены следующие зависимости:

- уравнение зависимости скорости восстановления от температуры:

$$V_{707+\Delta T} = 0,0578 + 0,0012 (T_i - 707), R = 0,999, \quad (1)$$

где 0,0578 – скорость при начальной температуре 707 К;

0,0012 – температурный коэффициент;

$T_i$  – температура в изученном интервале, начиная от 707 К;

707 – температура начала восстановления свинца из ортоарсената углеродом, К.

- уравнение зависимости степени взаимодействия от продолжительности взаимодействия выражается:

$$\alpha = [0,0012T_i - 0,790] \tau; R = 0,9778 \quad (2)$$

где  $\alpha$  – степень взаимодействия свинца с углеродом;

$T_i$  – температура в изученном интервале, начиная от 707 К;

$\tau$  – время взаимодействия, мин.

Исходя из уравнений реакций восстановления свинца из состава ортоарсената свинца углеродом кокса при различных расходах последнего, выведено уравнение:

$$\alpha = 17,3 \cdot m_c, R = 0,9951 \quad (3)$$

где  $m_c$  – масса углерода, г.

Полученные частные уравнения удовлетворительно описывают процесс восстановления свинца углеродом. Обобщенное уравнение Протодьяконова – Малышева, выражающее зависимость степени взаимодействия свинца с углеродом от температуры, времени восстановления и количества углерода, имеет вид:

$$\alpha_{об} = \frac{\tau [0,0012T_i - 0,790] \cdot 17,3 \cdot m_c}{100}, \quad (4)$$

коэффициент корреляции равен  $R = 0,9824$ . Его значимость  $t_R = 28,15 > 2$  (для 5 % уровня, достаточного в металлургических исследованиях [1]).

Зависимость степени взаимодействия ортоарсената свинца с углеродом от продолжительности восстановления носит прямолинейный характер. Процесс, вероятно, протекает в кинетическом режиме, о чем также свидетельствует величина кажущейся энергии активации – 132,3 кДж/моль.

Для вывода эмпирической зависимости восстановления меди углеродом кокса аналогичным образом была исследована кривая ДТА на дериватограмме смеси  $Cu_2O \cdot PbO \cdot FeO$  и углерода и выведены следующие зависимости:

- уравнение зависимости скорости восстановления меди углеродом от температуры:

$$V_{563+\Delta T} = 0,12 + 0,0024 (T_i - 563), R^2 = 1, \quad (5)$$

где 0,12 – скорость восстановления при начальной температуре 563 К;

0,0024 – температурный коэффициент;

$T_i$  – температура в изученном интервале, начиная от 563 К;

563 – температура начала восстановления меди углеродом, К.

- уравнение зависимости степени взаимодействия от продолжительности взаимодействия выражается:

$$\alpha = [0,12 + 0,0024(T_i - 563)] \tau, R^2 = 1, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – степень взаимодействия меди с углеродом;

$T_i$  – температура в изученном интервале, начиная от 563 К;

$\tau$  – время взаимодействия, мин.

Зависимость восстановления меди углеродом кокса от расхода последнего описывается уравнением:

$$\alpha = 16,7 m_c, R = 0,9906, \quad (7)$$

где 16,7 – коэффициент пропорциональности;

$m_c$  – масса углерода, г.

Обобщенное уравнение, выражающее зависимость степени взаимодействия меди с углеродом от температуры, времени восстановления и количества углерода:

$$\alpha_{об} = \frac{\tau[0,0024T_i - 1,2312] \cdot 16,7m_c}{100}, R = 0,999. \quad (8)$$

Прямолинейный характер зависимости степени взаимодействия меди с углеродом от продолжительности восстановления показывает, что процесс протекает в кинетическом режиме (энергия активации равна 173,4 кДж/моль).

Для проверки применимости полученных обобщенных многофакторных уравнений (4 и 8) к реальным шлакам, с учетом каких-либо корректирующих коэффициентов, проведены исследования с отвальным шлаком Балхашского медеплавильного завода, следующего состава, %: меди – 0,54; свинца – 1; железа – 32,4. В качестве лабораторного образца ковша использовали коррундизовый тигель, высотой борта 10 см объемом 0,5 л и на дно (по середине) помещали цилиндр высотой 2 см, диаметром 2 см, выточенный из магнезиального кирпича. Кольцеобразное углубление вокруг цилиндра имело ширину около 3 см, куда загружался флюсовый материал – эквивалентное количество обожженной извести и сверху – кусковой восстановитель – кокс, а также сверху заполняли шлаком. Затем тигель помещали в шахтную печь, нагревали до 1250 °С и выдерживали в течение 30 минут. Начиная с температуры сжижения шлака, наблюдалось его интенсивная циркуляция к центру тигля. После охлаждения тигель разбивали и металлический королек (на донной части) отделяли и взвешивали. Сум-

марный выход меди и свинца при расходе восстановителя, рассчитанной по выше приведенным формулам, составил около 60 %. Повышение расхода мелкодисперсного восстановителя при коэффициенте избытка 1,2 позволил практически полностью восстановить указанные металлы и выход металлического королька повысился до 93,5 %, что, видимо, связано с малой концентрацией меди в шлаке. В то же время по мере увеличения расхода углерода начинают восстанавливаться железосодержащие компоненты до металла. Наиболее оптимальный расход углерода определяется с использованием поправочного коэффициента 1,2, а формула для расчета оптимального расхода углерода для восстановления меди и свинца из шлака будет выглядеть следующим образом:

$$M_C = 1,2(17,3m_c^{Pb} + 16,7m_c^{Cu}) = 20,76m_c^{Pb} + 20,0m_c^{Cu} \quad (9)$$

Обобщенная многофакторная формула для извлечения цветных металлов (свинца и меди) углеродом:

$$\alpha^{Pb+Cu} = \frac{\tau^2(0,0012T_i^2 - 1,46T_i + 443,20)m_c^{Pb} \cdot m_c^{Cu}}{10000}, \quad (10)$$

где  $\tau$  – время взаимодействия, мин;

$T_i$  – температура в изученном интервале, К;

$m_c^{Pb}$  и  $m_c^{Cu}$  – масса углерода, необходимого для восстановления свинца и меди; соответственно, г.

Таким образом, полученные частные и обобщенные уравнения с введением поправочного коэффициента удовлетворительно описывают процесс восстановления свинца и меди из отвального медного шлака углеродом.

### Список использованных источников

1. *Мальшев В.П.* Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1977. 37 с.
2. *Харченко Е.М., Жумашев К.Ж.* Изучение реакций твердофазного восстановления свинца из состава ортоарсената углеродом методами термодинамического и термического анализов // 3-я Междун. Казахстанская конф. «Казахстанской Магнитке 50 лет», Темиртау, 2010 г.
3. *Цымбал В.П.* Математическое моделирование металлургических процессов. Учебное пособие для вузов. М.: «Металлургия», 1986. 240 с.