

Ш. К. КОШИМБАЕВ, У. Н. ИМАНБЕКОВА

(Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ШИХТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПЛАВКИ МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Аннотация. В статье описывается определение оптимального состава шихты технологического процесса электроплавки медных концентратов. Такая модель позволит решать задачи технологического проектирования процесса, выбора наилучших конструктивных и режимных параметров электропечи. В работе проводится анализ основных статистических показателей оптимальных систем управления процессами шихтовки и плавления медных концентратов, при плавке обеспечивающих уменьшение потерь металла и энергозатрат.

Ключевые слова: медные концентраты, шихта, флюсы, электроплавление, технологический процесс, штейн, шлак.

Тірек сөздер: мыс концентраттары, шихта, флюстер, электрлік балқыту, технологиялық үрдіс, штейн, шлак.

Keywords: copper concentrates, charge, fluxes, electric melting, technological process, stein, slag.

Введение. В последние годы развитие металлургии меди характеризуется повышением использования сырья, применением кислорода, автоматизированием управляемых процессов шихтовки и плавления медных концентратов. Создание автоматизированных систем управления технологическими процессами является одним из важных направлений развития цветной металлургии. Цветная металлургия относится к крупным отраслям сферы промышленности народного хозяйства. Управление вообще и управление металлургическим производством, в частности, это информационный по своей природе процесс, обеспечивающий реализацию материального процесса при условии достижения сформулированной заранее цели функционирования производства и системы управления им [1]. Процесс электроплавки является важным звеном в технологической цепи пирометаллургического производства меди, в значительной мере определяющим протекание процессов в последующих переделах. Электроплавка на штейн является одним из важнейших переделов в технологии переработки сульфидного медного сырья.

Постановка цели и задачи. Основной целью процесса электроплавки является получение медного штейна за счет расплавления исходной шихты и поддержания расплава в жидкотекучем состоянии, вследствие чего происходит ликвация или расслоение материала на штейн и шлак. Более легкий шлак, состоящий из оксидов и силикатов поднимается на поверхность расплава, в то время как штейн, представляющий собой сплав сульфидов цветных металлов и железа с некоторым содержанием металлической фазы и обладающий большей плотностью, стремится опуститься на дно ванны. Электроплавка имеет ряд достоинств. Электродуги, возникающие между электродами, способны нагреть шихту до высокой температуры за сравнительно небольшой промежуток времени, кроме того, электроэнергия по стоимости дешевле других видов топлива [2].

Решение поставленной цели и задачи. Решение этих задач связано с разработкой математического описания соответствующего объекта управления, выбором и обоснованием критерия оптимального управления, ограничений на переменные управления, состояния объекта, формулировкой математических постановок задач оптимального управления. Безвозвратность потерь меди со шлаками и наибольшая, по сравнению с остальными переделами, материально и энергоемкость определяют существенное влияние электропечного передела на технико-экономические показатели медеплавильного производства [3]. Исходным материалом электроплавки является гранулированная шихта, характеризуемая химическим, минералогическим, гранулометрическим составами, влажностью и т.д. Процесс электроплавки является непрерывным. Шихта, состоящая из смеси обожженных в печи КС окатышей и руды, при необходимости содержащая некоторое количество кварцевых флюсов, периодически поступает в руднотермическую электропечь через загрузочные

отверстия на своде и опускается в расплавленный шлак. Слив штейна и шлака происходит через специальные шпуровые отверстия, расположенные на разной высоте [4].

Шихта представляет собой смесь концентратов, флюсов и оборотных материалов в пропорции, рациональной с точки зрения характеристики конечных продуктов плавки. Гранулированная высушеннная шихта с содержанием 25-30% меди, 6-9% железа, 25-30% двуокиси кремния, 3-6% окиси кальция, 11-14% серы загружается в основные и вспомогательные бункера печи, из которых по течкам материал поступает в ванну печи, образуя откосы шихты вокруг электродов. В ванну электропечи в качестве оборотного материала периодически сливается жидкий конвертерный шлак, характеризуемый содержанием меди (3-6%), железа (28-35%), двуокиси кремния (25-30%), оказывающий влияние в основном на процесс шлакообразования и являющийся источником магнетитовых настылей на лещади печи [5].

Выпуск штейна осуществляется через шпуры печи по мере плавления и потребности конвертерного отделения. Отвальные шлаки периодически по мере накопления и поддержания определенного уровня шлака выпускаются в шлаковозные чаши [6]. В зависимости от технологического и теплового режимов плавки с отвальным шлаком теряется до 1% меди шихты. Исследования показали, что медь содержится в отвальных шлаках в растворенном состоянии и в форме механической взвеси, при этом ее концентрация определяется химическим составом шлаков, содержанием меди в штейне, организацией работ. Питание печи электроэнергией осуществляется от трех однофазных трансформаторов, которые преобразуют ток высокого напряжения (35000 В) в рабочий ток низкого напряжения (до 500 В), поступающий на электроды печи. По существующей классификации электротермических печей электроплавка медных концентратов относится к многошлаковым процессам [7]. Описание процессаrudотермической электроплавки и самой электропечи позволяет подчеркнуть следующие особенности данного технологического процесса, как объекта управления:

1. Входными материальными потоками процесса электроплавки являются непрерывно поступающие топливо (электроэнергия) и шихта, периодически загружаемый конвертерный шлак, выходными периодически сливаются штейн и отвальный шлак. Однако значительный объем шлаковой ванны, непрерывность процессов плавления шихты и шлакообразования позволяют отнести электроплавку к числу непрерывных объектов;

2. Показатели, определяющие и характеризующие протекание процесса электроплавки имеют различную физическую природу: расходы материальных G и энергетических W , g потоков, химические составы X , температуры, технико-экономические показатели. Они могут быть отнесены к числу входных, выходных или режимных переменных объекта управления, управляемых U или неуправляемых Z , контролируемых непрерывно, дискретно или неконтролируемыми и т.п. (рисунок 1). Таким образом, электротермическая плавка является многомерным объектом управления. На рис.1 отображено схема входных и выходных переменных процесса электроплавки определяющие и характеризующие протекание процесса электроплавки.

3. Большой объем ванны, значительная емкость бункеров шихтопитателей обуславливают значительную инерционность процесса плавки;

4. Непрерывное измерение химических составов и взвешивание шихтуемых материалов и на основе этих данных управляет дозированием компонентов шихты, их смешиванием, увлажнением, транспортировкой [8].

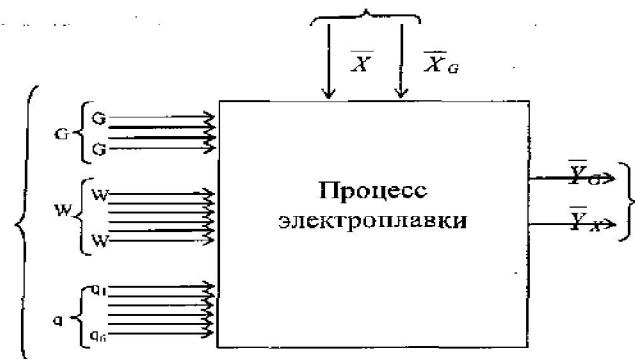


Рисунок 1 – Показатели, определяющие и характеризующие протекание процесса электроплавки

Для исследования любой системы математическими методами должна быть в первую очередь построена ее математическая модель. Математическая модель является системой уравнений математического описания, отражающей сущность протекающих в объекте явлений (физических, химических, информационных), для которых определен алгоритм моделирования. Согласно этому определению, математическая модель рассматривается в совокупности трех ее аспектов-смыслового, аналитического и вычислительного.

В основе математической модели лежат соотношения термодинамики необратимых процессов, теории переноса вещества и энергии. В электроплавке одной из основных задач является создание внешнего математического обеспечения системы оптимального управления. Решение этой связано обоснованием выбора критериев управления, математическим описанием разработкой алгоритма оптимального управления [9].

Назначением математической модели технологического режима является установление зависимости между входными и выходными качественными и количественными переменными процесса электроплавки: между количеством и химсоставом проплавляемой шихты и количеством и химсоставом получаемых продуктов. Необходимость учета влияния конверторного шлака обуславливается включение в модель балансовых уравнений с охватом конверторного передела.

Необходимым условием решения задач исследования и оптимального управления таким сложным объектом, как электроплавка, является наличие его математического описания в виде совокупности соотношений, описывающих количественные зависимости между физическими переменными процесса (химическими составами, расходами, температурами и т.п.); обобщенными технико-экономическими показателями, характеризующими качество протекания процесса (производительность, себестоимость, степень извлечения, удельные затраты материалов и электроэнергии, удельные потери и т.п.); переменными, недоступными непосредственному контролю и их косвенными показателями (модели косвенного контроля), значениями экстраполируемых переменных в дискретные моменты времени (прогнозирующие модели).

Задача определения оптимального химического состава штабеля формулируется следующим образом: найти химический состав штабеля, минимизирующий содержание меди в отвальных шлаках электропечного отделения с учетом ограничений на качественные показатели продуктов плавки –штейна и шлака. Оптимизация химического состава штабеля является задачей верхнего уровня и решается один раз в 4-6 суток (на период закладки).

Математическая модель задачи определения состава штабеля устанавливает зависимости между входными и выходными качественными и количественными переменными технологического комплекса «шихтоподготовка – электроплавка» – между количеством и химическим составом проплавляемой шихты и количеством и химическим составом получаемых продуктов. Необходимость учета влияния конверторного шлака обуславливает включение в модель уравнений с охватом конверторного передела. Математическая модель технологического режима процесса электроплавки построена в классе моделей детерминированной структуры, учитывающей балансовые соотношения по отдельным веществам и продуктам плавки.

Решение задачи осуществляется на основе математической модели комплекса «шихта – черновая медь» с учетом влияния конвертерного шлака, определяющей связь качественных характеристик продуктов плавки на отделение с составом шихты, и формализуется в виде задачи нелинейного программирования [10]. Математическая постановка задачи определения оптимального химсостава штабеля шихты включает в себя: критерий оптимизации, математическую модель процесса электроплавки и ограничения. В качестве критерия оптимизации при определении оптимального химсостава штабеля принято содержание меди в отвальном шлаке, являющего функцией количества проплавляемой шихты и конверторного шлака, содержания в отвальном шлаке CaO , SiO и Fe .

Формализованная постановка задачи представляется в виде следующей системы уравнений. Критерий оптимизации – содержание меди в отвальном шлаке:

$$f(X_{16}) = f_{16}(G_0, G_3, G_{10}, X_{10}, X_{20}, X_{30}, X_{40}). \quad (1)$$

Принятые обозначения:

G_j – количество j -го материала; ($j = 0, 3, 5, 6, 8, 9, 10$ – соответственно обозначает шихту, конвертерный шлак, штейн, отвальный шлак, черновую медь, окисленную руду, внутрищеховые обороты

(корки), электроэнергию;

X_{ij} – содержание i-го компонента в j-ом материале; $i = 1, 2, 3, 4, 5$ – соответственно обозначает Cu, Fe, SiO₂, CaO, S.

θ_1, θ_2 – постоянные коэффициенты, учитывающие транспортные и производственные потери материалов;

$\gamma_{j-j}^{(i)}$ – извлечение i-го компонента из j-го материала в \bar{j} -ый материал, где для \bar{j} приняты те же обозначения, что для j ($j_{0-5}^{(1)}$ – извлечение меди из шихты в штейн);

$\gamma_j^{(6)}$ – весовой выход j-го материала в продукты плавки (с учетом угаря и пылевыноса);

$\underline{\eta}_5, \overline{\eta}_5$ – соответственно минимальные и максимальные значения коэффициента, характеризующего удельный выход штейна на тонну шихты;

η_6 – коэффициент, характеризующий удельный выход отвального шлака на тонну шихты.

Уравнения соответственно по меди, железу и сере в штейне. Модель включает в себя следующие соотношения. Уравнения модели:

$$G_5 X_{15} = \gamma_{0-5}^{(1)} G_0 X_{10} + \theta_2 \gamma_{3-5}^{(1)} G_3 X_{13}; \quad (2)$$

$$G_5 X_{25} = \gamma_{0-5}^{(2)} G_0 X_{20} + \theta_2 \gamma_{3-5}^{(2)} G_3 X_{23}; \quad (3)$$

$$G_5 X_{55} = \gamma_{0-5}^{(5)} G_0 X_{50}. \quad (4)$$

Уравнения по SiO₂, CaO, и железу в отвальном шлаке

$$G_6 X_{36} = \gamma_{0-6}^{(3)} G_0 X_{30} + \theta_1 \gamma_{3-6}^{(3)} G_3 X_{33}; \quad (5)$$

$$G_6 X_{46} = \gamma_{0-6}^{(4)} G_0 X_{40}; \quad (6)$$

$$G_6 X_{26} = \gamma_{0-6}^{(2)} G_0 X_{20} + \theta_2 \gamma_{3-6}^{(2)} G_3 X_{23}. \quad (7)$$

Уравнения по черновой меди

$$G_8 X_{18} = \theta_2 \gamma_{5-8}^{(2)} G_5 X_{15} + \gamma_{2-8}^{(1)} G_2 X_{1-2}. \quad (8)$$

Уравнения по железу и SiO₂ в конверторном шлаке

$$G_3 X_{23} = \theta_2 \gamma_{5-3}^{(2)} G_5 X_{25} + \gamma_{9-3}^{(2)} G_9 X_{29} + \gamma_{2-3}^{(2)} G_2 X_{23}; \quad (9)$$

$$G_3 X_{33} = \gamma_{9-3}^{(3)} G_9 X_{39} + \gamma_{2-3}^{(3)} G_2 X_{2-9}. \quad (10)$$

Балансы по электропечному, конверторному переделам, внутрицеховым холодным оборотом

$$G_5 + G_6 = \gamma_0^{(6)} G_0 + \gamma_3^{(6)} G_3; \quad (11)$$

$$G_3 + G_8 = \gamma_5^{(6)} G_9 + \gamma_{10}^{(6)} G_{10} + \gamma_5^6 G_5. \quad (12)$$

При определении оптимального химсостава необходимо учитывать ограничения на химсостава материалов, определяемые технологическими нормативами.

Система ограничений на переменные. Ограничения на химический состав материалов

$$\underline{X}_{ij} \leq X_{ij} \leq \overline{X}_{ij}; \quad (13)$$

и физическим смыслом переменных:

$$\underline{X}_{\sum 5} \leq X_{15} + X_{25} + X_{55} \leq \overline{X}_{\sum 5}; \quad (14)$$

$$\underline{X}_{\sum 6} \leq X_{25} + X_{36} + X_{46} \leq \overline{X}_{\sum 6}. \quad (15)$$

Ограничения на удельный выход штейна и шлака на тонну шихты:

$$G_6 \leq \eta_6 G_0, \quad (16)$$

$$\underline{\eta}_5 G_0 \leq G_5 \leq \overline{\eta}_5 G_0. \quad (17)$$

Сформулированная задача является оптимизационной задачей для управления объектом, изменение состояния которого под воздействием входных (управляемых и неуправляемых) воздействий описывается нелинейными уравнениями с ограничениями типа неравенств и равенств.

Переменными оптимизации задачи определения состава шихты являются химические составы шихты X_{i0} ($i = 1,5$), штейна X_{i5} ($i = 1,2$), отвального шлака X_{i6} ($i = 1,3$). Для решения задачи принят метод, основанный на использовании метода штрафных функций для преобразования критерия задачи и метод вращающихся координат Розенброка для решения задачи безусловной оптимизации, к которой в данном случае приводится поставленная задача управления.

То есть, вместо функции $f(X_{16})$ рассматривается функция $\Phi(X_{16})$ вида:

$$\begin{aligned}\Phi(X_{16}) &= f(X_{16}) + \sum_i \mu_i \varphi_i(f_i(\bar{G}, \bar{X}) - a_i)^2 + \\ &+ \sum_i \lambda_i \psi_i(f_i(\bar{G}, \bar{X}) - b_i)^2 - \sum_i \xi_i(Q(\bar{G}, \bar{X}) - C_i),\end{aligned}\quad (18)$$

где μ, λ, ξ - коэффициенты штрафа; $f(\bar{G}, \bar{X})$ - Функций в ограничениях; $Q(\bar{G}, \bar{X})$ - Функции в ограничениях; a, b - левые и правые ограничения неравенств; c - значения ограничений типа равенств; $\varphi, \psi, \xi = 0$, если ограничения выполняются U , если ограничения не выполняются.

С учетом (14) и (16) при достаточно большом значении числа U решение преобразованной задачи достаточно близко искомому решению исходной задачи определения состава шихты.

Вследствие того, что алгоритм метода вращающихся координат Розенброка является локальным алгоритмом поиска, при решении задачи с учетом (14) и (16) не гарантируется нахождение глобального экстремума $\Phi(X_{16})$.

Однако, учитывая, что начальные значения $\sum_i \mu_i \varphi_i(f_i(\bar{G}, X) - a_i)^2, \sum_i \lambda_i \psi_i(f_i(\bar{G}, X) - b_i)^2$ и $\sum_i \xi_i(Q(\bar{G}, \bar{X}) - C_i)$ задаются по данным практики, можно считать, что «хорошее» начальное приближение параметров указанных выражений обеспечит необходимую в практических целях точность решения задачи.

Вывод. В результате проделанной работы рассмотрен процесс электроплавки сульфидных медных концентратов на штейн в руднотермических электропечах. Произведены расчеты материального и теплового баланса процесса. Проведен аналитический обзор определение оптимального состава штабеля медных концентратов технологическими процессами электроплавки, построена математическая модель для систем управления процессами шихтовки и плавления медных концентратов, при плавке обеспечивающих уменьшение потерь металла и энергозатрат.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Розенброк Х., Стори С. Вычислительные методы для инженеров-химиков. – М.: Мир, 1968. – С. 61-78.
- 2 Каганов В.Ю., Блинов О.М. Автоматизация металлургических печей. – М.: Металлургия, 1975. – С. 11-17.
- 3 Струнский Б.М. Рудно-термические плавильные печи. – М.: Металлургия, 1972. – С. 93-108.
- 4 Серебряный Я.Л. Электроплавка медно-никелевых руд и концентратов. – М.: Металлургия, 1974. – С. 93-108.
- 5 Табак Д. Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование. – М.: Наука, 1975. – С. 28-49.
- 6 Гальнбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б. Расчеты пиromеталлургических процессов и аппаратуры цветной металлургии. – Челябинск: Металлургия, 1990. – С. 45-50.
- 7 Цырман А.М. Оптимальное управление технологическими процессами. – М.: Энергоиздат, 1986. – С. 93-108.
- 8 Ажогин В.В. Оптимальные системы цифрового управления технологическими процессами. – М.: Энергоиздат, 1986. – С. 93-108.
- 9 Глинков Г.М., Маковский В.А. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1970. – С. 22-27.
- 10 Каганов В.Ю., Блинов О.М. Автоматизация металлургических печей. – М.: Металлургия, 1975. – С. 34-41.

REFERENCES

- 1 Rozenbrok X., Stori S. Vychislitel'nye metody dlja inzhenerov-himikov. M.: Mir, 1968. S. 61-78.
- 2 Kaganov V.Ju., Blinov O.M. Avtomatizacija metallurgicheskikh pechej. M.: Metallurgija, 1975. S. 11-17.
- 3 Strunskij B.M. Rudno-termicheskie plavil'nye pechi. M.: Metallurgija, 1972. S. 93-108.
- 4 Serebrjanyj Ja.L. Jelektroplavka medno-nikelevykh rud i koncentratov. M.: Metallurgija, 1974. S. 93-108.
- 5 Tabak D. Kuo B. Optimal'noe upravlenie i matematicheskoe programmirovaniye. M.: Nauka, 1975. S. 28-49.
- 6 Gal'nbek A.A., Shalygin L.M., Shmonin Ju.B. Raschety pirometallurgicheskikh processov i apparatury cvetnoj metallurgii. Cheljabinsk: Metallurgija, 1990. S. 45-50.

-
- 7 Cyman A.M. Optimal'noe upravlenie tehnologicheskimi processami. M.: Jenergoizdat, 1986. S. 93-108.
8 Azhogin V.V. Optimal'nye sistemy cifrovogo upravlenija tehnologicheskimi processami. M.: Jenergoizdat, 1986. S. 93-108.
9 Glinkov G.M., Makovskij V.A. Proektirovanie sistem kontrolja i avtomaticheskogo regulirovaniija metallurgicheskikh processov. M.: Metallurgija, 1970. S. 22-27.
10 Kaganov V.Ju., Blinov O.M. Avtomatizacija metallurgicheskikh pechej. M.: Metallurgija, 1975. S. 34-41.

Резюме

III. K. Көшімбаев, У. Н. Иманбекова

(К. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан)

МЫС КОНЦЕНТРАТТАРЫ ШИХТАСЫНЫҢ ТИМДІ ҚҰРАМЫН ЭЛЕКТРЛІК БАЛҚЫТУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҮРДІСТЕРІ АРҚЫЛЫ АНЫҚТАУ

Мақалада мыс концентраттары шихтасының тиімді құрамын электрлік балқытудың технологиялық үрдістері арқылы анықтау қарастырылады. Бұл үлгілер үрдістің технологиялық жобалауының есебін шешуге және электр пешінің конструкторлық, режимдік параметрлерін тандауға, үрдісті тиімді басқарудың алгоритмдерін құруға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста мыс концентраттарын шихтілеу жөнө балқыту үрдістерін басқарудың тиімді жүйелерінің негізгі статистикалық көрсеткіштеріне талдау жасалынған, яғни бұл үрдіс балқыту кезінде металдың аз көлемде жоғалуын қамтамасыз етеді.

Тірек сөздер: мыс концентраттары, шихта, флюстер, электрлік балқыту, технологиялық үрдіс, штейн, шлак.

Summary

Sh. K. Koshymbaev., U.N.Imanbekova

(Kazakh National technical university after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan)

DETERMINATION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE CHARGE OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS ELECTRO COPPER CONCENTRATES

In this article determination of optimal composition of stack of copper concentrates by the technological processes of electrofusion. Such model will allow to decide the tasks of the technological planning of process, choice of the best structural and regime parameters of электропечи. The analysis of basic statistical indexes of optimal control system is in-process conducted by the processes of шихтовки and melting of copper concentrates, at melting of providing reduction losses of metal and energy consumptions.

Keywords: copper concentrates, charge, fluxes, electric melting, technological process, stein, slag.