

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ВЕЛЬЦЕВАНИЯ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ

А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер

Производство цинка - одно из основных направлений цветной металлургии страны. В 90-х годах резко увеличилась конкуренция на рынке цинка. Для сохранения своих позиций перед заводами возникла проблема увеличения производства цинка с улучшением его качества и уменьшением затрат на производство. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных инновационных технологий.

Крупнейшим в РФ производителем цинка, кадмия, индия является ОАО «Челябинский цинковый завод». ОАО «ЧЦЗ» как и большинство заводов по производству цинка работает по классической гидрометаллургической схеме: обжиг цинковых концентратов, выщелачивание огарка с очисткой растворов и электролитическое осаждение цинка с последующим переплавом катодов.

Первой стадией указанной схемы производства цинка является обжиг цинковых концентратов и некондиционных вторичных видов сырья (коллективные концентраты, окисленная руда, кеки, шламы и др.). Самой эффективной технологией утилизации цинкосодержащего вторичного сырья является вельц-процесс.

Вельц-процесс применяется для переработки материалов с низким содержанием летучих металлов путем нагревания их во вращающейся трубчатой печи до температуры, при которой извлекаемый металл возгоняется. Возогнаный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли, обогащенной возогнаным металлом.

На качество процесса вельцевания сильно влияют нестабильность основных параметров, отсутствие автоматизированного контроля и управления локальными и сквозными параметрами, неопределенность параметров рабочего режима, обеспечивающих высокий выход вельц-оксида. Все это снижает качество процесса вельцевания.

Актуальной задачей повышения эффективности процесса вельцевания является автоматизация управления в рамках АСУ ТП. Задачи данного класса рассматривались в литературе, главным образом для цементного производства [1-4]. Вопросы управления процессом вельцевания цинковых кеков с точки зрения эффективности производства освещены в работах [5, 6]. Однако задача использования современных методов обработки информации в АСУ ТП с целью оптимизации процесса вельцевания изучена недостаточно.

1. Постановка задачи

Процесс вельцевания цинковых кеков производится во вращающихся печах. Общая структура процесса представлена на рис. 1. Цинковый кек содержит около 20 % цинка, индий, кадмий, свинец, медь. Для извлечения этих металлов его смешивают с коксовой мелочью и нагревают до 1250-1350 °С в вельц-печи. Тепло выделяется за счёт сгорания коксовой мелочи и экзотермических реакций. В качестве флюсующих добавок, позволяющих оптимизировать вельц-процесс при переработке цинковых кеков, используются известняк и формовочный песок. Технологический воздух используется для интенсификации процессов горения углерода и окисления паров цинка, свинца и кадмия, поддержания необходимой температуры в реакционной зоне. Принудительная подача воздуха используется также для эффективного сжигания природного газа при разогреве печи. Природный газ используется для сушки и разогрева футеровки печи при ее пуске, а также для разогрева материала после остановки печи и технологических нарушений.

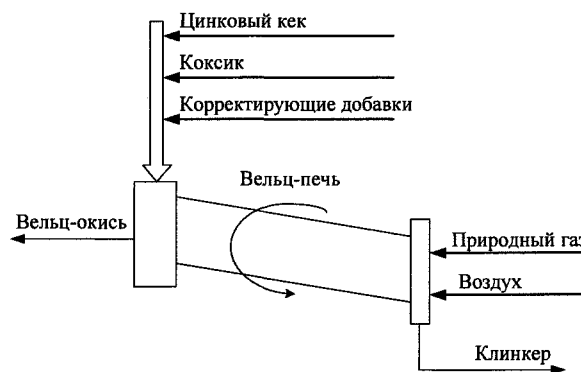


Рис. 1. Структура процесса вельцевания

Оптимальным является ведение процесса без использования природного газа. Продуктами вельцевания являются вельц-окись, которая возгоняется, охлаждается и улавливается рукавными фильтрами, и медистый клинкер. В вельц-окиси содержится около 75 % оксида цинка, оксиды кадмия, индия и свинца. Медистый клинкер содержит 3-4 % меди и 30-35 % железа. Вельц-окись направляется на выщелачивание, а клинкер отгружается на медные предприятия.

В соответствии с работой [5], в качестве критериев оптимизации вельц-процесса можно принять следующие:

- максимальное содержание оксида цинка в пыли, которую выносят из печи протекающие газы $\max M_{ZnO}$; (1)

- максимальное повышение CO_2 в отходящих газах

$$\max V_{CO_2}; \quad (2)$$

- минимальный объем дутья (воздуха) при удовлетворении допусков на режимные параметры вельц-процесса

$$\min V_{O_2}. \quad (3)$$

Смысл этих критериев достаточно очевиден: критерий (1) отражает выход целевого продукта вельц-печи; максимальное содержание CO_2 в отходящих газах (критерий (2)) обеспечивает полное выгорание в печи составляющей углерода, являющейся основным источником тепла вельц-процесса; минимизация расхода кислорода V_{O_2} (критерий (3)) соответствует минимальной подаче воздуха в печь. Здесь, если подается избыток воздуха, то тепло выдувается из печи и снижается ее энергетическая эффективность. При недостатке воздуха наблюдается неполное выгорание соответствующей составляющей углерода и недовыработка тепловой энергии, что также снижает эффективность печи.

В процессе эксплуатации печи наблюдаются различные режимы ее работы, которые зависят от параметров загрузки печи и параметров ведения вельц-процесса. Каждому режиму ведения вельц-процесса соответствует свой набор результирующих показателей:

$$\left\{ (M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})_s : s \in 1, 2, \dots, N \right\}, \quad (4)$$

где $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$ – вектор наблюдаемых базовых показателей эффективности режимов; s – индекс наблюдаемых режимов печи; N – количество режимов.

В общем случае ведение вельц-процесса не является оптимальным. Формально это означает, что для некоторого s -го режима, характеризующегося наблюдаемыми значениями показателей эффективности $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$, можно указать резервы повышения показателей эффективности: повышение M_{ZnO} , V_{CO_2} и снижение V_{O_2} . Для оптимальных режимов невозможно осуществить улучшение одного из показателей без ухудшения других показателей. Как известно из теории оптимизации, совокупность неуплучшаемых решений образуют область Парето в задачах оптимизации. Представляется целесообразным из множества всех наблюдаемых режимов ведения вельц-процесса выделить Парето-оптимальные режимы. Зная набор Парето-оптимальных режимов, можно рассчитать для них тепловой и материальный балансы, которые, в свою очередь, могут служить основой для оптимального ведения вельц-процесса.

В данной работе приводится алгоритм выделения Парето-оптимальных режимов в рамках ведения информационной базы данных АСУ ТП.

2. Алгоритм выделения области Парето-оптимальных режимов в информационной базе данных

Будем теоретически представлять уравнение области Парето соотношением:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (5)$$

где y – объем воздушного дутья; \mathbf{x} – вектор технологических факторов, в данном случае, состоящий из двух факторов: M_{ZnO} и V_{CO_2} ; \mathbf{a} – вектор структурных параметров зависимости (5).

Отклонение данных эксплуатации от теоретического значения, определяемого областью Парето, определим соотношением

$$e_s = y_s - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s), \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где s – индекс статистического наблюдения.

Для того чтобы выделить область Парето, на отклонение от указанной области введем штрафную функцию (рис. 2).

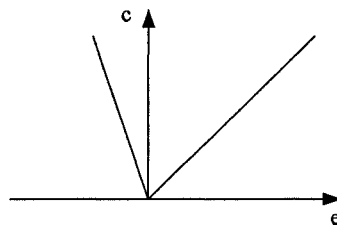


Рис. 2. Штрафная функция

Суммарный штраф при отклонении данных эксплуатации от области Парето:

$$C = \sum_s S_{ш}^2 |e_s^-|^2 + \sum_s |e_s^+|^2, \quad (7)$$

где e_s^- , e_s^+ – отрицательные и положительные значения отклонений экспериментальных данных от области Парето; $S_{ш}$ – величина штрафа при наличии отклонения экспериментального значения показателя y_s ниже теоретического значения, определяемого областью Парето $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s)$.

Ставится задача найти аналитическое выражение области Парето по критерию минимума суммарного штрафа (7) на данных эксплуатации.

Сначала предположим, что выражение отклонения (6) можно представить в виде линейной функции:

$$e_s = y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}, \quad n = 1, 2. \quad (8)$$

Условия минимума суммарного штрафа:

$$\frac{\partial C}{\partial a_i} = -2S_{ш}^2 \sum_s 1(|e_s^-|) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js} \right) x_{is} - 2 \sum_s 1(|e_s^+|) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js} \right) x_{is} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $1(|e_s^-|)$, $1(|e_s^+|)$ – единичные функции. Решение линейного алгебраического уравнения:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$g_{ij} = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1(e_s^-) x_{is} x_{js} + \sum_s 1(e_s^+) x_{is} x_{js};$$

$$d_i = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1(e_s^-) y_s y_{js} + \sum_s 1(e_s^+) y_s x_{js}.$$

Решение задачи (10) осуществляется итерационно на основе последовательных решений соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (10), определяющих минимизацию целевой функции (7) методом наискорейшего спуска.

В случае нелинейной функции $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s)$ задача решается методом Ньютона. В этом случае постановка задачи (6), (7) линеаризуется в виде (8) и решение ведется итерационно с использованием решений системы уравнений (10).

В результате будет получено аналитическое выражение области Парето (5), с помощью которого можно характеризовать режимы работы печи как оптимальные или неоптимальные.

Выводы

1. При автоматизации управления процессами вельцевания цинковых кеков наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать задачу оптимизации режимов процессов вельцевания.

2. Решение задачи оптимального управления вельц-процессом осуществляется на основе выявления области Парето в пространстве основных показателей эффективности указанного процесса.

3. В работе предложен алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

4. Применение предложенного алгоритма выделения области Парето позволяет организовать оптимальное управление технологическим процессом в печи, обеспечивающее повышение его эффективности.

Литература

1. Лисиенко, В. Г. *Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справ, изд.: В 2 кн.* / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгин. - М.: Теплотехник, 2004. - 588 с.

2. Krings, L. *LINKman in cement production: optimization beyond traditional control* / L. Krings, D. W. Haspel // *ABB Review*. - 1995. - №7. - С 32-38.

3. *Model predictive control of the calciner at Holcim's Lagerdorf plant with the ABB Expert Optimizer* / K. S. Stadler et al. // *ZKG INTERNATIONAL*. ~2007. - №3.

4. Галлестей, Э. *Новые подходы к работе в цементной промышленности* / Э. Галлестей, Д. Кастаньоли, К. Колберт // *ABB Review*. - 2004. - №2. - С. 13-19.

5. Козлов, П. А. *Вельц-процесс* / П. А. Козлов. — М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. - 176 с.

6. Авдеев, М. А. *Вельцевание цинк-свинцово-держающих материалов* / М. А. Авдеев, А. В. Колесников, Н. Н. Ушаков. - М.: Металлургия, 1985. - 120 с.