

О СИНТЕЗЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСИЛИЦИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТО- МАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Розглянуто методика й результати синтезу динамічної моделі процесу виробництва ферросплаву (ФС 45), придатної для використання у складі системи управління, шляхом реалізації планованого експерименту на раніше розроблений технологічний моделі печі

Ключові слова: Електродугова піч, ферросплав, автоматизація

Рассмотрена методика и результаты синтеза динамической модели процесса производства ферросплава (ФС 45), пригодной для использования в составе системы управления, путем реализации планированного эксперимента на ранее разработанной технологической модели печи

Ключевые слова: Электродуговая печь, ферросплав, автоматизация

Considered a method and results of synthesis of dynamic model of process of production of ferro-alloy (FS 45), suitable for the use in composition with control system, by realization of the planned experiment on the before developed technological model of stove

Keywords: Elektric stove, ferro-alloy, automation

А. С. Мных

Кандидат технических наук, доцент*
Кафедра электротехники и энергетического менеджмента*
Контактный тел.: 066-184-64-98
E-mail: mnikh@mail.ru

Е. Н. Барышенко

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра автоматизированного управления технологическими процессами*
Контактный тел.: (0612) 223-84-08
E-mail: barishenko_e@ukr.net

Н. А. Баташова

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра электротехники и энергетического менеджмента*
Контактный тел.: 068-446-27-57
E-mail: nab_zp@mail.ru

В. Д. Золотарёв*

Контактный тел.: 095-133-06-30

*Запорожская государственная инженерная академия
пр. Ленина, 226, г. Запорожье, Украина, 69006

1. Введение

К ферросилицию относится большая группа сплавов системы Fe-Si, в котором может содержаться 19-92% Si. Одиннадцать марок электропечного ферросилиция по ГОСТ 1415-78 можно разделить на три группы: низкокремнистый (ФС 20, ФС 20л, ФС 25), со средним содержанием кремния (ФС 45, ФС 65, ФС 69) и высококремнистые сплавы (ФС 75л, ФС 75э, ФС 90, ФС 92).

В работе рассматривается процесс производства ферросилиция ФС 45, который выплавляется в закрытых рудовосстановительных печах типа РКЗ-33. Основные характеристики печи следующие:

- Мощность печного трансформатора $P_{тр}$ 40 МВА;
- Активная мощность печи P_a 36 МВт;
- Напряжение на низкой стороне Ун.с. 142-282 В;
- Ток максимальный $I_{мах}$ 93 кА;
- Размеры ванны Двнешн/Двнутр 10,8/8,8 м;

- Высота ванны Нв 3,5 м;
- Диаметр электрода Дэ 1,5 м;
- Диаметр распада электрода Драсп 3,9 м.

Процесс производства ферросилиция непрерывный, готовый расплав выпускают в ковш, футерованный шамотом, и разливают на разливной машине конвейерного типа в загрузочные мульды. При получении ферросилиция ФС 45 готовый расплав выпускают из печи 4-5 раз в смену.

Исходя из того, что объект является динамическим, изменяющим свое состояние по ходу плавки, то вопросы его управления должны решаться методом динамической оптимизации. Учитывая, что, как было сказано выше, процесс является непрерывным, то за конечное состояние, момент окончания процесса управления, можно принять участок в системе координат (W_Q;Si) со значениями: 4680 кВт·ч/т – требуемый удельный расход электроэнергии на тонну загруженного кварцита КФ, и требованием по содержанию кремния в расплаве, согласно ГОСТ 1415-78, составляющим 41-47%.

Для перевода печи из состояния начала плавки в ее конец можно использовать метод динамического программирования. Однако для этого необходимо получить динамическую модель печи, представленную в виде полинома и содержащую всю последовательность управляющих воздействий на объект с начала до конца плавки.

На основании того, что наиболее критичными показателями качества получаемого ферросплава ФС 45 является удельный расход электроэнергии на тонну продукции и содержание в ней Si, то модель необходимо представить в виде двух полиномов: первого Wakt – рассчитывающего энергозатраты на каждом шаге управления, и второго Si – позволяющего прогнозировать в динамике содержание кремния в расплаве.

2. Анализ достижений в данной отрасли

Для управления технологическим процессом производства ферросилиция в литературных источниках [1] предлагается выражение:

$$P_{н.п} = \frac{G \cdot W}{365 \cdot 24 \cdot K_B \cdot K_{max}} ; \tag{1}$$

где P_{н.п} - полезная мощность, кВт; G – заданная производительность печи, т/год; W – удельный расход электроэнергии для выплавки ферросплава, кВт·ч/т; 365·24 – число часов в году, ч; K_B - коэффициент использования календарного времени (K_B=0,8-0,95); K_{max} - коэффициент использования максимальной мощности печи.

Однако предложенное выражение не учитывает динамику объекта, необходимое изменение режима работы печи в различные моменты плавки, что не позволяет оптимизировать процесс управления с учетом снижения энергозатрат.

3. Постановка задачи

В работе необходимо получить динамическую модель процесса производства ферросилиция ФС 45

пригодную для использования в составе системы управления печью, представленную в виде двух вышеуказанных полиномов.

4. Решение поставленной задачи

Ранее, подобная задача решалась в [2] для процесса производства нормального электрокорунда. Для получения динамической модели процесса производства ферросилиция ФС 45 будет использован тот же подход.

Для проведения планированного эксперимента воспользуемся разработанной в [3] трехмерной математической моделью, предназначенной для расчета распределения активной мощности в ванне круглой электропечи с тремя электродами того же сечения, расчетная схема которой представлена на рис. 1.

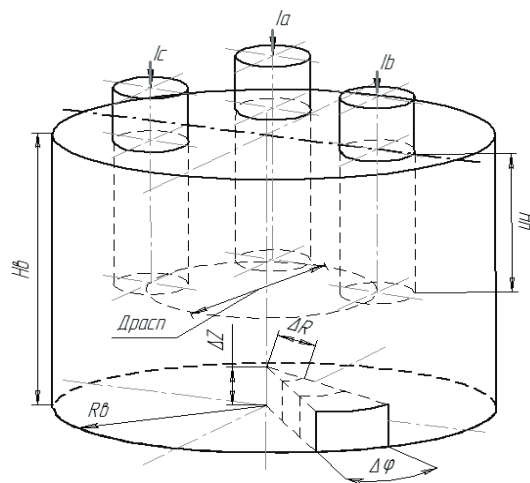


Рис. 1. Расчетная схема математической модели печи

Учитывая применение при моделировании метода вторичных источников, ванна и электроды печи разбиты на ряд единичных объемов. Исходя из рис. 1, имеем ванну печи высотой Нв и радиусом Rв. В качестве элементарного единичного объема будем считать сектор со сторонами ΔR, ΔZ и углом Δφ. Следовательно, можно ввести следующие обозначения: N_{B-φ}, N_{B-Z}, N_{B-R} - число разбиений ванны по углу, высоте и радиусу соответственно, а так же для электродов N_{э-φ}, N_{э-Z}, N_{э-R}. Расчетные точки расположим в геометрическом центре каждого элементарного объема. Всего для расчета их было использовано 192. Электроды в математической модели принимались сверхпроводящими. Шихта и шлак ванны печи имеют удельную проводимость в миллионы раз меньшую удельной проводимости электродов.

На основании изложенной в [3] методики расчета поверхностной плотности заряда, напряженности и активной мощности в j^й ячейке, авторами статьи разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать значения перечисленных параметров в каждом единичном объеме.

Учитывая, что погрешность исходной модели такого эксперимента составила порядка 4,7% [3], то по результатам проверки полученной в результате полиномиальной модели на том же массиве экспе-

риментальных данных можно судить о погрешности преобразования технологической модели в динамическую модель, пригодную для использования в задачах управления.

Планирование эксперимента проводилось по методу Бокса-Уилсона [4]. Наиболее ответственным этапом такого планирования является выбор факторов, существенно влияющих на технологический процесс. В качестве указанных варьируемых факторов использованы следующие: $D_{расп}$ - диаметр распада электродов (оптимальный диаметр распада электродов был определен по методике, изложенной в [5] только для условий рудовосстановительной печи РКЗ-33); $U_{н.с.}$ - напряжение на низкой стороне трансформатора; $H_{п}$ - глубина погружения электродов; $R_{в}$ - изменение сопротивления ванны печи; $R_{ш}$ - изменение шихтовки в результате смены источника сырья; $W_{сум}$ - суммарное значение использованной энергии на всех предыдущих шагах процесса плавки; Si - значение концентрации кремния в расплаве на предыдущем шаге.

Интервалы нижнего и верхнего уровней варьирования для вышеуказанных факторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интервалы возможного варьирования факторов

		-1	0	1
x1	$D_{расп}$, м	2,8	4,4	6
x2	$U_{н.с.}$, В	142	212	282
x3	$H_{п}$, м	0,2	1,1	2
x4	$R_{в}$, отн.ед.	1,8	3,5	5,2
x5	$R_{ш}$, (SiO ₂)%	96	97,2	98,4
x6.1	$W_{сум}$, кВтч	50	22425	44800
x6.2	Si , %	0,5	23,75	47

Учитывая, что для проведения экспериментов с целью определения полиномов $W_{акт}$ и Si , представляющих собой линейную алгебраическую модель вида $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6$, используется по шесть факторов, варьировать которые достаточно на двух уровнях то в соответствии с зависимостью $N = n^k$, где N - число опытов, k - число факторов, n - число уровней варьирования, можно сделать вывод, что обе матрицы планирования должны содержать по 64 опыта.

По результатам экспериментов установлены неизвестные коэффициенты искомым моделям, которые приняты вид:

$$W_{акт} = 0,49x_1 + 0,187x_2 + 1,9x_3 - 4,96x_4 - 1,95x_5 + 0,98x_6 + 247; \tag{2}$$

$$Si = 0,01x_1 + 0,013x_3 + 0,29x_4 - 0,012x_5 + 0,99x_6; \tag{3}$$

Полученная динамическая модель была проверена на адекватность по методике и массиву экспериментальных данных, использованных в [3] погрешность составила 6,02%, что позволяет использовать полученную линейную динамическую модель для задач управления.

5. Выводы

Ввиду значительных технических и экономических трудностей, возникающих при реализации спланированного эксперимента на действующей печи по производству ферросилиция ФС 45, получена динамическая модель указанного процесса, пригодная для использования в системах управления АСУТП, путем вычислительных экспериментов на его известной и адекватной технологической модели.

Литература

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: - Metallurgy, 1988. - 786с.
2. Качан Ю.Г, Мных А.С., Синтез динамической модели процесса производства электрокорунда нормального для задач автоматизированного управления //Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2008. - №2. - С.47-49.
3. Качан Ю.Г., Попов В.В., Мних А.С. Анализ адекватности математической модели трехфазной рудовосстановительной печи // Metallurgy (Труды ЗГИА). - Запорожье, 2008. - №17. С.56-60.
4. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд-во «Наука», 1971. – 245с.
5. Качан Ю.Г., Попов В.В., Мних А.С. О підвищенні керованості рудовосстановлювальної печі шляхом зміни діаметру розпаду електродів// Науковий вісник НГУ. – 2008. - №3. С. 73-76.