

У статті описані результати досліджень в області математичного моделювання динаміки хімічного складу розплаву чавуну на етапі термочасової обробки в процесі електродугової плавки. Запропоновано адаптивний підхід до оцінювання параметрів математичних моделей - кінетичних рівнянь, які можуть бути використані в якості математичного опису керованих фізико-хімічних процесів на етапі термочасової обробки сплаву

Ключові слова: математична модель, оптимальне керування, адаптивний підхід, сплав, чавун

В статье описаны результаты исследований в области математического моделирования динамики химического состава расплава чугуна на этапе термовременной обработки в процессе электродуговой плавки. Предложен адаптивный подход к оцениванию параметров математических моделей - кинетических уравнений, которые могут быть использованы в качестве математического описания управляемых физико-химических процессов на этапе термовременной обработки сплава

Ключевые слова: математическая модель, оптимальное управление, адаптивный подход, сплав, чугун

АДАПТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ЧУГУНА

Д. А. Дёмин

Доктор технических наук, профессор
Кафедра литейного производства
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: c7508990@gmail.com

1. Введение

Известно, что принципиально возможны два способа управления процессом электроплавки: принудительное управление и самоуправление [1]. Первое из них представляет собой внешнее воздействие на процесс со стороны обслуживающего персонала или средств автоматизации на основе объективного или субъективного контроля в различные моменты времени. Второе основано на изменениях в системе, не требующих периодического или регулярного контроля, так как все эти изменения известны обслуживающему персоналу или учтены в системе автоматического управления. Такое самоуправление основано на технологической обратной связи и хорошим примером её проявления является реакция окисления углерода в расплаве, суть которой хороша известна каждому металлургу.

Ключевым моментом в возможности реализации технологической обратной связи является физико-химическая природа протекающих процессов в системе «расплав – шлак – футеровка – атмосфера» металлургической печи. Использование в максимально полной мере знаний этой природы позволяет эффективно использовать так называемую условную технологическую обратную связь, примером которой может служить управление процессом дефосфорации, также хорошо известным любому металлургу.

Управление процессом электроплавки на основе технологической обратной связи и условной технологической обратной связи являются определяющими в задаче поиска оптимального управления процессами любой плавки, в том числе и электроду-

говой. Поиск оптимального управления электродуговой плавкой на всех этапах процесса очень важен, так как электродуговые печи обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с индукционными печами, среди них – возможность переплава шихты любого качества и любых габаритов. Однако за этими преимуществами кроются и недостатки, одним из наиболее существенных среди которых является большая величина угара химических элементов сплава. Поэтому синтез оптимального управления процессом электродуговой плавки, основанный на математическом моделировании физико-химических процессов, протекающих в системе «расплав – шлак – футеровка – атмосфера печи», является главной задачей. Решение этой задачи позволило бы в полной мере реализовывать протекание всех необходимых восстановительных и окислительных процессов в расплаве, сведя к минимуму потери химических элементов в сплаве и повысив качество самого сплава.

2. Анализ литературных данных

Учитывая, что наиболее важными с точки зрения реализации технологической обратной связи являются именно металлургические аспекты управляемых процессов электроплавки, авторы ряда работ рассматривали физико-химическую сторону процессов для различных электродуговых печей в различных производственных условиях. Примером могут быть публикации [2 – 10], в которых описывались результаты исследований величины угара элементов и факторов их определяющих. В данных работах во-

просы управления процессами плавки связывают с управлением физико-химическими процессами, как основными процессами, детерминирующими металлургические возможности электродуговых печей. Так, в работе [3] описаны результаты промышленных исследований процесса плавки чугуна в дуговых электропечах с точки зрения его влияния на величину угара. При этом комплексно исследовался угар основных компонентов шихты и шлаковый режим. Исследования проводили в дуговых печах с основной (магнезитовой) футеровкой вместимостью 0,5, 3 и 50 т; с кислой (дианасовой) футеровкой ёмкостью 12 т и с нейтральной (высокоглиноземистой и корундовой) футеровкой ёмкостью 75 т. Угар элементов определяли как функцию температуры расплава, времени выдержки в печи и основности шлака. Для исследования корреляционных зависимостей составляли план полного факторного эксперимента, при реализации которого определяли параметры оптимизации (угара) при всех возможных уровнях варьирования факторов. Воспроизводимость опытов на каждом сочетании уровней факторов оценивали по критерию Кохрена G.

Как отметили авторы этих работ, анализ коэффициентов полученных уравнений регрессии показал, что угар углерода надежно коррелирует только с температурой металла. Влияние остальных факторов незначительно. Тот факт, что 75 % всего угара углерода приходится на первоначальный период плавки, подтверждает, по мнению авторов, важную роль реакции $C+O_2=CO_2$ в общем угаре углерода.

Вероятность и значимость реакций $[C]+(FeO)=[Fe]+\{CO\}$ и $[C]+(MnO)=[Mn]+\{CO\}$ определяется соотношением $K=FeO/MnO$ в шлаке и температурой расплава. Коэффициент K в шлаках уменьшается с ростом температуры, и это повышает вероятность первой реакции в холодный период плавки и второй реакции в горячий период. Уменьшение угара Mn в горячий период подтверждает это положение. Влияние реакции $2[C]+(SiO_2)=2\{CO\}+[Si]$ на угар углерода проверялось поиском корреляции между содержанием SiO_2 в шлаке и угаром углерода. Анализ коэффициентов корреляции показывает, что угар кремния определяется температурой, временем выдержки, основностью шлака, а также составом шлака и футеровки. С повышением температуры восстановление окислов кремния увеличивается. Поэтому можно утверждать, что интенсивный угар кремния имеет место при низких температурах – это справедливо для нейтральных футеровки и шлаков.

Авторы работы [3] отмечают, что анализ статистических данных, полученных при выплавке чугуна в дуговых печах (ДП) сверхвысокой мощности, показывает, что при температуре более 1400 °С кремний восстанавливается из шлака и футеровки, в то время как при низких температурах происходит его угар, даже при кислых шлаках и футеровке. Окисление же кремния закисью железа в шлаке не определяется температурой, поэтому закись железа, содержание которой в шлаках может достигать 20 %, вызывает окисление кремния даже при высоких температурах вопреки защитному действию кремневосстановительной реакции, способствуя угару кремния при выплавке чугуна в ДП. При этом, статистический

анализ показывает, что в ДП как с кислой, так и с основной футеровкой происходит относительно высокий угар марганца. Основная доля угара приходится на этап плавки «раскисление – перегрев» до 1450 °С. Этому этапу соответствуют условия, благоприятствующие угару (окислению) марганца, - низкая основность шлака и высокое значение K. Возможно также связывание Mn в виде легкоплавкого состава, входящего в шлак. Угар в первоначальный, холодный период плавки, происходит на границе металл - шлак с последующим образованием силикатов. В горячий период плавки угар Mn снижается, очевидно за счет восстановления Mn как железом, так и углеродом [3].

Как отмечают авторы работ [4 – 10], интенсификации плавки ДСП, например с вспененным шлаком, экранирующем дугу, сопровождается ростом угара металла с 5 до 15 %. «Плата» за увеличение производительности составляет около 10 % испарившегося металла, допуская, что потери железа со шлаком не изменяются. Высокий угар металла связан с тем, что тепловой поток, падающий от дуг на поверхность ванны, не может быть усвоен всей массой металла, имеющего низкую теплопроводность. Температура поверхности ванны под дугой остается равной температуре кипения металла практически в течение всей плавки за исключением короткого отрезка времени, в течение которого прорезается колодец в шихте. Затем на подине печи образуется жидкая ванна, и дуга устойчиво горит между торцом электрода и зеркалом металла. Металл испаряется и его пары, попадая в рабочее пространство печи, десублимируются, окисляются и уносятся вместе с дымовыми газами. Таким образом, часть вводимой мощности расходуется на испарение металла. Проанализировав существующие процессы плавки, авторы работы [10] предлагают реализацию ряда мероприятий организационного характера, снижающих угар в печи, как фактор, тормозящий эффективное управление процессом.

Еще одним управляющим фактором авторы ряда работ называют емкость электропечи-миксера. Данный фактор с точки зрения влияния на технологический процесс проанализирован в работах [11 – 20]. В частности, авторам данных работ предложено решать задачу в плоскости выбора оптимальной загрузки миксера.

Для этого предлагается выводить формулы для расчета необходимой емкости миксера в зависимости от степени сглаживания им колебаний химического состава чугуна. Такой подход весьма оправдан, особенно если решается задача управления электродуговой плавкой, для которой объем ванны в печи в процессе термовременной обработки является главным фактором бесперебойного снабжения литейного конвейера металлом. Вопросам моделирования параметров плавки для поиска оптимального управления на всех этапах технологического процесса с использованием линейного регрессионного анализа посвящены работы [21 – 25]. В данных работах предложена технология построения математических моделей типа «состав – свойство» на основе искусственной ортогонализации пассивного эксперимента в условиях малой выборки нечетких данных. В частности оказано, как применение данной технологии позво-

ляет получать адекватные работоспособные математические модели, которые могут использоваться в решении задач оптимального управления электроплавкой [26, 27]. Однако «за кадром» остаётся очень важный вопрос, связанный с получением математического описания процессов формирования химического состава расплава при изменении условий термовременной обработки. Среди них могут быть выделены изменение геометрии ванны и её температуры вследствие отбора определенной порции расплава из печи в момент генерации заявки литейным конвейером.

3. Цели и задачи исследования

Целью исследования являлась разработка методов оценивания параметров кинетических уравнений, описывающих изменение во времени содержания химических элементов в ванне расплава на этапе термовременной обработки чугуна электродуговой плавки. Задачей исследования являлось получение математического описания, пригодного для дальнейшего поиска оптимального управления процессом на этапе термовременной обработки.

4. Принципы поиска оптимального управления на этапе термовременной обработки расплава

Учитывая то обстоятельство, что определяющими в процессе термовременной обработки расплава являются концентрации в расплаве углерода и кремния, в первую очередь должна решаться задача поиска оптимального управления процессом насыщения расплава углеродом.

Последний в электродуговом процессе претерпевает сильный угар, в результате чего содержание углерода в чугуне на момент генерации заявки на расплав может оказаться меньше регламентированного значения. Критерием качества управления при такой постановке задачи должна быть выбрана минимальная величина рассогласования между заданным и фактическим содержанием углерода и кремния в расплаве чугуна на момент генерации литейным конвейером заявки на расплав. В простейшем случае кинетическое уравнение, описывающее изменение содержания химического элемента в ванне, может быть представлено в виде

$$F_i(t) = A_0 e^{A_1 e^{-\frac{E_i}{Rkx(t) \cdot m}}}, \quad (1)$$

где A_0 - параметр интегрирования кинетического уравнения $F_i = \varphi(t)$, A_1 - параметр уравнения Аррениуса, E_i^a - энергия активации химической реакции, в которой участвует компонент F_i , x_1 - температура ванны, S - площадь реакционной поверхности в системе, в которой протекают химические реакции с участием компонента F_i , m - масса расплава в печи.

Кинетические уравнения вида (1) могут быть использованы для математического описания системы. Задача управления изучаемым процессом на этапе термовременной обработки является задачей бы-

стродействия и формулируется следующим образом: определить оптимальное управление u_{opt} , переводящее процесс за минимальное время из начального состояния $F_i(t(0)) = F_i(0) = F_i(0)$, формируемое химическим составом сплава, полученного сразу после расплавления шихты, т. е. на выходе первого этапа плавки, в конечное, расположенное на поверхности $F(k) (F_1, F_2, \dots F_k) = 0$. Эта поверхность имеет аналитическое описание, связывающее содержание элементов химического состава сплава. Причем последнее должно быть таким, чтобы выполнялись требования критерия качества управления по величине минимизации отклонений фактического значения выбранного параметра качества чугуна от заданного.

В свете сформулированного выше, при управлении процессом выплавки чугуна приоритетным является процесс регулирования в расплаве содержания углерода (F_1). Если $F_1 < F_1^{min}$, необходимо насыщение углеродом, осуществляемое погружением в ванну электродов. Изменение значения параметра процесса F_1 влияет на параметр процесса F_3 (содержание в расплаве кремния), являющегося одним из главных параметров электроплавки.

При управлении процессом насыщения расплава углеродом уравнения, описывающие поведение системы, имеют вид:

$$\frac{dF_3}{dt} = K(a_0 + a_1 F_1), \quad \frac{dF_1}{dt} = bu, \quad (2)$$

где F_3 - содержание кремния в чугуне, F_1 - содержание углерода в чугуне, a_0, a_1 - коэффициенты зависимости содержания кремния от содержания углерода в расплаве, u - управление, b - в общем случае некоторая константа, K - константа скорости химического процесса, протекающего в объеме расплава и на границе поверхности раздела фаз «расплав - шлак».

Конечное состояние описывается уравнением

$$f^{(k)}(F_1, F_3) = F_3 - \xi F_1 = 0, \quad (3)$$

где ξ - коэффициент, характеризующий необходимое соотношение содержания углерода и кремния в чугуне.

Использование принципа максимума Понтрягина [28, 29] для определения оптимального управления процессом насыщения расплава углеродом позволило установить, что при условии описания системы в виде (2) момент переключения управления и уравнения линии переключения описываются следующим образом [26]:

$$t^{(s)} = t^{(k)} - \frac{\xi}{Ka_1}, \quad (4)$$

$$F_3 = -\frac{a_0}{a_1} \xi + \frac{1}{2} \frac{b \xi^2}{Ka_1} u. \quad (5)$$

Реализация данной процедуры предполагает, что известна поверхность конечного состояния, однако на практике это не выполняется. Дело в том, что знание поверхности конечного состояния предполагает

ответ на вопрос об оптимальном по выбранному критерию свойств сплава химическому составу. А это, в свою очередь, предполагает решение двух задач: построение математической модели типа «состав – свойство» и анализ полученной модели с целью аналитического описания поверхности отклика. Если первая из этих задач может быть решена на основе методов искусственной ортогонализации [21 – 25], то для решения второй предлагается использовать процедуру ридж-анализа.

Последняя позволяет рассчитать субоптимальные значения параметров F_i для всех выходных переменных, для которых строятся уравнения регрессии типа «состав – свойство», и определять допустимые диапазоны значений нечетких входных переменных F_i , обеспечивающих удовлетворение требований критерия качества управления по минимизации отклонений сразу по нескольким выходным переменным.

Т. е. речь идет о компромиссной оптимизации.

Данная задача может быть решена следующим образом.

Параметрическое описание уравнений линии гребней, позволяющих определить субоптимальные значения выходных переменных, и соответствующие им значения входных переменных имеет вид:

$$F_3 = -\frac{a_0}{a_1} \xi + \frac{1}{2} \frac{b \xi^2}{Ka_1} u, \quad (6)$$

где $F_i^* = \frac{a_i}{2\lambda}$ – субоптимальные значения входных переменных,
 $r = \sqrt{r^2}$, $r^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{2\lambda} \right)^2$ – радиус-вектор в факторном пространстве,
 $y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda}$ – субоптимальные значения выходной переменной.

Геометрическая иллюстрация процедуры поиска субоптимальных значений выходных и входных переменных в процедуре ридж-анализа показана на рис. 1.

5. Адаптивный подход к оцениванию параметров кинетических уравнений

Для реализации описанного выше метода поиска оптимального управления процессом насыщения ванны углеродом необходимо знать коэффициенты зависимости содержания кремния от содержания углерода в расплаве. Для определения этих параметров эффектив-

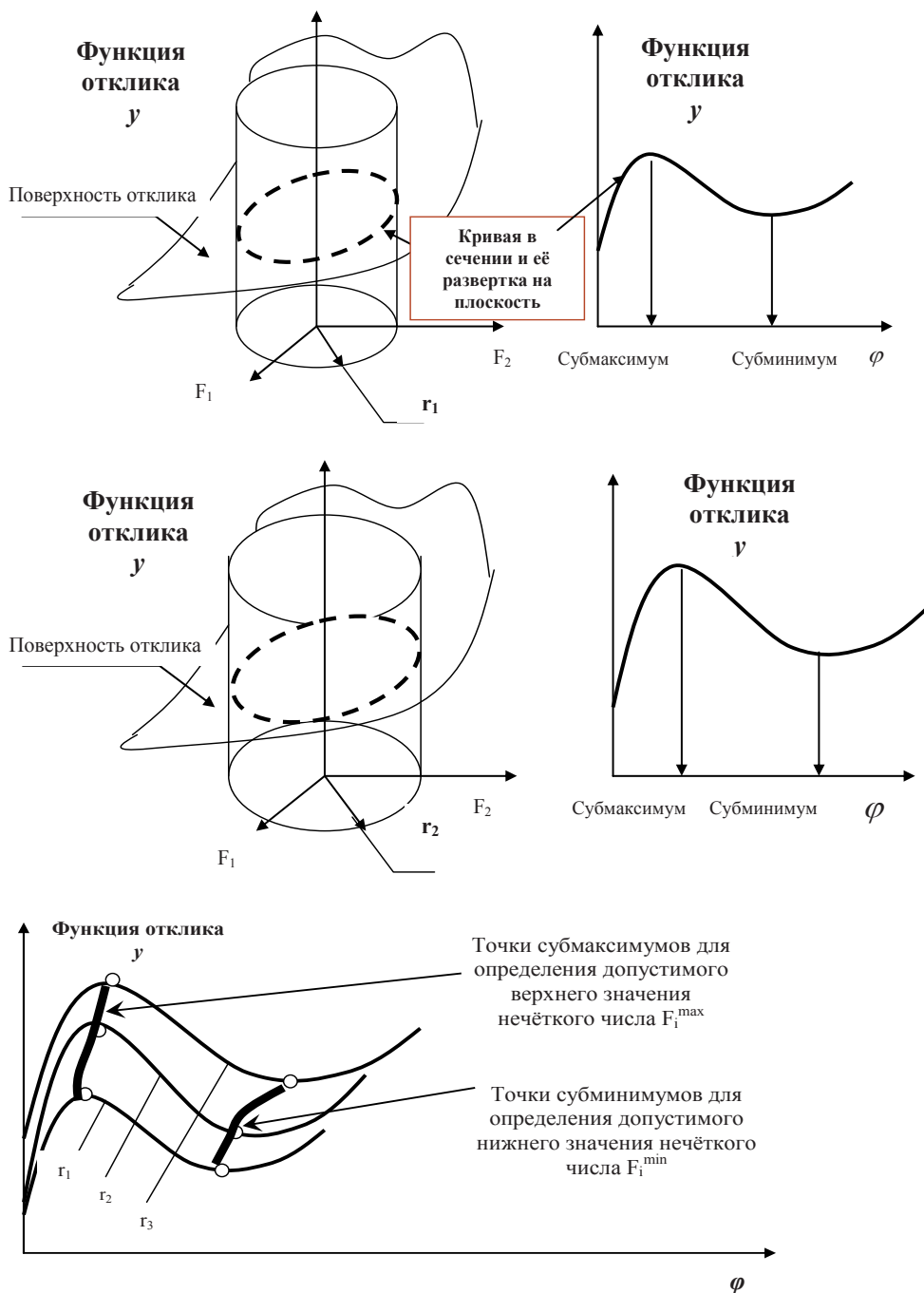


Рис. 1. Определение диапазонов ($F_1^{min}; F_1^{max}$) реализацией процедуры ридж-анализа: субоптимальные точки определяются как точки минимумов и максимумов кривой, полученной разверткой на плоскость линии пересечения поверхности отклика с условным цилиндром разного радиуса ($r=r_1$ сверху, $r=r_2$ снизу). Условный цилиндр описывает ограничения в конкретной задаче

ной является следующая процедура оценивания параметров кинетических уравнений.

Записывается общее кинетическое уравнение для каждого элемента химического состава в виде

$$v_i(t) = \frac{dF_i(t)}{dt} = k_i \frac{S}{m} F_i^{v_i}(t), \quad (7)$$

где v_i - скорость реакции, в которой изменяется содержание i -го элемента в расплаве, F_i - содержание i -го элемента в расплаве, которое определяется по данным химического анализа сплава в процессе плавки, k_i - константа скорости реакции, в результате которой изменяется содержание i -го элемента в расплаве, S - площадь реакционной поверхности в системе «расплав - шлак», m - масса расплава в печи, v_i - порядок реакции, в которой участвует i -й химический элемент.

Реализуется следующий рекуррентный алгоритм расчета оценок коэффициентов уравнения $dF_i = v_i dt$, являющихся оценкой скорости реакции, в которой изменяется содержание i -го элемента в расплаве.

Шаг 1. Расчет начальной дисперсионной матрицы C_0

$$C_0 = N(T'_N T_N)^{-1}. \quad (8)$$

Шаг 2. Расчет оценок коэффициентов $v_i, i=1, \dots, k$

$$V = C_0 T'_N F. \quad (9)$$

Шаг 3. Расчет $v_i(t)$ для набора значений γ с интервалом $\Delta\gamma$

$$v(1+j+\alpha, \gamma) = v(j+\alpha, \gamma) + \frac{C_j t(j+1)}{t'(j+1)C_j t(j+1) + G} [F(j+1) - t'(j+1)v(j+\alpha, \gamma)], \quad (10)$$

где $G = \frac{\gamma}{1-\gamma}$, γ - параметр алгоритма решения.

Оптимальное значение параметра алгоритма решения γ находится из уравнения

$$S_\alpha(\gamma^*) = \min_{\gamma} S_\alpha(\gamma), \quad (11)$$

где $S(\gamma)$ определяется из формулы (12) и при больших значениях N совпадает с математическим ожиданием квадрата погрешности оценки выходной переменной.

$$S(\gamma) = \frac{1}{N-\alpha+1} \sum_{j=\alpha}^N \{F(j) - v'(j, \gamma)t(j)\}^2. \quad (12)$$

Вывод о том, что значения параметра алгоритма решения γ , выбираемого из условия (11), при больших N совпадает с оптимальным значением с точки зрения обеспечения минимизации отклонения расчетных значений выходных переменных от экспериментальных в момент времени $(N+\alpha)$, следует из теоремы [30]:

если для любого $\delta \leq \gamma \leq 1$ может быть найдено такое $\mu(\gamma)$, что разность $r(j) = y(j) - \hat{a}'(j, \gamma)f(j)$ при $j \geq \mu(\gamma)$ есть

стационарный эргодический случайный процесс и если $\alpha > 0$, а ошибка $e(i)$ удовлетворяет условию:

$$E\{e(i)e(j)\} = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ \sigma_e^2, & i = j, \end{cases}$$

$$E\{e(i)f[x(j)]\} = E\{e(i)\bar{a}(j)\} = 0,$$

где $\bar{a}(i)$ - действительное значение коэффициентов модели в момент времени t_i ,

то с вероятностью $P=1$ имеет место равенство

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_\alpha(\gamma) = \lim_{N \rightarrow \infty} E\left\{\left[\bar{y}(N+\alpha) - \hat{a}'(N+\alpha, \gamma)f(N+\alpha)\right]^2\right\} + \sigma_e^2. \quad (13)$$

Доказательство этой теоремы приведено в [31].

На основе определенных реализацией рекуррентного алгоритма (8) - (10) коэффициентов рассчитывается последовательность оценок коэффициента $v_i(t)$, являющихся оценкой порядка реакции v_i , в которой участвует i -й химический элемент

$$\ln v_i(t) = v_i(t) \ln F_i(t). \quad (14)$$

На основе расчета коэффициентов $v_i(t)$ из уравнения (14) рассчитывается параметр K_i

$$\ln v_i(t) = \ln K_i + v_i(t) \ln F_i(t), \quad (15)$$

где $K_i = k_i \frac{S}{m}$ характеризует константу скорости процесса для фактической геометрии ванны расплава в печи.

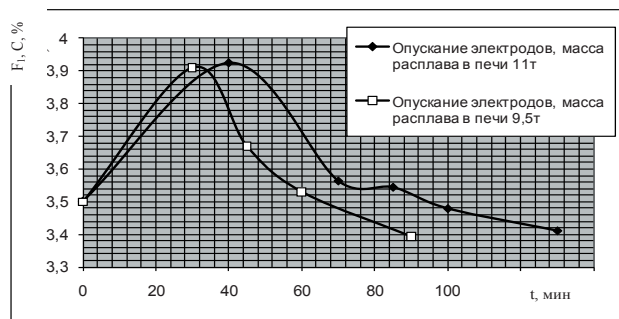
Таким образом, определяется константа скорости процесса k_i , в котором принимает участие i -й элемент химического состава, и находится зависимость $F_i(t)$.

6. Результаты численного моделирования при реализации оптимального управления процессом насыщения ванны углеродом

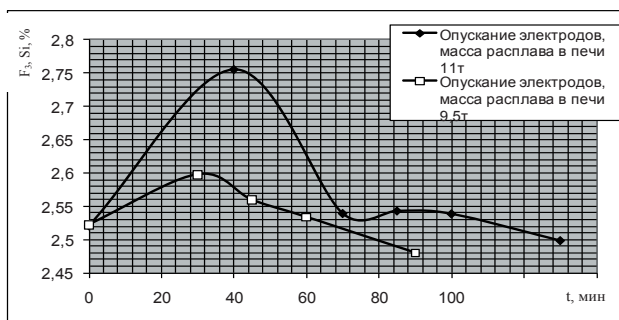
Целью численного моделирования являлась проверка адекватности предложенного адаптивного подхода к моделированию кинетики химического состава расплава при реализации выбранного управления. Адекватность оценивалась проверкой статистической гипотезы о равенстве оценок дисперсий неадекватности модели и точности промышленных экспериментов. Один из результатов численного моделирования приведен на рис. 2 (результаты экспериментально-промышленных плавки на рис. 2 не вынесены).

Полученные результаты позволяют считать предложенную процедуру адаптивного моделирования эффективным инструментом для оценивания динамики химического состава ванны в условиях, когда её параметры меняются по ходу технологического процесса.

Последнее обусловлено выдачей расплава определенными порциями на участок заливки при генерации соответствующих заявок со стороны литейного конвейера.



а



б

Рис. 2. Кинетические кривые, описывающие динамику переменных $F_1(t)$ и $F_3(t)$ при управлении насыщением расплава углеродом: а — динамика содержания углерода в расплаве, б — динамика содержания кремния в расплаве

Выводы

1. Выбору оптимального управления процессом электроплавки на этапе термовременной обработки должна предшествовать процедура получения параметров математических моделей, описывающих состояние объекта на этом этапе электроплавки, и построения аналитического описания конечного состояния, реализовав в дальнейшем возможность поиска опти-

мального управления процессом насыщения ванны углеродом с помощью принципа максимума Понтрягина.

2. Поиск оптимального управления физико-химическими процессами, протекающими в ванне, имеет целью определение такого управления процессом насыщения ванны углеродом, которое обеспечивает возможность перевода системы за минимальное время из фактического начального состояния, в котором находится система на момент времени генерации заявки на расплав конвейером, в конечное, сформированное значениями нечётких входных переменных, обеспечивающими достижение субоптимальных значений нескольких выходных переменных.

3. Математическое описание процесса электроплавки на этапе термовременной обработки представляет собой уравнение скоростей химических реакций, в которых участвуют элементы химического состава выплавляемого чугуна — суть входные переменные; для описания физико-химических процессов, протекающих в ванне электропечи, может быть применён метод, основанный на итерационной процедуре оценивания коэффициентов кинетических уравнений с учетом изменения во времени параметров процесса, позволяющий по ограниченной выборке данных строить адекватные кинетические уравнения для описания состояния системы на этапе термовременной обработки.

4. Полученные в результате применения итерационной процедуры оценивания коэффициентов кинетических уравнений модели могут быть использованы для решения задачи поиска оптимального управления по быстродействию, обеспечивающего также возможность достижения системой заданного конечного состояния.

5. Экспериментально-промышленные исследования, проведенные для реализации разрабатываемого метода получения параметров моделей, описывающих процесс на этапе термовременной обработки и пригодных для поиска оптимального управления на этом этапе электроплавки, подтвердили правильность подхода к решению поставленной задачи и адекватность полученных результатов.

Литература

Литература

1. Галкин, М. Ф. Кибернетические методы анализа электроплавки стали [Текст] / М. Ф. Галкин, Ю. С. Кроль. — М.: Metallurgy, 1971. — 350 с.
2. Пожидаев, О. А. Тенденции в развитии методов плавки чугуна на заводах массового и крупносерийного производства [Текст] / О. А. Пожидаев, Ю. С. Сухарчук, Б. П. Благодоров, П. А. Никитин, А. П. Фролов, В. В. Трещалин // Литейное производство. — 1971. — №5. — С.1-2.
3. Грачев, В. А. Metallurgy плавки чугуна в дуговой печи [Текст] / В. А. Грачев, Б. Л. Кузнецов, В. Е. Бочкарев, В. В. Венгер // Литейное производство. — 1988. — №2. — С.19-21.
4. Воскобойников, В. Г. Свойства жидких доменных шлаков [Текст] / В. Г. Воскобойников, Н. Е. Дунаев, А. Г. Михалевич и др. — М.: Metallurgy, 1975. — 184 с.
5. Поволоцкий, Д. Я. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей [Текст] / Д. Я. Поволоцкий, Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров. — М.: Metallurgy, 1990. — 176 с.
6. Ключников, А. Д. Теплопередача излучением в огнетехнических установках [Текст] / А. Д. Ключников, Г. П. Иванцов. — М.: Энергия, 1970. — 170 с.
7. Извещения ВУЗов. Черная металлургия [Текст] / М. В. Шишимиров, С. А. Квасов, П. В. Глинский, О. М. Сосонкин. — 2001. — №11. — С. 18-20.

8. Пат. № 2134304 РФ Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи / Сосонкин О. М., Уйманов В. А., Петрз А. А., Луканан Ю. В., Бюльгер С. Н., Искусных П. И. // Б. И. – 1999. – № 22.
9. Пат. № 2132394 РФ Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи / Сосонкин О. М., Уйманов В. А., Петров А. А., Луканин Ю. В., Бюльгер С. Н., Балдаев Б. Я., Васильев Л. М. // Б. И. – 1999. – № 18.
10. Тулуевский, Ю. Н. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах [Текст] / Ю. Н. Тулуевский, И. Ю. Зинуров, А. Н. Попов, В. С. Галян. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 104 с.
11. Сосонкин, О. М. Анализ факторов, влияющих на угар металла в дуговой сталеплавильной печи [Текст] / О. М. Сосонкин, М. Б. Шишимиров // Электрометаллургия. – 2002. – №12. – С. 12-15.
12. Шумихин, В. С. Высококачественные чугуны для отливок [Текст] / В. С. Шумихин, В. П. Кутузов, А. И. Храменков и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
13. Грачев, В. А. Выбор перспективных процессов плавки чугуна [Текст] / В. А. Грачев // Литейное производство. – 1996. – № 5. – С. 20-23.
14. Овчаренко, В. И. Производство отливок из серого чугуна на ВА3е [Текст] / В. И. Овчаренко, А. М. Иванов // Литейное производство. – 2000. – № 5. – С. 25-27.
15. Лопухов, Г. А. Передовые технологии электросталеплавильного производства [Текст] / Г. А. Лопухов // Электрометаллургия. – 1999. – № 8. – С. 2-8.
16. Никольский, Л. Е. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов [Текст]: учеб. / Л. Е. Никольский, И. Ю. Зинуров. – М.: Metallurgy, 1993. – 272 с.
17. Малиновский, В. С. Дуговые печи постоянного тока нового поколения для литейного и металлургического производств [Текст] / В. С. Малиновский, Л. В. Ярных // Труды V съезда литейщиков России. – 2001. – С. 87-92.
18. Филиппов, А. К. Использование печей постоянного тока в металлургии [Текст] / А. К. Филиппов, М. М. Крутянский, Г. А. Фариасов // Сталь. – 2002. – № 1. – С. 33-37.
19. Афонаскин, А. В. Особенности технологии выплавки черных металлов в дуговой печи постоянного тока на СЧЛЗ ОАО “Курганмашзавод” [Текст] / А. В. Афонаскин, И. Д. Андреев, Т. Ю. Бажова, В. С. Малиновский // Современные проблемы электрометаллургии стали. Труды XI международной конференции. – Челябинск, 2001. – С. 125-130.
20. Митяев, А. Ф. Выбор типа и емкости агрегатов для выплавки чугуна и стали в литейных цехах [Текст] / А. Ф. Митяев, С. В. Кадников // Электрометаллургия. – 2002. – №11. – С. 53-55.
21. Серая, О. В. Оценивание параметров уравнения регрессии в условиях малой выборки [Текст] / О. В. Серая, Д. А. Дёмин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 6/4(42). – С. 14-19.
22. Раскин, Л. Г. Искусственная ортогонализация пассивного эксперимента в условиях малой выборки нечетких данных [Текст] / Л. Г. Раскин, Д. А. Дёмин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1(80). – С. 20-23.
23. Дёмин, Д. А. Метод обработки малой выборки нечетких результатов ортогонализованного пассивного эксперимента [Текст] / Д. А. Дёмин, Т. И. Каткова // Вісник Інженерної Академії. – 2010. – № 2. – С. 234-237.
24. Серая, О. В. Оценка представительности усеченных ортогональных подпланов плана полного факторного эксперимента [Текст] / О. В. Серая, Д. А. Дёмин // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – № 3. – С. 84-88.
25. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – № 44 (7). – pp. 34-48.
26. Дёмин, Д. А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/10(56). – С. 4-9.
27. Demin, D. A. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath [Text] / D. A. Demin // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2012. – № 6. – pp. 52-58.
28. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский и др. – М.: Физматгиз, 1961. – 382 с.
29. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии [Текст] / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1975. – 576 с.
30. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман и др. – М.: Мир, 1977. – 542 с.
31. Бородюк, В. П. Статистическое описание промышленных объектов [Текст] / В. П. Бородюк, Э. К. Лецкий. – М.: Энергия, 1971. – 285 с.