УДК 536.33.66.064.4

РАЗРАБОТКА И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ ОБЖИГЕ

Сошкин С.В.¹, д.т.н., профессор, директор (ugcma@mail.ru)
Рутковский А.Л.², д.т.н., профессор кафедры теории и автоматизации
металлургических процессов и печей (rutkowski@mail.ru)
Сошкин Г.С.¹, к.т.н., зам. заведующего отделом научно-технических
разработок и внедрений (lans89@list.ru)
Мешков Е.И.², д.т.н., профессор кафедры теории и автоматизации
металлургических процессов и печей
Ковалева М.А.², к.т.н., профессор кафедры теории и автоматизации
металлургических процессов и печей (mary_kovaleva@list.ru)

¹ НПК «Югцветметавтоматика»

(362001, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Калинина, 2а)

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

(362021, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44)

Аннотация. Основная задача процесса обжига электродной продукции – получение обожженных изделий с заданными физико-механическими свойствами. В работе определены математические зависимости формирования качества обжигаемых изделий в период их высокотемпературного нагрева, выполнена идентификация полученных математических зависимостей на основе экспериментальных данных. Адекватные модели позволяют исследовать процессы формирования качества электродной продукции для различных температурных режимов и начальных условий обжига, а так же прогнозировать показатели качества обожженной электродной продукции. Проведен сопоставительный анализ статистической, детерминированной и нейросетевой моделей прогнозирования качества обожженной электродной продукции.

Ключевые слова: обжиг электродных материалов, формирование качества продукции, моделирование процесса обжига, прогноз показателей процесса.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-197-203

Предприятия черной металлургии являются одними из основных потребителей электродной продукции при выплавке спецсталей в электропечах.

Одним из важнейших переделов производства электродной продукции, определяющим качественные и экономические показатели, является обжиг в многокамерных печах. В отечественной промышленности требования к качеству обожженной продукции определяются техническими условиями ТУ 1913-001-00200992-95. Обожженные электроды должны отвечать необходимым физико-химическим и механическим свойствам, таким как удельное электросопротивление, предел прочности на сжатие, действительная плотность, объемная плотность, реакционная способность в CO_2 , осыпаемость.

Повышение качества электродов и обожженных анодов значительно снижает их удельный расход при использовании в процессах электролиза и электроплавки. В работе [1] проведена оценка расхода анода при различных свойствах обожженных анодов. Показано, что дополнительные издержки за счет высокого

расхода анодов с проблемами качества равнозначны 96 долл/т Al. Необходимость прогнозирования показателей качества электродной продукции в зависимости от ее исходного состава и режимных параметров обжига очевидна.

Проведение экспериментальных исследований по формированию качества обожженных изделий в промышленных и лабораторных условиях является чрезвычайно трудоемким и затратным путем, поскольку процесс обжига занимает до 360 ч. Наиболее перспективным направлением исследований является математическое моделирование. Однако публикации в этой области крайне малочисленны. В работе [2] авторами приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию температуры обжига на свойства заготовок диаметром 300 мм. На их основе получена статистическая модель формирования качества углеродных заготовок в виде системы полиномиальных уравнений регрессии. Адекватность полученных уравнений авторами не проверялась, а достигнутая относительная погрешность определения свойств электродов составляет

от 2,5 до 17 %, что свидетельствует о необходимости серьезных дополнительных исследований в этом направлении.

В работе [3] представлена модель обжига анодов в открытой печи, где изучены вопросы теплопередачи, газо- и гидродинамики, однако моделирование процесса формирования качества обжигаемой продукции авторами не рассмотрено.

В ряде работ, посвященных формированию структуры и свойств графитированных электродов [4 – 11], обосновано влияние предыдущих технологических процессов и качество материалов, составляющих исходную композицию «зеленых» заготовок. Однако не менее важным процессом, определяющим качество обожженных изделий, является обжиг.

На основании проведенных авторами экспериментальных исследований и обработки доступной информации, выполнены работы по синтезу математических моделей, отражающих формирование показателей качества электродов в зависимости от режимных параметров обжига. С целью определения наиболее адекватного математического описания формирования качества электродной продукции проведена разработка, верификация и сравнительный анализ аналитической, эмпирико-статистической и нейросетевой моделей.

Разработка статистической модели формирования качества электродной продукции реализована на основе обработки экспериментальных материалов, приведенных в исследованиях [12, 13]. Модель формируется в виде уравнений регрессии определенного порядка, обеспечивающих адекватность и точность сходимости экспериментальных и модельных значений. При моделировании в числе показателей качества обжигаемой заготовки приняты: пористость, истинная плотность, удельное электрическое сопротивление, прочность. Данные для построения математических моделей и последующих исследований получены в процессе создания и внедрения систем автоматического управления технологическим режимом кольцевых многокамерных печей обжига электродных изделий Новочеркасского электродного завода.

Технологическими параметрами, определяющими показатели обожженных изделий, являются: температура обжига, скорость изменения температуры, выделение летучих из заготовок, тип применяемого связующего (высоко- и низкотемпературный пек), тип наполнителя (нефтяной или пековый кокс, антрацит).

Модель температуры электродных заготовок, соответствующей промышленному графику обжига, имеет вид

$$Te = 0,06 + 2,338\tau - 0,029\tau^2 + 2,401 \cdot 10^{-4} \tau^3 - 7,571 \cdot 10^{-7} \tau^4 + 8,419 \cdot 10^{-10} \tau^5, \quad (1)$$

где Te – температура электрода; °С, τ – время обжига, ч.

Модель формирования качества электродных заготовок при обжиге представлена следующими уравнениями:

$$Mл = 14,044 + 0,017Te - 2,401Te^2 + 4,276 \cdot 10^{-7} Te^3 - 2,243 \cdot 10^{-10} Te^4, \quad (2)$$

где $Mл$ – текущая масса летучих в обжигаемом изделии, %;

$$Di = 1,814 + 2,324 \cdot 10^{-4} Te + 7,254 \cdot 10^{-8} Te^2 + 4,924 \cdot 10^{-10} Te^3 - 5,867 \cdot 10^{-13} Te^4, \quad (3)$$

где Di – истинная плотность заготовки, г/см³;

$$\rho = 8,871 \cdot 10^3 - 0,831Te - 0,104Te^2 + 2,001 \cdot 10^{-4} Te^3 - 1,072 \cdot 10^{-7} Te^4, \quad (4)$$

где ρ – удельное электросопротивление, ом·мм²/м;

$$\sigma = 45,294 + 0,019Te - 4,887 \cdot 10^{-4} Te^2 + 1,207 \cdot 10^{-6} Te^3 - 7,836 \cdot 10^{-10} Te^4, \quad (5)$$

где σ – предел прочности на сжатие, МПа;

$$P = 1,447 + 0,046Te - 2,68 \cdot 10^{-5} Te^2 + 1,163 \cdot 10^{-9} Te^3, \quad (6)$$

где P – пористость заготовки, %.

Степень аппроксимирующих полиномов оценивалась по критерию Акаике, позволяющему выбирать наилучшую модель [14] с учетом влияния на качество модели двух противоположных тенденций. Первое – штраф за большую дисперсию, второе – штраф за использование дополнительных переменных. Предпочтение отдается модели с наименьшим значением критерия.

Детерминированная математическая модель формирования качества электродных заготовок при обжиге синтезирована на основе представлений о физико-химических процессах, происходящих в результате термической обработки «зеленых» заготовок.

В работе [15] приведена постановка задачи и основные теоретические постулаты синтеза модели. Выражение, определяющее пиролиз «летучих» по двухкомпонентной схеме, имеет вид [16]

$$\frac{dMл}{dt} = M_{\max} \left[\alpha \left(1 - k_{01} \exp \left(\frac{-E1}{RT} \right) \right) \right] + (1 - \alpha) \left[1 - k_{02} \exp \left(\frac{-E2}{RT} \right) \right], \quad (7)$$

$M_{\max}$ – максимальный выход летучих, %; α – доля компонент летучих первого типа; k_{01} , k_{02} , E_1 , E_2 – предэкспоненциальный множитель и кажущаяся энергия активации выделения компонент летучих первого и второго типа соответственно.

Изменение плотности заготовки, происходящее в результате выделения «летучих» и трансформирования объема открытых и закрытых пор, может быть представлено в виде выражения

$$D_{\text{и}} = \frac{M_{\text{к}}}{V_0 - (1 - k_{\text{зп}})k_v[\text{Мл}(0) - \text{Мл}]k_v \frac{W_6}{V_{\text{зп}}} \exp\left(-\frac{E_{\text{сд}}}{RT}\right)}, \quad (8)$$

где $D_{\text{и}}$ – истинная плотность заготовки, г/см³; $M_{\text{к}}$ – масса углерода кокса; $\text{Мл}(0)$ – начальная масса летучих; V_0 – первоначальный объем заготовки; $k_{\text{зп}}$ – коэффициент, учитывающий объем закрытых пор; k_v – коэффициент пропорциональности, связывающий изменение объема заготовки с массой удаленных летучих; $V_{\text{зп}}$ – текущий объем уничтожаемых закрытых пор; W_6 – объем грамм-атома; $E_{\text{сд}}$ – энергия активации движения границ зерен, контролируемая самодиффузией.

Изменение кажущейся плотности заготовки в зависимости от температуры обжига определим через выделившиеся летучие следующим образом:

$$D_{\text{к}} = \frac{D_0 - \frac{G}{1000}}{1 - \left(G_s \frac{\rho}{1000}\right)}, \quad (9)$$

где $D_{\text{к}}$ – кажущаяся плотность, г/см³; D_0 – начальное значение плотности, г/см³; G – выделившиеся летучие; G_s – суммарное количество выделившихся летучих, ρ – средняя плотность выделяющихся летучих, г/см³ [17].

Изменение пористости заготовки в период обжига определяли по соотношению кажущейся и истинной плотности для текущей температуры:

$$P = \left(1 - \frac{D_{\text{к}}}{D_{\text{и}}}\right) \cdot 100. \quad (10)$$

Зависимость удельного электросопротивления заготовки от температуры обжига предлагается интерпретировать следующим кинетическим уравнением [18]:

$$\begin{aligned} F(T, \alpha, \alpha_1, E1, E2, c1, c2) = \\ = F_0 - F_0 \left[c1 \left(1 - \exp \left(-\alpha \exp \left(\frac{-E1}{8,314T} \right) \right) \right) + \right. \\ \left. + c2 \left(1 - \exp \left(-\alpha_1 \exp \left(\frac{-E2}{8,314T} \right) \right) \right) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

Для оперативного прогнозирования качества обожженной электродной продукции разработана модель на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). При выборе топологии сети, числа слоев и нейронов в слое, типа связи между нейронами, функции активации нейронов определяется вид нейронной сетевой

модели. Авторами применены многослойные нейронные сети обратного распространения с нелинейной функцией активации нейронов скрытых слоев – многослойные персептроны. Алгоритм обучения нейронной сети обратного распространения показан в работе [19]. Исследования проведены с использованием программного модуля Neural Network Wizard (Base Group Labs). В данный модуль включено несколько классов, предназначенных для создания нейронной сети, загрузки обучающей выборки данных, обучения нейронной сети и использования полученной ИНС. Файл, в котором хранятся параметры полученной нейронной сети, используется для прогнозирования показателей качества электродной продукции. В работе [20] представлены ИНС, прогнозирующие качество электродных заготовок в зависимости от режимных параметров обжига. Структура ИНС для прогнозирования выхода летучих и угара представлена на рис. 1. Она представляет многослойный персептрон с тремя скрытыми слоями по 10 нейронов в каждом. Число входных параметров – 6, выходных – 2. Активационная функция – сигмоида с коэффициентом передачи, равным единице. Для обучения сети используется 80 % значений массивов данных, для тестирования модели – 20 %. В результате обучения ИНС среднеквадратичная ошибка прогноза составила $9,15 \cdot 10^{-8}$, максимальная ошибка – $6,37 \cdot 10^{-7}$, максимальная ошибка тестирования – $6,49 \cdot 10^{-7}$. Количество эпох обучения составило 7092.

Для прогноза качества электродной продукции сформированы и обучены три ИНС, в одной из которых выходной параметр, а именно удельное электросопротивление (УЭС), является единственным, а две другие сети имеют по два выхода. Для одной ИНС – это механическая прочность и пористость электродов, для другой – истинная плотность и объемная масса. Структура ИНС прогноза УЭС включает 10 входных и один выходной параметр, два скрытых слоя с тремя и пятью нейронами. Активационная функция – сигмоида с коэффициентом передачи, равным единице. Среднеквадратичная ошибка обучения сети – $1,09 \cdot 10^{-7}$, средняя ошибка тестирования показателя качества – $7,2 \cdot 10^{-7}$. Для прогноза механической прочности и пористости синтезирована и обучена ИНС, структура которой представлена на рис. 2. Она включает 10 входных и два выходных параметра, три промежуточных слоя с 10 нейронами в каждом слое. Активационная функция – сигмоида с параметром передачи, равным единице. Среднеквадратичная ошибка обучения сети – $5,27 \cdot 10^{-7}$, ошибка тестирования – $6,8 \cdot 10^{-7}$. Число эпох обучения при достигнутых значениях ошибок равно 4782.

Аналогичную структуру имеет ИНС для прогноза истинной плотности и насыпной массы обжигаемых изделий и пористости. В результате процесса обучения ИНС среднеквадратичная ошибка составила $9,15 \cdot 10^{-8}$, а для тестирования сети – $3,49 \cdot 10^{-7}$. Число эпох обучения равно 1348.

Рис. 1. Структура нейронной сети для прогнозирования выхода летучих и угара

Fig.1. Structure of a neural network for forecasting of an exit of volatiles and waste

Рис. 2. Структура нейронной сети для прогноза механической прочности и пористости

Fig. 2. Structure of a neural network for the forecast of mechanical durability and porosity

Обученные нейронные сети дают возможность управлять температурными режимами обжига с целью формирования необходимого качества электродных материалов. Нейросетевая модель имеет по каждому параметру относительный коридор стабильности, в пределах которого функционал качества изменяется незначительно в силу распределения вычислительных функций между отдельными нейронами сети. Благо-

даря этому, резкого падения качества модели при повреждении структуры не происходит, и наблюдается постепенная деградация работоспособности. Это свойство определяет надежность схем на нейронных сетях и позволяет использовать нейросетевые модели для ответственных и опасных процессов.

Достоверность полученных стохастических и детерминированных моделей определялась на основе

F -статистик (табл. 1) и коэффициента детерминированности r^2 (табл. 2). F -статистика используется совместно с F -значениями для определения вероятности того, что данные действительно описываются указанным выражением или совпадение вызвано случайными флуктуациями.

Приведенные значения подтверждают, что синтезированные модели адекватно отражают экспериментальные данные для заданного обучающего массива, поскольку расчетные ($F_{\text{расч}}$) значения числа Фишера больше табличных ($F_{\text{табл}}$) для всех полученных уравнений с доверительной вероятностью 95 %.

Коэффициент детерминированности (см. табл. 2) дает количественную оценку меры анализируемой связи.

Для всех представленных моделей значение r^2 близко к единице, что свидетельствует о том, что около 90 % изменений (вариаций) в отклике обуславливается вариациями в учтенных факторах и лишь 10 % – за счет влияния других факторов.

Полученные результаты показали, что все три типа моделей, разработанные для оценки показателей качества обожженной электродной продукции, интерпретируют экспериментальные данные с достаточной точностью и в равной мере могут быть признаны корректными.

Результаты имитационного моделирования прогноза качества обожженной продукции с примени-

ем представленных моделей содержатся в работах [15, 16, 18, 20]. В табл. 3 представлены расчетные и экспериментальными данные показателей качества при равнозначных исходных характеристиках «зеленых» заготовок и при одинаковом температурном режиме обжига.

Применение полученных результатов иллюстрируется моделированием одного из показателей качества обжигаемой электродной продукции (удельное электрическое сопротивление) при различных температурно-временных графиках обжига (рис. 3).

Выводы. Синтезированы математические модели различных классов для прогноза показателей качества при обжиге коксо-пековых композиций.

Модели обладают достаточной для промышленных применений точностью (погрешность для нейросетевой модели составляет от 0,001 до 0,071 ед. измерения конкретного параметра качества).

Модели позволяют проводить имитационные исследования, прогнозировать качественные показатели продукции в зависимости от исходных условий обжига и применять их для целей оперативного управления процессом.

Представленные модели прогнозирования процессов формирования качества электродной продукции применимы как для закрытых, так и для открытых кольцевых многокамерных печей обжига.

Таблица 1

Анализ стохастической и детерминированной моделей

Table 1. Analysis of the stochastic and determinate models

Показатель	Математическая модель	
	статистическая	детерминированная
Содержание летучих, %	$F_{\text{таб}} = 6,94, F_{\text{расч}} = 106,22$	$F_{\text{таб}} = 7,976, F_{\text{расч}} = 213,231$
Истинная плотность, г/см ³	$F_{\text{таб}} = 6,94, F_{\text{расч}} = 172,26$	$F_{\text{таб}} = 8,94, F_{\text{расч}} = 314,57$
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм/м ²	$F_{\text{таб}} = 6,26, F_{\text{расч}} = 1421,74$	$F_{\text{таб}} = 8,94, F_{\text{расч}} = 84,352$
Механическая прочность, МН/м ²	$F_{\text{таб}} = 6,26, F_{\text{расч}} = 217,83$	$F_{\text{таб}} = 8,94, F_{\text{расч}} = 134,12$
Пористость, %	$F_{\text{таб}} = 6,94, F_{\text{расч}} = 67,12$	$F_{\text{таб}} = 9,28, F_{\text{расч}} = 126,63$

Таблица 2

Количественная оценка меры анализируемой связи

Table 2. Quantitative assessment of degree of analyzed tie

Показатель	Метод моделирования, значение r^2		
	статистическая	детерминированная	нейросетевая
Содержание летучих, %	0,9893	0,9972	0,9723
Истинная плотность, г/см ³	0,8251	0,9986	0,9878
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм/м ²	0,7162	0,8012	0,9999
Механическая прочность, МН/м ²	0,9999	0,8306	0,9981
Пористость, %	0,9411	0,9783	0,9794

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные показатели качества

Table 3. Calculation and experimental quality performances

Показатель	Экспериментальные значения		Абсолютное отклонение для моделей		
	начальные	конечные	статистическая	детерминированная	нейросетевая
Содержание летучих, %	12,4	0,6	0,053	0,005	0,071
Истинная плотность, г/см ³	1,79	2,05	0,001	0,002	0,014
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм/м ²	6800	57	3,88	1,394	0,001
Механическая прочность, МН/м ²	23,3	40,8	0,26	1,011	0,006
Пористость, %	11,7	24,9	0,5	0,047	0,04

Рис. 3. Влияние температурных графиков обжига на изменение удельного электросопротивления обжигаемой электродной продукции при температуре обжига: 1 – расчетное значение; 2 – экспериментальное и удельном электросопротивлении: 3 – расчетное значение; 4 – экспериментальное

Fig. 3. Influence of temperature schedules of burning on change of specific resistance of the burned electrode production at temperature of burning: 1 – calculated value; 2 – experimental and specific electrical resistance; 3 – calculated value; 4 – experimental value

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Jones S.S., Hildebrandt R.D., Kaiser M.C. Important factors affecting the performance of anode carbon composites for the production of aluminum // 14-th Biennial conference on carbon. Extended Abstr. and Program., 25 – 29 June 1979. American Carbon Society, Pennsylvania State University. P. 81 – 90.
- Лутков А.И., Тканова О.В., Большаков Ю.Л. Определение термонапряжений и оптимизация режима обжига углеродных заготовок // Цветные металлы. 1990. № 9. С. 62 – 65.
- Severo D. S., Elton V. G., Pinto C. V. Advanced 3D modelling for anode baking furnaces // Light Metals (The Minerals, Metals & Materials Society). 2005. P. 203 – 208.
- Keller F., Sulger P., Meier M. etc. Specific energy consumption in anode bake furnaces // Light Metals. 2010. P. 1005 – 1010.
- Severo D., Sulger P., Keller F., Meier M. Recent developments in anode baking furnace design // Light Metals. 2011. P. 853 – 858.
- Gerald F. Century aluminium of West Virginia, AIME // Light Metals. 2000. P. 573 – 578.
- Fisher W.K., Keller F., Perruchoud R.C., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME // Light Metals. 1993. P. 683 – 689.
- Mannweiler U., Sulzberger P., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME // Light Metals. 1991. P. 635 – 639.
- Oberdolz S., Muhlemann O. R&D Carbon, AIME // Light Metals. 1978. P. 315.
- McClung M., Ross I.R., Chavanec G. Century Al of West Virginia, AIME // Light Metals. 2000. P. 573 – 479.
- Санников А.К. Принцип управления формированием структуры и свойств графитированных электродов // Цветные металлы. 1990. № 9. С. 58 – 62.
- Смирнова А.С., Рысс М.А., Дмитриева Г.В., Баженов Н.А. Изучение динамики газовой выделения и изменения свойств при обжиге заготовок, изготовленных на средне- и высокотемпературном пеках // Цветные металлы. 1965. № 11. С. 90 – 93.
- Сухоруков И.Ф., Атаманский А.И., Павловский А.М. Об оптимальном режиме нагревания электродных заготовок различных диаметров // Цветная металлургия. 1965. № 20. С. 51 – 58.
- Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. Т. 19. P. 716 – 723.
- Сошкин С.В., Фокин В.П., Рутковский А.Л., Сошкин Г.С. Математическое моделирование процессов формирования качественных показателей электродной продукции при обжиге // Цветная металлургия. 2010. № 12. С. 33 – 39.
- Сошкин Г.С., Рутковский А.Л., Цемехман Л.Ш. и др. Экспериментальные исследования и математическое моделирование динамики термического разложения углеродных композиций // Цветные металлы. 2012. № 2. С. 42 – 47.

17. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 165 с.
18. Сошкин С.В., Рутковский А.Л., Сошкин Г.С. Исследование и математическое моделирование процесса пиролиза электродных заготовок при обжиге // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 108 – 110.
19. Мкртчян С.О. Нейроны и нейронные сети. Введение в теорию формальных нейронов. – М.: Энергия, 1971. – 232 с.
20. Салихов З.Г., Рутковский А.Л., Сошкин Г.С., Сошкин С.В. Разработка нейросетевых моделей прогнозирования качественных показателей обожженной электродной продукции для управления технологическим процессом обжига // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 1. С. 54 – 60.

Поступила 28 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 3, pp. 197–203.

DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF FORMING OF ELECTRODE PRODUCTION QUALITY AT BURNING

S.V. Soshkin¹, A.L. Rutkovskii², G.S. Soshkin¹, E.I. Meshkov², M.A. Kovaleva²

¹ SPC “Yugtsvetmetavtomatika”, Vladikavkaz, Russia

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU), Vladikavkaz, Russia

Abstract. The main objective of the burning process of electrode products is getting burnt products with desired physical and mechanical properties. The authors have determined the mathematical dependences of forming of burnt products quality during their high-temperature heating, and have completed the identification of these dependences on the basis of the experimental data. Adequate models allow us to study the formation processes of the electrode products quality for different temperature regimes and initial burning conditions, as well as to predict the quality levels of burned electrode products. The comparative analysis of statistical, deterministic and neural networks models to predict the quality of burnt electrode products was made.

Keywords: burning of electrode materials, formation of production quality, modeling of burning process, forecast of process indicators.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-197-203

REFERENCES

1. Jones, S.S., Hildebrandt, R. D., Kaiser M. C. Important factors affecting the performance of anode carbon composites for the production of aluminum. In: *14th Biennial conference on carbon, Extended Abstr. and Program*, 25–29 June, 1979. American Carbon Society, Pennsylvania State University, pp. 81–90.
2. Lutkov A.I., Tkanova O.V., Bol'shakov Yu.L. Determination of thermal stresses and optimization of burning mode of carbon billets. *Tsvetnye metall.* 1990, no. 9, pp. 62–65. (In Russ.).
3. Severo D.S., Elton V.G., Pinto C.V. Advanced 3D Modelling For Anode Baking Furnaces. *Light Metals (The Minerals, Metals & Materials Society)*. 2005, pp. 203–208.
4. Keller F., Sulger P., Meier M., Severo D., Gusberti V. Specific Energy Consumption in Anode Bake Furnaces. *Light Metals*. 2010, pp. 1005–1010.
5. Severo D., Sulger P., Keller F., Meier M. Recent Developments in Anode Baking Furnace Design. *Light Metals*. 2011, pp. 853–858.
6. Gerald F. Covanec. Century Aluminium of West Virginia, AIME. *Light Metals*. 2000, pp. 573–578.
7. Fisher W.K., Keller F., Perruchoud R.C., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME. *Light Metals*. 1993, pp. 683–689.
8. Mannweiler U., Sulzberger P., Oberdolz S. R&D Carbon, AIME. *Light Metals*. 1991, pp. 635–639.
9. Oberdolz S., Muhlemann O. R&D Carbon, AIME. *Light Metals*. 1978, 315 p.
10. McClung M., Ross I.R., Chavanec G. Century Al of West Virginia, AIME. *Light Metals*. 2000, pp. 573–479.
11. Sannikov A.K. The control principle of formation of structure and properties of graphite electrodes. *Tsvetnye metall.* 1990, no. 9, pp. 58–62. (In Russ.).
12. Smirnova A.S., Ryss M.A., Dmitrieva G.V., Bazhenov N.A. The study of the kinetics of gas evolution and change of properties during burning of billets made at medium and high-temperature modes. *Tsvetnye metall.* 1965, no. 11, pp. 90–93. (In Russ.).
13. Sukhorukov I.F., Atamanskii A.I., Pavlovskii A.M. Optimal heating modes for electrode blanks of various diameters. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1965, no. 20, pp. 51–58. (In Russ.).
14. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974, vol. 19, pp. 716–723.
15. Soshkin S.V., Fokin V.P., Rutkovskii A.L., Soshkin G.S. Mathematical modeling of quality indicators formation of electrode products during burning. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2010, no. 12, pp. 33–39. (In Russ.).
16. Soshkin G.S., Rutkovskii A.L., Tsemekhman L.Sh., Sineva S.I., Soshkin S.V. Experimental studies and mathematical modeling of the thermal decomposition of carbon compositions. *Tsvetnye metall.* 2012, no. 2, pp. 42–47. (In Russ.).
17. Pomerantsev V.V. *Osnovy prakticheskoi teorii gorenija* [Basics of practical theory of combustion]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 165 p. (In Russ.).
18. Soshkin S. V., Rutkovskii, A. L., Soshkin, G. S. Research and mathematical modeling of the pyrolysis process of electrode billets during burning. *Tsvetnye metall.* 2008, no. 2, pp. 108–110. (In Russ.).
19. Mkrтчян С.О. *Neirony i neironnye seti. Vvedenie v teoriyu formal'nykh neironov* [Neurons and neural networks. Introduction to the theory of formal neurons]. Moscow: Energiya, 1971, 232 p. (In Russ.).
20. Salikhov Z.G., Rutkovskii, A.L., Soshkin, G.S., Soshkin, S.V. Forecasting network structure model development of burnt electrode products quality index for burning technology process programmed control. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.).

Information about the authors:

S.V. Soshkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director (ugcma@mail.ru)
A.L. Rutkovskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of the Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces (rutkowski@mail.ru)
G.S. Soshkin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department of Scientific and Technical Developments and Deployments (lans89@list.ru)
E.I. Meshkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of the Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces
M.A. Kovaleva, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of the Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces (mary_kovaleva@list.ru)

Received January 28, 2015