

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАЛКИ ТЕРМОАНТРАЦИТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НЕПРЕРЫВНЫХ САМООБЖИГАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

С.В. Кутузов¹, В.В. Деркач¹, М.И. Гасик², А.П. Горобец², М.М. Гасик³

¹ЧАО «Украинский графит». 69600, г. Запорожье, ул. Северное шоссе, 20. E-mail: tehnology@ukrgrafit.com.ua

²Национальная металлургическая академия Украины.

49000, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

³Аалто университет. Финляндия, Эспо, PO BOX 11000 FI-00076. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

Рассмотрен процесс графитации антрацита как углеродного компонента самообжигающихся электродов. Проведены экспериментальные исследования физических свойств термоантрацита методами термогравиметрии и ИК-спектроскопии в температурном интервале 400...1400 °С. Созданы регрессионные модели взаимосвязи строения термоантрацита, показателя прочности, теплопроводности и удельного сопротивления с температурным режимом прокалки антрацита. Библиогр. 9, табл. 4, рис. 7.

Ключевые слова: термоантрацит; самообжигающиеся электроды; теплофизические характеристики; динамическая термогравиметрия; ИК-спектроскопия; кристаллиты; плотность; электропроводность; фазовый состав

Непрерывные самообжигающиеся электроды являются неотъемлемым компонентом энерготехнологического оборудования рудотермических печей, эксплуатируемых на предприятиях ферросплавной, фосфорной, абразивной, карбидкальциевой отраслей промышленности [1]. При производстве электродных масс для самообжигающихся электродов используется термоантрацит, кокс (каменноугольный, пековый, нефтяной), возвраты электродного производства, а в качестве связующего каменноугольный пек.

Основным материалом электродных масс для самообжигающихся электродов является термоантрацит, получаемый прокалкой электродного антрацита — одного из метаморфизированных разновидностей угля при температуре 1200...1800 °С. Согласно современным представлениям [2] о процессе метаморфизма каменных углей антрацит представляет собой углеродистый материал на завершающей стадии диагенеза твердых горючих ископаемых. Запасы антрацитов составляют всего лишь 3 % от мировых залежей угля [3]. Содержание углерода в антрацитах составляет 91...97 %, выход летучих веществ — 2...8 %. Антрациты, используемые в составе электродной массы, должны иметь минимальное количество золы, серы, влаги и высокое содержание углерода. С целью разработки рациональной технологии получения термоантрацита со стабильно низкими показателями по удельному электросопротивлению (УЭС) выполнены экспериментальные исследования по

изучению процессов превращений донецкого антрацита электродного сортамента при его нагревании (кальцинации).

Методика исследований. Образцы антрацита массой 70 мг фракции 3...5 мм помещали в калориметр и нагревали до температуры 1400 °С со скоростью 5 °С/мин в атмосфере воздуха или аргона. Термокинетические эксперименты по изучению процессов выделения и пиролиза летучих, окисления летучих и твердого углерода проведены с использованием дифференциального сканирующего калориметра марки СТА 449С фирмы «NETZSCH» [4]. Анализ состава газов производили на интегрированном с калориметром Фурье-ИК-спектрометре «ТЕНЗОР 27» (фирма «BRUKER OPTICS»). Поскольку прямое спектральное измерение химического состава газов в зоне реакции в этом приборе невозможно, пробы газа для анализа отбирали из реакционной зоны по термостатированному при 300 °С капилляру непосредственно в измерительную камеру спектрометра.

Характеристикой термокинетических процессов, происходящих в антраците при нагревании служат данные об изменении веса исходного образца антрацита, скорости изменения веса образца, величины теплового потока, суммарного газовойделения в относительных единицах при расчетах с применением интеграла Грамма–Шмидта (Г–Ш), позволяющего в интегральной форме представить табличные данные.

С.В. Кутузов — Scopus Author ID: 12039619800, М.И. Гасик — Scopus Author ID: 55832331700,

М.М. Гасик — <https://orcid.org/0000-0002-5782-7987>, А.П. Горобец — <https://orcid.org/0000-0003-1113-0954>

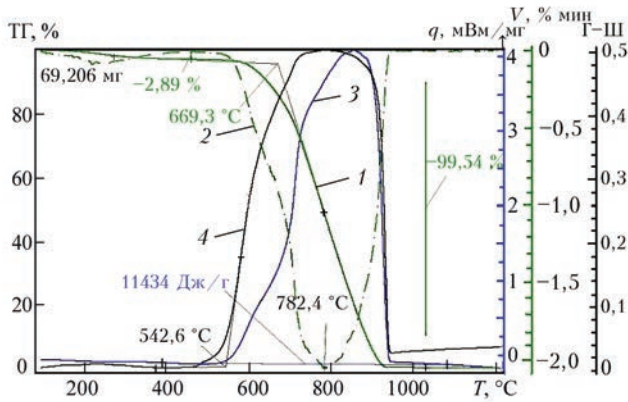


Рис. 1. Кинетические кривые прокалки антрацита в интервале температур 100...1200 °С на воздухе: 1 — изменение веса (ТГ), % к исходному; 2 — скорость изменения веса (V); 3 — тепловой поток (Q) (верхнее направление — экзотермический процесс); 4 — суммарное газовыделение (Г-Ш)

Результаты исследований. Превращения в антраците при нагреве на воздухе и в аргоне. Анализ результатов исследования термокинетических кривых нагрева образца антрацита до 1200 °С, представленных на рис. 1, позволяет количественно оценить изменения изучаемых параметров. Проецируемое начало реакции окисления антрацита по величине потерь веса образца происходит при температуре 669,3 °С, а по показателю газовыделения при 542,6 °С [4].

Кинетический анализ экспериментальных данных по измерению веса пробы дает регрессионную кривую окисления антрацита, описываемую уравнением Авраами–Ерофеева 3-го порядка:

$$d\alpha / dt = -A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \frac{3}{2} (-\ln \alpha)^{2/3}, \quad (1)$$

где E (24 кДж/моль) — энергия активации; A ($5 \cdot 10^{-3}$) — множитель; α — степень превращения антрацита (от 0 до 1). Наиболее высокая скорость окисления (горения) антрацита на воздухе наблюдалась при температуре 780...785 °С [4].

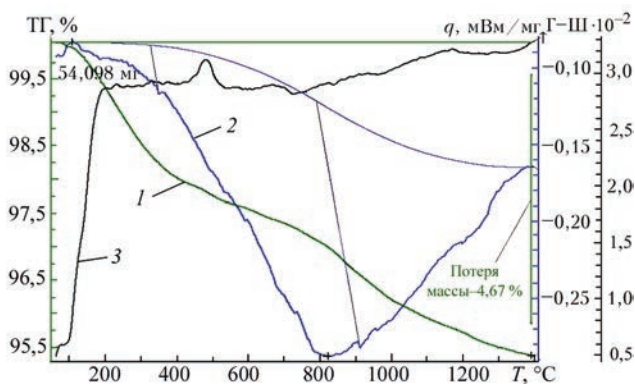
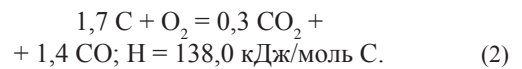


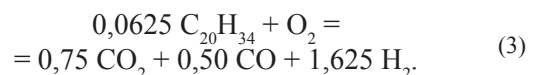
Рис. 2. Кинетические кривые прокалки антрацита в интервале температур 100...1400 °С в аргоне: 1 — изменение веса (ТГ), % к исходному; 2 — тепловой поток (Q); 3 — суммарное газовыделение (Г-Ш)

Образец антрацита практически полностью окислялся при нагревании до температуры 900 °С. Суммарное изменение веса образца составило 99,54 %, т. е. содержание золы в данном образце около 0,5 %. Окисление навески антрацита в условиях экспериментов на воздухе сопровождалось суммарным тепловым эффектом 11,5 кДж/г или 138,0 кДж/моль С, что почти в три раза меньше теоретической теплотворной способности углеродных материалов — 33,9 кДж/г или 406,8 кДж/моль С соответственно. Разница в тепловых эффектах объясняется тем, что на начальной стадии окисления углерода протекает по экзотермической реакции с образованием CO_2 , а затем по эндотермической реакции Белла–Будуара $CO_2 + C \rightarrow 2CO$. Полученному по данным калориметрии тепловому эффекту 138,0 кДж/моль С соответствует балансовая реакция:



Превращения в антраците при нагреве в аргоне. В опытах при прокалке навески антрацита в аргоне установлено, что выделение летучих начинается при 80...100 °С и продолжается в течение подъема температур во всем интервале до 1400 °С (рис. 2). Общее изменение веса образца антрацита составило 4,67 %, что согласуется с литературными данными о содержании летучих веществ в антраците около 5 %. Выявить температурный интервал какого-либо значительного изменения процесса выделения летучих по кривой убыли веса образца не было предпосылок.

Экспериментальная термическая кривая теплового потока имеет пик при 822,1 °С. Общий процесс выделения и разложения (пиролиза) летучих характеризуется эндотермическим эффектом 1,15 кДж/г антрацита (13,80 кДж/моль), что составляет 10 % экзотермического теплового эффекта при окислении навески антрацита на воздухе. Выделяющиеся из антрацита летучие вещества имеют сложный состав. Исходя из полученного теплового эффекта и материального баланса их можно представить совокупной формулой $C_{20}H_{34}$, а окисление летучих — следующей суммарной реакцией [4]:



Анализ газов методом Фурье — преобразование результатов ИК-спектроскопии, как отмечено выше, основан на абсорбции ИК-поглощения газами в характеристических областях спектра. Спектр ИК-поглощения может состоять из отдельных линий, полос или быть непрерывным в

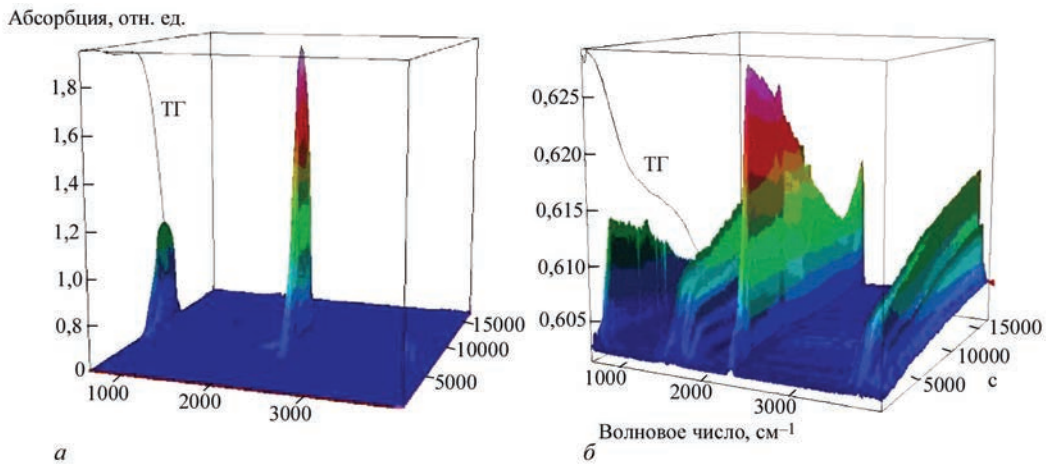


Рис. 3. ИК-спектры газов, образующихся при прокалке антрацита на воздухе (а) и в аргоне (б)

зависимости от природы источника. Основные характеристики спектра ИК-поглощения — число полос поглощения в спектре, их положение, определяемое длиной волны (или частотой), ширина и форма полос, величина поглощения, которые определяются природой (структурой и химсоставом) поглощенного вещества. Следует особо отметить, что идентификация ИК-спектров вообще и газовой фазы, образующейся при нагревании образцов антрацита в аргоне, представляет наиболее сложную аналитическую задачу. Для расшифровки ИК-спектрограммы использовали банк данных ИК-спектров Национального института стандартов США. ИК-спектры газов, выделяющихся при нагревании навесок антрацита на воздухе и в аргоне, приведены на рис. 3, а, б.

ИК-спектры представлены в трехмерных координатах: волновое число (см^{-1}); время нагревания (с); абсорбция (отн. ед.).

Для сравнения приведены следы изменения веса (ТГ) слева по временной шкале. В ИК-спектре газов из антрацита при нагревании на воздухе (рис. 3, а) имеется два пика, а в ИК-спектре нагревания антрацита в аргоне их свыше 5. Следует иметь ввиду, что этим методом нельзя идентифицировать наличие водорода и некоторых других газов, поскольку они не имеют колебательных частот в ИК-диапазоне. Вместе с тем разделение органических молекул (включая изомеры) является одним из преимуществ ИК-спектроскопии.

ИК-спектрограммы и составы газов при пиролизе летучих, выделяющихся из антрацита при нагреве его на воздухе и в аргоне, представлены на рис. 4.

Как следует из экспериментальных данных, в составе газов не было обнаружено сколько-нибудь значительного количества СО или метана, даже при нагревании в аргоне (рис. 4, б), хотя спектры СО и CH_4 существенно отличаются от спектров

CO_2 , H_2O и других газов. В составе газов не обнаружено следов органических соединений, а также соединений азота, серы, других газов, кроме CO_2 и H_2O . При нагревании антрацита на воздухе интенсивность поглощения CO_2 доминирует над интенсивностью поглощения H_2O , тогда как при нагревании в аргоне их интенсивности близки.

Следует отметить, что спектрограммы CO_2 и H_2O (верхняя часть на рис. 4) получены по данным банка ИК-спектров, а внизу рисунков — экс-

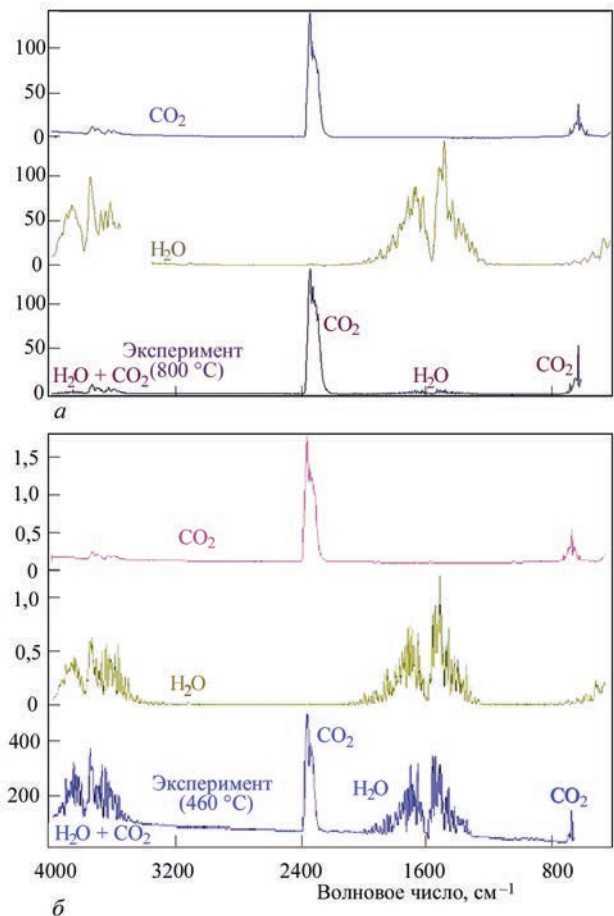


Рис. 4. ИК-спектрограммы газов, образующиеся при прокалке антрацита на воздухе (а) и в аргоне (б)

периментально для 800 °С (рис. 4, а) и 460 °С (рис. 4, б). Поскольку ИК-метод характеризуется высокой чувствительностью к органическим соединениям, полное отсутствие летучих в спектрах этих соединений можно пояснить только полным превращением их в CO₂ и H₂O. Выделение летучих веществ в условиях прибора сопровождалось быстрым их пиролизом или конверсией с образованием водорода (который не регистрируется в спектре), а также CO₂ и H₂O, но не CO.

Постоянное присутствие в газовой фазе CO₂ и H₂O при нагревании антрацита в аргоне продолжалось вплоть до 1400 °С. Результаты исследований использованы для уточнения теплофизической модели прокали антрацита в электрокальцинаторе [5].

Зависимость размеров кристаллитов от температуры. Задача получения корреляционных зависимостей основных физических свойств термоантрацита (размера кристаллитов, плотности, электропроводности, теплопроводности и теплоемкости) от температуры и времени для разработки адекватной модели электрических и температурно-временных режимов электрокальцинации антрацита является актуальной. В исследованиях авторов работы [6] размеры кристаллитов аппроксимированы уравнением объемной диффузии, которое применяется при анализе процессов роста зерен при спекании, горячем прессовании, горячем изостатическом прессовании. Применяв этот подход, получена следующая зависимость среднего размера кристаллитов L_0 (нм) термоантрацита в зависимости от температуры T (К) и продолжительности изотермической выдержки τ (с):

$$L = \sqrt[3]{(L_0)^3 + \int_0^\tau C_1 \exp\left(-\frac{C_2}{T(\tau)} d\tau\right)}, \quad (4)$$

где C_1 и C_2 — константы.

Статистической обработкой данных по уравнению (4) получены значения констант $C_1 = 3928464$ и $C_2 = -45985,4$ при $L_0 = 5$ нм. Значениям этих коэффициентов соответствует кажущаяся энергия активации роста кристаллитов равная 382 кДж/моль. Исходя из физической сущности процессов роста кристаллитов, энергия активации этих процессов с увеличением температуры должна увеличиваться. В исследованиях авторов работы [7], изучавших кинетику прокали антрацита, установлено, что с ростом температуры от 1400 до 1600 °С повышаются энергии активации движения границ кристаллов $E_{д.г.}$ и удаления летучих веществ $E_{д.в.}$.

При температурах 1400, 1500 и 1600 °С $E_{д.г.}$ (кДж/моль) составляет 395,0, 418,8 и 438,0, а $E_{д.в.}$ (кДж/моль) — 307,6, 323,9 и 340,6 соответствен-

но. Следует отметить, что отношение $E_{д.г.}/E_{д.в.}$ остается практически постоянным и равным 1,284, 1,292 и 1,285 соответственно приведенным температурам.

Анализ данных [6] свидетельствует, что при термообработке антрацита до температур 1600...1700 °С степень его графитации изменяется незначительно, в основном удаляются летучие вещества и повышается его плотность. Зависимость плотности термоантрацита, прокаленного в широком температурном интервале (400...2400 °С), аппроксимирована полиномом 8-й степени как наиболее достоверно дающим реальные значения плотности и описывается выражением:

$$d = \sum_{i=0}^8 b_i T_i, \quad (5)$$

где d — плотность, г/см³; b_i — коэффициент регрессии; T — температура, °С.

Ниже 400 °С плотность предполагается практически постоянной — 1,38...1,40 г/см³.

Авторы работы [3] измеряли плотность термоантрацита при комнатной температуре, хотя для моделирования процесса электрокальцинации антрацита необходимы знания его плотности при температурах термообработки. В настоящей работе скорректирована плотность термоантрацита с учетом величины термического расширения и получено следующее выражение:

$$\bar{d} = \frac{d(T)}{T} \frac{1 + 3 \int_{T_0}^T \alpha(T) dT}{T}, \quad (6)$$

где α — средний коэффициент термического расширения, 1/К.

Приведенные в табл. 1 скорректированные значения коэффициентов в уравнении (5) для плотности \bar{d} справедливы в интервале температур 400...2400 °С.

Зависимость электропроводности термоантрацита от температуры. Электропроводность антрацита, термически обработанного при различных температурах, является одной из важнейших его характеристик и, в основном, определяет качество термоантрацита [8].

Графическая взаимосвязь плотности термоантрацита от температуры представлена на рис. 5.

На электропроводность антрацита существенное влияние оказывают много факторов: размер кристаллитов, плотность, температура, продолжительность изотермической выдержки при термической обработке антрацита, давление, содержание золы и др. В настоящем исследовании

Таблица 1. Численные значения коэффициентов полиномов согласно уравнениям (5) и (6)

Коэффициент b_i	Значение d	Значение (\bar{d}) , скорректированное
b_0	0	0
b_1	$1,8552 \cdot 10^{-2}$	$1,8450 \cdot 10^{-2}$
b_2	$-8,7383 \cdot 10^{-5}$	$-8,6803 \cdot 10^{-5}$
b_3	$2,0133 \cdot 10^{-7}$	$1,9969 \cdot 10^{-7}$
b_4	$-2,5351 \cdot 10^{-10}$	$-2,5114 \cdot 10^{-10}$
b_5	$1,8451 \cdot 10^{-13}$	$1,8256 \cdot 10^{-13}$
b_6	$-7,7582 \cdot 10^{-17}$	$-7,6647 \cdot 10^{-17}$
b_7	$1,75036 \cdot 10^{-20}$	$1,7263 \cdot 10^{-20}$
b_8	$-1,6403 \cdot 10^{-24}$	$-1,6147 \cdot 10^{-24}$

Таблица 2. Сравнение корреляционных параметров для электропроводности термоантрацита по данным [6] и настоящего исследования

Параметр в уравнении (7)	Данные источника	Данные настоящего исследования
b	76 мин ⁻¹	55,7025 с ⁻¹
n	0,087	0,08855
E , кДж/моль	340	336,9267

определена функциональная зависимость электропроводности термоантрацита от температуры и времени обработки для проверки гипотезы авторов [6] о величине и постоянстве энергии активации процесса. Экспериментальные данные удельной электропроводности (УЭП) термоантрацита аппроксимируются уравнением:

$$\sigma = b\tau^n \exp\left[-\frac{nE}{RT}\right], \quad (7)$$

где b , n — постоянные; τ — время изотермической выдержки; E — энергия активации; T — температура, К; R — универсальная газовая постоянная.

Проведенный многофакторный анализ показал, что результаты коррелируются с данными авторов работы [6], приведенными в табл. 2 и на рис. 6.

Таким образом, именно кинетика роста кристаллитов и, как следствие их размеры, является определяющим фактором увеличения/снижения удельной электропроводности термоантрацита.

Зависимость теплопроводности термоантрацита от температуры. Теплопроводность графита, антрацита и других углеродных материалов существенно зависит от ряда факторов: размера кристаллов, плотности, зольности, анизотропии и др. Наилучшая корреляция получена в виде зависимости теплопроводности, как функции температуры и плотности, и представлена выражением:

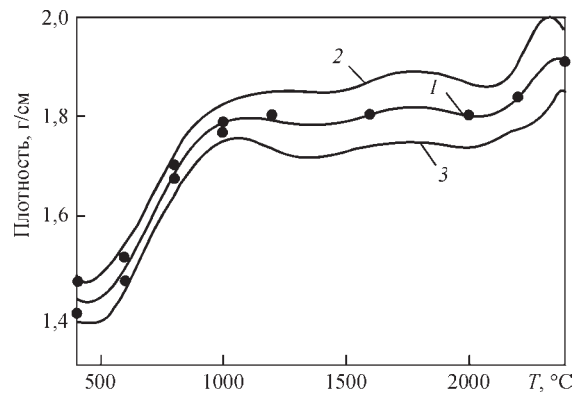


Рис. 5. Влияние температуры кальцинации на плотность термоантрацита: 1 — эксперимент; 2 — регрессия; 3 — доверительный интервал

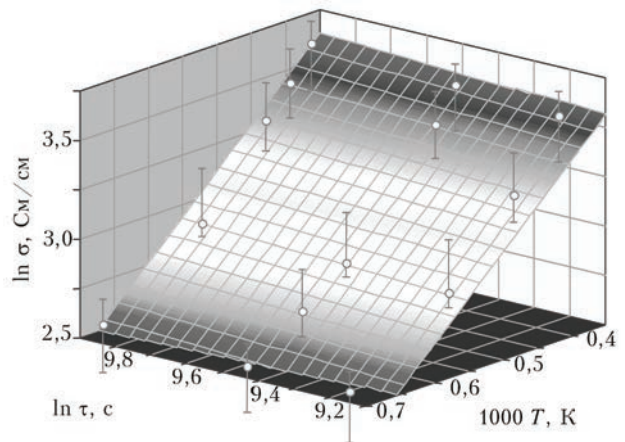


Рис. 6. Корреляция между электропроводностью, временем изотермической выдержки и температурой прокаливания антрацита

$$\ln(\lambda) = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 T + \alpha_3 T^2 + \alpha_4 \ln d}{1 + \alpha_5 T + \alpha_7 \ln d}, \quad (8)$$

где T — температура, °С; d — плотность, г/см³; α_i — коэффициенты регрессии (табл. 3, рис. 7).

Учитывая, что теплопроводность существенно зависит от размеров кристаллитов, при обработ-

Таблица 3. Параметры регрессии (8) для зависимости теплопроводности термоантрацита от температуры и плотности графита

Коэффициент регрессии, α_i	Значение коэффициента регрессии
α_1	3,8187289
α_2	$2,6100352 \cdot 10^{-4}$
α_3	$-5,2057233 \cdot 10^{-7}$
α_4	3,0053159
α_5	$4,3240608 \cdot 10^{-4}$
α_6	$-2,130885 \cdot 10^{-7}$
α_7	0,17214518

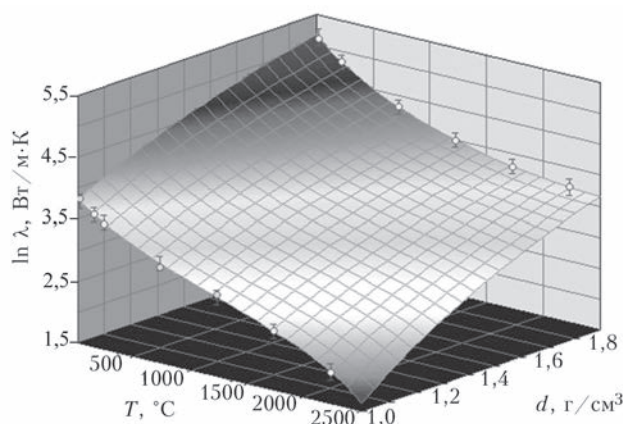


Рис. 7. Корреляция между теплопроводностью, плотностью и температурой прокаливания антрацита

ке дополнительных экспериментальных данных получена корреляционная зависимость теплопроводности от размеров кристаллитов в температурном интервале 20...100 °С:

$$\ln(\lambda) = m_1 + m_2 \exp(-T) + m_3 \sqrt{\ln(L)} \ln[\ln(L)] + \frac{m_4}{\sqrt{\ln(L)}} + m_5 / (L), \quad (9)$$

где L — размер кристаллитов, нм (по уравнению 4); T — температура измерения теплопроводности (интервал 20...100 °С); m_i — коэффициенты регрессии (табл. 4).

Поскольку в данном случае теплопроводность и плотность при высоких температурах требует уточнения, экстраполяция уравнения (9) на условия электрокальцинации, по-видимому, неправомерна. Поэтому в дальнейшем при моделировании процесса электрокальцинации антрацита было использовано уравнение (8). С целью упрощения расчетов теплопроводности значения плотности в уравнении (8) могут быть определены как функция температуры согласно уравнению (5) и тогда эффективную теплопроводность можно аппроксимировать выражением:

$$\lambda(T) = -7,7615 \cdot 10^{-9} T^3 + 3,8103 \cdot 10^{-5} T^2 - 6,8126 \cdot 10^{-2} T + 86,908. \quad (10)$$

Полученные корреляционные зависимости физических свойств термоантрацита использованы для разработки математической модели технологических режимов высокотемпературной прокалики антрацита в электрокальцинаторе [9].

Выводы

1. Выполнены исследования процесса высокотемпературной прокалики антрацита как базового углеродсодержащего компонента в технологии

Таблица 4. Параметры регрессии для зависимости теплопроводности от температуры и размера кристаллитов

Коэффициент регрессии, m_i	Значение
m_1	-33,256255
m_2	-1,2372886 · 10 ⁸
m_3	3,5660152
m_4	60,149114
m_5	-67,462952

формирования непрерывных самообжигающихся электродов.

2. С применением методов динамической гравиметрии и анализа летучих компонентов в газовой фазе ИК-спектроскопией определены энергии активации диффузионных процессов окисления антрацита, формирования и роста кристаллитов. На основании экспериментальных данных получены регрессионные уравнения, отражающие влияние температурного режима на прочность, теплопроводность и электропроводность термоантрацита.

3. Результаты исследований применяются для моделирования теплофизических процессов прокалики антрацита с целью обоснования рациональной технологии производства термоантрацита.

Список литературы

1. Гасик М.И. (1984) *Электроды рудовосстановительных печей*. Москва, Металлургия.
2. Штах Э., Маковски М.-Т., Тейхмюллер М. и др. (1978) *Петрология углей*. Еремин И.В. и Гречишников Н.П. (ред.). Москва, Мир.
3. Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С., Должанская Ю.Б. и др. (2002) Антрациты: Запасы. Добыча. Свойства. Использование. *Кокс и химия*, 12, 2–8.
4. Гасик М.М., Гасик М.И., Уразлина О.Ю., Кутузов С.В. (2006) Прецизионные термокинетические исследования превращений в донецком антраците при прокалике его на воздухе и аргоне в интервале 100...1400 °С. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 1, 26–30.
5. Гасик М.М., Гасик М.И., Петров Б.Ф. и др. (2006) Компьютерное моделирование и опытно-промышленное освоение технологии одностадийной прокалики антрацита в электрокальцинаторе. *Там же*, 3, 27–30.
6. Brandtzag S.R., Linda H., Oye H.A. (1983) Structural changes in graphite by heat treatment. *Light metals. Proc. Techn. Ses. 112 AIME Annu. Meet., Atlanta, March 6–10, 1983*, pp. 711–725.
7. Pusz S., Kwiecinska B.K., Duber S. (2003) Textural transformation of thermally treated anthracites. *Int. J. Coal Geol.*, 1–2, 115–123.
8. Лакомский В.И., Кутузов С.В. (2006) О температурной зависимости электросопротивления термоантрацита. *Современная электрометаллургия*, 1, 41–44.
9. Гасик М.М., Гасик М.И., Уразлина О.Ю. (2004) Моделирование термического и электрического режимов работы электрокальцинатора при термической обработке термо-

антрацита. *Металургическая и горнорудная промышленность*, **5**, 18–23.

References

1. Gasik, M.I. (1984) *Electrodes of ore reduction furnaces*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Stach, E., Mackowsky, M.-Th., Teichmüller, M. et al. (1978) *Coal petrology*. Ed. I.V. Eremin, N.P. Grechishnikov. Moscow, Mir [in Russian].
3. Drozdник, I.D., Kaftan, Yu.S., Dolzhanskaya, Yu.B. et al. (2002) Anthracite: Reserves. Production. Properties. Application. *Koks i Khimiya*, **12**, 2–8 [in Russian].
4. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Urazlina, O.Yu., Kutuzov, S.V. (2006) Precision thermokinetic studies of transformations in Donetsk anthracite when it is calcined in air and argon in the range of 100–1400 °C. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **1**, 26–30 [in Russian].
5. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Petrov, B.F. et al. (2006) Computer modeling and pilot development of the technology of one-stage calcination of anthracite in an electrocalciner. *Ibid.*, **3**, 27–30 [in Russian].
6. Brandtzag, S.R., Linda, H., Oye, H.A. (1983) Structural changes in graphite by heat treatment. *Light Metals*. In: *Proc. Techn. Ses. 112 AIME Annu. Meet. (March 6–10, 1983, Atlanta)*, 711–725.
7. Pusz, S., Kwiecinska, B.K., Duber, S. (2003) Textural transformation of thermally treated anthracites. *Int. J. Coal Geol.* **1–2**, 115–123.
8. Lakomsky, V.I., Kutuzov, S.V. (2006) On temperature dependence of thermoanthracite electrical resistance. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 35–37.
9. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Urazlina, O.Yu. (2004) Modeling of the thermal and electric modes of operation of the electrocalciner during the thermal treatment of thermoanthracite. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 18–23 [in Russian].

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПРОКАЛКИ ТЕРМОАНТРАЦИТУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БЕЗПЕРЕРВНИХ САМОВИПАЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ РУДОВІДНОВНИХ ПЕЧЕЙ

С.В. Кутузов¹, В.В. Деркач¹, М.І. Гасик², А.П. Горобець², М.М. Гасик³

¹ПАТ «Український графіт». 69600, м. Запоріжжя, вул. Північне шосе, 20. E-mail: tehnology@ukrgrafit.com.ua

²Національна металургійна академія України. 49000, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

³Аалто університет. Фінляндія, Еспо, РО BOX 11000 FI-00076. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

Розглянуто процес графітації антрациту як вуглецевого компоненту самовипалювальних електродів. Проведено експериментальні дослідження фізичних властивостей термоантрациту методами термогравіметрії та ІЧ-спектроскопії в температурному інтервалі 400...1400 °С. Створено регресивні моделі взаємозв'язку будови термоантрациту, показника міцності, теплопровідності і питомого опору з температурним режимом прокалки антрациту. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: термоантрацит; самовипалювальні електроди; теплофізичні характеристики; динамічна термогравіметрія; ІЧ-спектроскопія; кристаліти; щільність; електропровідність; фазовий склад

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THERMOANTHRACITE CALCINATION MODES FOR THE PRODUCTION OF CONTINUOUS SELF-BAKING ELECTRODES FOR ORE REDUCING FURNACES

S.V. Kutuzov¹, V.V. Derkach¹, M.I. Gasik², A.P. Gorobets², M.M. Gasik³

¹Private Joint Stock Company Ukrainian Graphite.

20 Northern Highway, 69600, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: tehnology@ukrgrafit.com.ua

²National Metallurgical Academy of Ukraine.

4 Gagarina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: tehnosplavy@ua.fm

³Aalto University. Finland, Espoo, PO BOX 11000 FI-00076. E-mail: michael.gasik@aalto.fi

The process of graphitization of anthracite as a carbon component of self-baking electrodes is considered. Experimental studies of the physical properties of thermoanthracite by thermogravimetry and IR spectroscopy in the temperature range 400...1400 °C were performed. Regression models of the relationship between the structure of thermoanthracite, strength, thermal conductivity and resistivity and the temperature regime of anthracite calcination were created. Ref. 9, Tabl. 4, Fig. 7.

Key words: thermoanthracite; self-baking electrodes; thermophysical characteristics; dynamic thermogravimetry; IR spectroscopy; crystallites; density; electrical conductivity; phase composition

Поступила в редакцію 11.02.2020



ЖУРНАЛИ для професіоналів

(380-44) 200-8277

journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com