



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. V. Kostanovskii, M. G. Zeodinov, M. E. Kostanovskaya, A. A. Pronkin, Influence of heating temperature on the electrical resistivity of pyrolytic graphite, *TVT*, 2020, Volume 58, Issue 4, 732–734

DOI: 10.31857/S0040364420040080

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.91

February 10, 2025, 20:00:33



УДК 537.311.3

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА

© 2020 г. А. В. Костановский<sup>1</sup>, \*, М. Г. Зеодинов<sup>1</sup>, М. Е. Костановская<sup>1</sup>, А. А. Пронкин<sup>1</sup><sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*E-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Поступило в редакцию 18.12.2019 г.

После доработки 21.02.2020 г.

Принято к публикации 10.03.2020 г.

Исследовано влияние температуры нагрева на удельное электрическое сопротивление пиролитического графита марки УПВ-1 в диапазоне  $T = 2500\text{--}3000$  К. Показано, что при нагреве до  $T = 2700$  К температурная зависимость электрического сопротивления совпадает со справочными данными, при нагреве до  $T = 3000$  К становится подобной зависимости для монокристалла.

DOI: 10.31857/S0040364420040080

### ВВЕДЕНИЕ

Для пиролитического графита (ПГ) характерна резко выраженная анизотропия значений удельного электрического сопротивления. Удельное электрическое сопротивление ПГ параллельно  $r^a$  и перпендикулярно  $r^c$  плоскости осаждения определено в работе [1] в области температур  $T = 500\text{--}1700$  К. Зависимости  $r^a(T)$  и  $r^c(T)$  от температуры отечественных марок ПГ УПВ-1 и УПВ-1Т приведены в справочном издании [2], но ограничены максимальным значением температуры 2500 К. Без указания марки для отечественного ПГ определены температурные зависимости  $r^a(T)$  при  $T = 300\text{--}2000$  К и  $r^c(T)$  при  $T = 300\text{--}1800$  К в работах [3, 4]. Следует отметить, что ПГ за рубежом [1, 5] и в нашей стране изучался с середины прошлого века, однако свойства данного материала не исследованы достаточно.

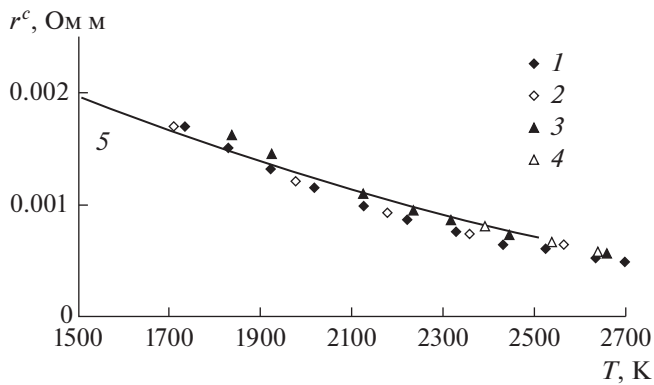
Цель данной работы состоит в изучении влияния температуры нагрева на зависимость  $r^c(T)$  ПГ марки УПВ-1 для диапазона  $T = 2500\text{--}3000$  К.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

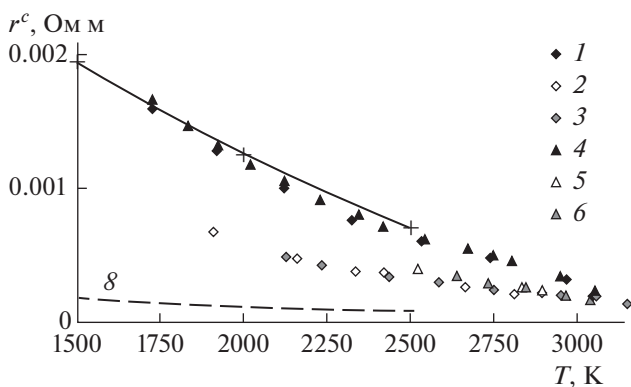
Образцы ПГ УПВ-1 были изготовлены в АО «НИИГРАФИТ» методом термического разложения газообразных углеводородов и осаждения углерода на нагретую поверхность. Исследовались образцы плотностью  $2.15$  г/см<sup>3</sup>. Экспериментальный образец общей длиной  $76$  мм представлял собой сборку из пяти прижатых друг к другу полых цилиндров ПГ длиной  $6.0$  мм каждый, диаметрами  $D/d = 10.96/3.1$  и  $10.96/4.09$  мм и двух боковых втулок, выполненных из графита марки МПГ-7, длиной  $23$  мм. Ось цилиндров совпадала с  $c$ -направлением ПГ. Указанный вариант

сборки позволил получить в центральной части образца изотермический участок длиной не менее  $16$  мм. В центре изотермического участка перпендикулярно оси в центральном кольце изготовлено отверстие диаметром  $0.5$  мм и длиной, равной толщине стенки цилиндра. Данное отверстие и внутренняя полость экспериментального образца имитировали модель абсолютно черного тела (АЧТ). Измерение температуры внутренней поверхности цилиндра с использованием модели АЧТ проводилось через окно камеры оптическим автоматическим микропирометром с диаметром пятна визирования  $0.3$  мм, который работал на длине волны  $0.65$  мкм. При определении действительной температуры вводилась поправка на поглощение в стекле окна камеры. Степень совершенства модели АЧТ рассчитывалась с помощью решения [6], при этом внутренняя поверхность образца рассматривалась как изотермическая трубчатая модель с открытыми концами и отверстием в центре боковой поверхности с диффузным отражением от стенок и относительной длиной  $l/r = 30/1.55 = 19.35$  и  $l/r = 30/2 = 15$ . Нормальная эффективная излучательная способность данной модели оценена в  $0.99$ . В двух кольцах, прилегающих к центральному кольцу, в центре боковой поверхности перпендикулярно продольной оси просверлены два отверстия диаметром  $0.5$  мм, которые использовались для установки точечных потенциальных зондов — проволочек из вольфрама диаметром  $0.138$  мм. Принципиальная схема установки приведена в [7].

Нагрев образца осуществлялся постоянным электрическим током. В процессе эксперимента использовалась специальная программа, которая обеспечивала скорость изменения температуры в режимах нагрева и охлаждения  $\sim 1$  К/с и контро-



**Рис. 1.** Зависимость  $r^c(T)$  при первом нагреве (1, 3) и последующем охлаждении (2, 4): 1, 2 – образец  $D/d = 10.96/3.1$  мм; 3, 4 –  $D/d = 10.96/4.1$  мм; 5 – справочные данные [2].



**Рис. 2.** Зависимость  $r^c(T)$  при первом нагреве (1, 4), последующем охлаждении (2, 5) и повторном нагреве (3, 6): 1–3 – образец  $D/d = 10.96/3.1$  мм; 4–6 –  $D/d = 10.96/4.1$  мм; 7 – ПГ марки УПВ-1 [2], 8 – квазимоноткристалл ПГ марки УПВ-1Г [2].

лировала подводимую к образцу мощность (силу тока  $I$  и падение напряжения  $U$  между зондами) в стационарном режиме (время выдержки  $\sim 10$  мин) [8]. Действительное значение температуры внешней поверхности образца определялось с помощью закона Вина, измеренной яркостной температуры и справочных данных нормальной спектральной излучательной способности  $\epsilon$ -поверхности ПГ [6]. Среднеарифметическое значение действительных значений температуры внутренней и внешней поверхностей принималось за температуру отнесения  $T$  для удельного электрического сопротивления, которое рассчитывается по формуле

$$\rho^c = \frac{\pi U(D^2 - d^2)}{4Il_{\text{probe}}}$$

Здесь  $D$  и  $d$  – внешний и внутренний диаметры образцов ПГ,  $l_{\text{probe}}$  – расстояние между зондами.

Поправка на увеличение линейных размеров  $l_{\text{probe}}$  от температуры не вводилась, так как образец был достаточно жестко зажат между токоподводами и не имел возможности для свободного удлинения. Поправка на увеличение площади сечения ( $D^2 - d^2$ ) в результате линейного термического расширения не превышала 2% при 2500 К и на испарение материала за время эксперимента составляла  $\sim 1.5\%$ . Влияние термического расширения  $D$ ,  $d$  и испарения материала возрастало при повышении  $T$ , но воздействие данных эффектов частично взаимно компенсировалось. Оценка расширенной суммарной неопределенности удельного электрического сопротивления при  $T = 3000$  К показала  $r^c = 1.91 \times 10^{-4} \pm 0.12 \times 10^{-4}$  Ом м (нормальное распределение, коэффициент охвата  $k_p = 2$ ).

Полученные значения  $r^c(T)$  в диапазоне  $T = 1700$ – $3000$  К приведены на рис. 1 и 2, на которых видно, что  $r^c$  ПГ уменьшается с ростом  $T$ . Известно, что ПГ при повышении  $T$  благодаря исходно преимущественной ориентации кристаллитов имеет тенденцию к графитации, что проявляется в уменьшении  $r^c$  с ростом температуры [2, 9].

Проведенные эксперименты показали, что при увеличении температуры нагрева до 2500 и 2700 К (рис. 1) и последующем охлаждении имеет место воспроизводимость кривых  $r^c(T) = 5.2217 \times 10^{-10}T^2 - 3.5737 \times 10^{-6}T + 6.3245 \times 10^{-3}$  Ом м. Они совпадают со справочными величинами [2], верхняя температурная граница которых соответствует 2500 К. Однако нагрев до  $T = 3000$  К (рис. 2) приводит к уменьшению и нарушению зависимости  $r^c(T)$  по [2]. Новая температурная зависимость  $r^c(T)$  фиксируется в процессе охлаждения и воспроизводится при последующем нагреве. Интересно отметить, что уменьшение температуропроводности графита после нагрева до  $T = 3250$  К также наблюдается в процессе охлаждения [10]. Размеры образца не оказывают влияния на воспроизводимость указанных закономерностей  $r^c(T)$  (рис. 1, 2).

Причина возникновения новой зависимости  $r^c(T)$  после нагрева до 3000 К связана, по-видимому, с процессом более полной графитации. Структура материала состоит из малодефектных кристаллитов, которые представляют собой трехмерную упорядоченную область, имеющую параметры кристаллической решетки, близкие к параметрам ( $\sim 200$  нм) монокристалла графита [9].

Новая температурная зависимость  $r^c(T)$  (рис. 2), если аппроксимировать ее  $r^c(T) = -3.6189 \times 10^{-7}T + 1.2663 \times 10^{-3}$  линейной функцией, характеризуется угловым коэффициентом, величина которого совпадает с угловым коэффициентом зависимости  $r^c_{\text{моно}}(T)$  квазимоноткристалла (пирографит

марки УПВ-1Т) [2]. Однако сравнение значений  $r^c$  и  $r_{\text{моно}}^c$  [2] показывает, что процесс графитации в рассматриваемом эксперименте, по-видимому, не прошел полностью и для его реализации необходимо увеличение времени выдержки при  $T = 3000$  К или нагрев до более высоких значений  $T$  (рис. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В прикладном отношении основной вывод данной работы заключается в существенном изменении функциональной зависимости  $r^c(T)$  при нагреве до  $T \approx 3000$  К, что косвенно указывает на необходимость проведения дополнительных исследований теплопроводности [2] и излучательных характеристик [6] ПГ марки УПВ-1 в диапазоне  $T = 2500\text{--}3000$  К.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klein C.A. Electrical Properties of Pyrolytic Graphites // Rev. Modern Phys. 1962. V. 14. № 1. P. 56.
2. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Спр. / Под ред. Соседова В.П. М.: Металлургия, 1975. 333 с.
3. Чеховской В.Я., Петров В.А., Петрова И.И. Влияние температуры термообработки пирографита на его коэффициент теплопроводности и удельное электросопротивление // ТВТ. 1971. Т. 9. № 4. С. 851.
4. Петров В.А., Петрова И.И., Чеховской В.Я., Люкшин Е.Н. Удельное электросопротивление пирографита // ТВТ. 1971. Т. 9. № 2. С. 302.
5. Saha A.R., Banerjee P.K., Das A.K. On the Electrical Resistivities of Pyrolytic Graphite // Ind. J. Phys. 1970. V. 44. P. 438.
6. Латыев Л.Н., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. Излучательные свойства твердых материалов. Спр. / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974. 470 с.
7. Костановский А.В., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е. Теплопроводность и излучательная способность графита DE-24 при температурах 2300–3000 К // Измерительная техника. 2010. № 12. С. 38.
8. Костановский А.В., Пронкин А.А., Зеодинов М.Г., Костановская М.Е. Особенности омического нагрева силицированного карбида кремния при измерении удельного электрического сопротивления в области высоких температур // Приборы. 2018. № 6 (216). С. 25.
9. Шипков Н.Н., Костиков В.И., Непрошин Е.И., Демин А.В. Рекристаллизованный графит. М.: Металлургия, 1979. 182 с.
10. Taylor R.E. Considerations Concerning Thermal Transport Properties of Solids Measured by Transient Versus Steady-State Methods // 2nd Asian Thermophys. Prop. Conf. 1989. P. 551.