

ной стороны начинается почти одновременно с нагревом облучаемой поверхности (см. рис. 1, а).

При облучении титана (0,15 мм; 80 Дж/см²) максимальная температура, измеренная на воздухе, на 1000 К выше измеренной в среде аргона (соответственно 3000 и 2000 К) при одинаковых плотности энергии и динамике. Это является следствием горения титана на поверхности, так как уже при температуре 1100—1200 К титан поглощает до 30 % атомной доли кислорода.

Из осциллограммы импульса генерации лазера (кривая 1 на рис. 1, а—г) следует, что в его начальной стадии в течение около 100 мкс генерация имеет колебательный характер. На этой стадии лазерного нагрева температура облучаемой поверхности никеля, измеренная с временным разрешением 1 мкс, синхронно изменяется с периодом 10 мкс колебаний интенсивности излучения лазера (рис. 2).

Полученные данные характеризуют тепловое воздействие миллисекундных лазерных импульсов на некоторые металлы при облучении их в различных условиях, а также демонстрируют возможности фотоэмиссионного метода температурных измерений в экспериментальных исследованиях взаимодействия интенсивного лазерного излучения с твердым телом. Подобные измерения могут найти применение при изучении теплофизических свойств материалов, обработке

режимов лазерной сварки и в других технологических процессах.

Л и т е р а т у р а

1. **А. с. 463003 СССР.** Фотоэмиссионный способ измерения температуры / К. Н. Каспаров, Г. Д. Ивлев, И. Л. Григоршин // Бюл. изобрет. 1975. № 9.

2. **Kasparov K. N.** Heated body temperature measurement by spectrometry of photoelectrons // Meas. Sci. and Technol. 1998. V. 9. P. 1388—1399.

3. **Каспаров К. Н.** Фотоэмиссионные измерения температуры. Эффективная длина волны // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 34—38; **Kasparov K. N.** Photoelectric Emission Measurements of Temperature Effective // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 6. P. 578—584.

4. **Каспаров К. Н.** Фотоэмиссионные измерения температуры. Два подхода к определению методической погрешности // Измерительная техника. 2004. № 8. С. 62—66; **Kasparov K. N.** Photoemission Temperature Measurement. Two Approaches to the Determination of the Procedural Error // Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 8. P. 835—841.

Дата принятия 20.07.2010 г.

536.21.533.23

Теплопроводность и излучательная способность графита DE-24 при температурах 2300—3000 К

А. В. КОСТАНОВСКИЙ, М. Г. ЗЕОДИНОВ, М. Е. КОСТАНОВСКАЯ

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,
e-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Представлены результаты изучения свойств теплопереноса и радиационных свойств изостатического графита DE-24 в стационарном режиме в области температур 2300—3000 К. Теплопроводность и излучательные характеристики материала определяли методом двух цилиндров. Нагрев образца осуществляли пропусканием постоянного электрического тока.

Ключевые слова: температура, теплопроводность, излучательная способность, метод двух цилиндров.

The results of heat transfer and radiation properties study for graphite DE-24 at stationary conditions and temperature 2300—3000 K are presented. The thermal conductivity and emission characteristics of the material are determined by two cylinders method. The sample heating is carried out passage of a constant electric current.

Key words: temperature, thermal conductivity, emissivity, method of two cylinders.

Графит марки DE-24 используется в метрологических исследованиях в качестве материала высокотемпературных излучателей моделей абсолютно черного тела, а также ампул, заполненных металлом, для реализации первичных и вторичных эталонов на фазовых переходах [1—3]. Данные о теплопроводности и излучательной способности графита этой марки в области высоких температур в литературе отсутствуют.

Теплопроводность и излучательную способность графита в стационарных условиях изучали, как правило, при нагре-

ве электрическим током. Экспериментальные образцы представляли собой толстостенные полые цилиндры или сплошные стержни. При высоких температурах это неизбежно приводило к большим перепадам температуры по толщине стенки и, как следствие, к погрешности определения как температуры отнесения, так и теплопроводности.

Цель данной работы — исследование теплопроводности и излучательной способности изостатического графита марки DE-24 в области температур 2300—3000 К с применением тонкостенных цилиндрических образцов для реализа-

ции одномерного приближения поля температуры по радиусу.

Метод двух цилиндров с различной толщиной стенок, является одним из перспективных методов изучения теплофизических свойств материалов при высоких температурах и может быть реализован в двух вариантах: без внутренних источников теплоты и при их наличии. В первом случае с целью определения свойства электрических изоляторов в области температур 1300—2200 К [4] используют решение стационарного одномерного уравнения теплопроводности материала, свойства которого считают постоянными, во втором случае — стационарного одномерного уравнения теплопроводности в присутствии внутренних источников теплоты постоянной мощности [5], что позволяет исследовать электропроводящие материалы. В обоих вариантах метода предполагают, что теплота, подводимая к изотермическому участку каждого цилиндра, отводится излучением от внешней поверхности.

Второй вариант метода может быть реализован разными способами. Один из них основан на измерении действительной температуры внутренней поверхности каждого цилиндра, по которой численно определяют действительную температуру на внешней поверхности цилиндров T_{r2} [5]. Для нахождения теплового потока q_s с внешней поверхности используют закон Стефана — Больцмана $q_s = \epsilon_h^t \sigma T_{r2}^4$, где ϵ_h^t — интегральная полусферическая излучательная способность исследуемого вещества из [6]; σ — константа Стефана — Больцмана. Плотность теплового потока и перепад температуры по толщине стенки позволяют рассчитать теплопроводность материала [7]. Недостаток данного способа заключается в том, что значения интегральной полусферической излучательной способности могут отсутствовать для исследуемого материала или быть определены в других условиях, следовательно может снизиться точность определения теплопроводности. В другом способе предложено использовать дополнительно к температурным измерениям потенциальные зонды [4]. По измеренным значениям силы тока и падения напряжения на изотермическом участке рассчитывают плотность теплового потока. При этом теплопроводность и интегральная полусферическая излучательная способность материала определяются одновременно. Таким образом, точность измерения теплопроводности должна возрастать по сравнению с первым способом. Рассматриваемая модификация метода ранее не была реализована экспериментально.

Определение теплопроводности. Исходное дифференциальное уравнение для цилиндрического образца с изотермическими поверхностями в одномерном приближении и в предположении о постоянстве свойств материала и объемной мощности внутренних источников тепла q_v имеет вид

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

где k — теплопроводность; T — температура; r — текущий радиус цилиндра.

Аналитическое решение (1) для случая, когда теплота отводится через наружную поверхность цилиндра, записывается как

$$T = T_{r2} + (q_v r_2^2 / 4k) \left[1 + (r_1 / r_2)^2 2 \ln(r / r_2) - (r / r_2)^2 \right], \quad (2)$$

где r_1, r_2 — радиусы внутренней и внешней поверхностей, соответственно.

Если удельные тепловые потоки с поверхности двух образцов имеют одинаковое значение $(q_{r2})_{i=1} = (q_{r2})_{i=2} = q_s$, то $(T_{r2})_{i=1} = (T_{r2})_{i=2} = T_s$ ($r_2 = \text{idem}$). Тогда перепад температуры на первом $(\Delta T)_{i=1}$ и втором $(\Delta T)_{i=2}$ образцах

$$(\Delta T)_{i=1,2} = (T_{r1})_{i=1,2} - (T_{r2})_{i=1,2} = q_s A_{i=1,2} / k, \quad (3)$$

где $A_{i=1,2}$ — геометрические коэффициенты,

$$A_{i=1,2} = \frac{(r_2)_{i=1,2}}{2} \left[1 - \frac{2(r_1)_{i=1,2}^2}{(r_2)_{i=1,2}^2 - (r_1)_{i=1,2}^2} \ln(r_2 / r_1)_{i=1,2} \right]. \quad (4)$$

Решив совместно уравнения (2)—(4), можно найти теплопроводность и действительную температуру T_{r2} на внешней поверхности изотермического участка по выражениям

$$k = \frac{q_s (A_{i=1} - A_{i=2})}{(T_{r1})_{i=1} - (T_{r1})_{i=2}}; \quad (5)$$

$$(T_{r2})_{i=1,2} = (T_{r1})_{i=1,2} - q_s A_{i=1,2} / k. \quad (6)$$

Обработка экспериментальных данных сводится к построению кривых $q_s = f(T_{r1})$ для двух образцов. При одинаковых плотностях теплового потока $(q_{r2})_{i=1} = (q_{r2})_{i=2} = q_s$ определяют температуры $(T_{r1})_{i=1}, (T_{r1})_{i=2}$ и по (5), (6) рассчитывают теплопроводность и температуру T_{r2} .

Определение интегральной полусферической излучательной способности. В методе двух цилиндров предполагается, что вся подведенная электрическая мощность выделяется с внешней поверхности цилиндра в виде радиационного потока теплоты q_s . Из условия теплового баланса можно найти интегральную полусферическую излучательную способность материала по формуле

$$\epsilon_h^t = IU / (\sigma T_{r2}^4 \pi 2r_2 L), \quad (7)$$

где L — расстояние, на котором измеряются сила тока I и падение напряжения U .

Определение спектральной нормальной излучательной способности. Этот параметр ϵ_λ^n рассчитывают на основании закона Вина с использованием измеренных значений яркостной температуры внешней поверхности образца по нормали к ней и вычисленных по (6) значений действительной температуры:

$$\ln \epsilon_\lambda^n = 1,438 \cdot 10^{-2} \lambda^{-1} [T_{r2}^{-1} - T_{\text{ярк}}^{-1}],$$

где λ — длина волны излучения.

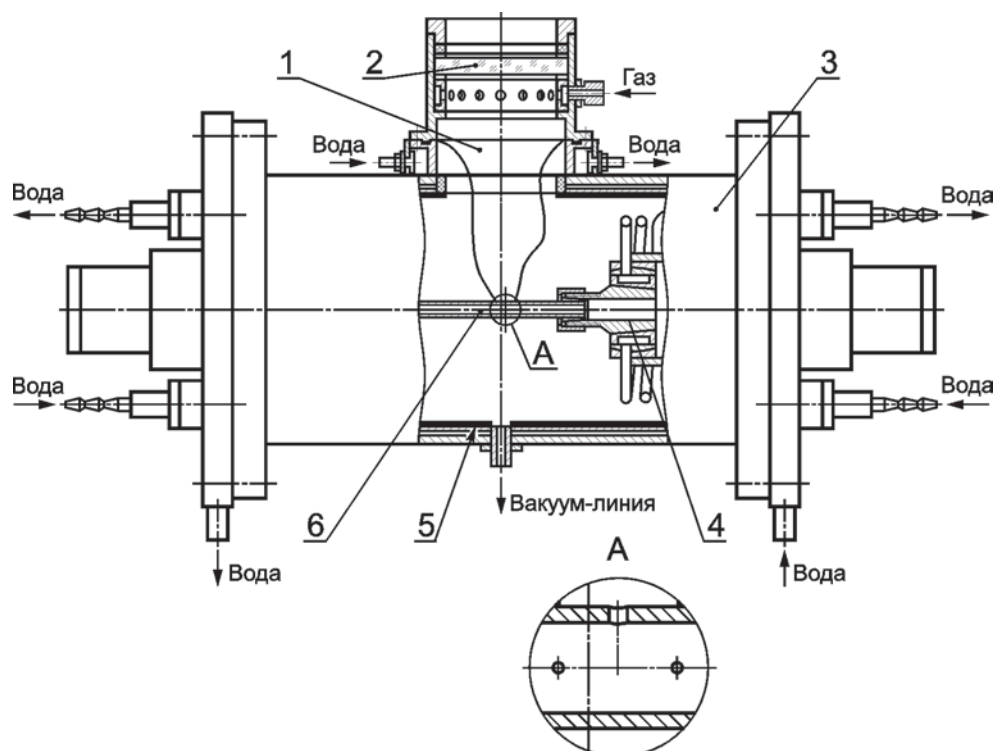


Рис. 1. Конструкция камеры и крепление экспериментального образца:

1 — водоохлаждаемый корпус смотрового окна; 2 — кварцевое стекло; 3 — корпус рабочей камеры; 4 — водоохлаждаемый токоподвод; 5 — покрытие (аквадаг); 6 — экспериментальный образец

Принципиальная схема установки. Основными элементами установки являются рабочая камера с экспериментальным образцом, система электрического нагрева, система температурных измерений и газовакуумная система. В качестве рабочей камеры служила газовакуумная водоохлаждаемая камера модели абсолютно черного тела [8]. К ее основным конструктивным элементам относятся медные водоохлаждаемые пружинные токоподводы, которые обеспечивают надежный электрический контакт и сводят к минимуму термические нагрузки, возникающие в образце. Смотровые окна камеры с внутренней стороны снабжены системой обдува буферным газом для минимизации их загрязнения.

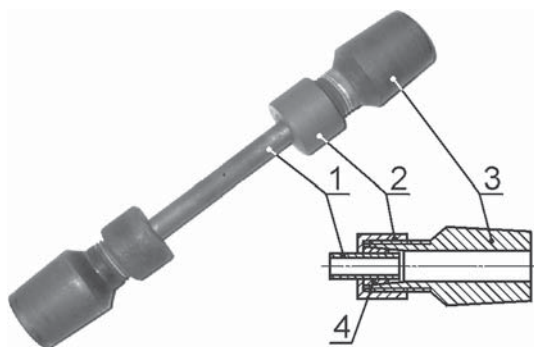


Рис. 2. Экспериментальный образец и схема его крепления:

1 — образец; 2, 3 — прижимная и конусная втулки; 4 — цанговая частично разрезная конусная втулка

Конструкция камеры была усовершенствована (рис. 1). Стекло (кварцевое марки КВ) смотрового окна установлено под небольшим углом $2\text{--}3^\circ$ к условному перпендикуляру к оси экспериментального образца. Это позволило исключить влияние взаимного отражения светового потока между образцом и окном на результаты измерения температуры. Конструкция фланца бокового смотрового окна, через которое осуществлялись температурные измерения, дополнена системой водяного охлаждения. Кроме того, внутренняя поверхность камеры и токоподводы покрыты аквадагом с целью создания диффузного характера отражения и уменьшения переотражения светового потока от элементов внутренней поверхности на экспериментальный образец.

Экспериментальный образец фиксировали двумя конусными втулками, каждую из которых устанавливали с одной стороны в водоохлаждаемом токоподводе. Образец закреплен в конусных втулках при помощи цанговых частично разрезных конусов и прижимных втулок, изготовленных также из графита (рис. 2). Такое соединение обеспечивало хороший электрический контакт соприкасающихся поверхностей и допускало перемещение исследуемого образца по длине и диаметру при его термическом расширении в процессе нагрева. Эта конструкция в сочетании с пружинными токоподводами позволила проводить эксперименты с образцами толщиной стенки около 1 мм, целостность которых сохранялась при высоких значениях температуры.

Экспериментальные образцы были изготовлены из графита марки DE-24. Исследуемый материал представлял собой изостатический мелкозернистый графит, наполнителем которого является кокс, а связующим — пек. Основные характеристики графита и содержание в нем примесей (результаты испытаний, проведенных в лаборатории АНЦЕРТЕКО) представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Характеристики графита DE-24 при комнатной температуре

Характеристика	Значение
Плотность, г/см ³	1,83
Открытая пористость, %	10
Средний размер зерна, мм	0,01
Температурный коэффициент линейного расширения в диапазоне $20\text{--}200^\circ\text{C}$, K^{-1}	$4,0 \cdot 10^{-6}$
Удельное электрическое сопротивление, мкОм · м	13
Теплопроводность, Вт/(м · К)	100
Температура отжига, К	3100

Содержание примесей (ppm) в графите DE-24

Al	B	Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V
< 0,01	0,2	< 0,02	< 0,02	2,0	< 0,06	< 0,01	0,5	3,0	1,0

Образцы представляли собой полые цилиндрические трубки длиной 80 мм и внешним диаметром 8,1 мм. Отношение внутреннего диаметра камеры к внешнему диаметру экспериментального образца более 10 (120 мм / 8,1 мм). Внутренние диаметры трубок 4,9; 5,5 и 5,9 мм. Все образцы были изготовлены из одной заготовки графита и вытачивались в направлении ее продольной оси.

Геометрические размеры образцов измеряли оптическим цифровым микроскопом марки ИМЦ100×50 с абсолютной погрешностью 5 мкм. При определении внешнего диаметра проводили несколько измерений по окружности одной «отметки», затем аналогичные измерения повторяли по всей длине трубки и полученные значения усредняли. Внутренний диаметр измеряли оптическим микроскопом на обоих концах каждой трубки в различных сечениях и затем также рассчитывали среднее значение.

В центре каждого образца было проделано отверстие для определения действительной температуры внутренней поверхности образца. Отверстие было совмещено с осью смотрового окна и расположено на центральной образующей образца. Потенциальные зонды находились на нижней образующей и отстояли на равном расстоянии от отверстия для измерения температуры.

Система нагрева образца и электрические измерения. Нагрев образца осуществляли постоянным электрическим током, который формировали из переменного тока сети напряжением 220 В с использованием схемы выпрямления, состоящей из диодного моста, собранного из диодов марки В200, фильтра суммарной электроемкостью 1,4 Ф и силового трансформатора ОСУ-40. Диодный мост был оборудован системой воздушного охлаждения. Падение напряжения на всей длине экспериментального образца и токоподводах устанавливали с помощью регулятора ВРТ-2 и усилителя У-252. Силу постоянного тока I измеряли бесконтактным способом с применением токовых клещей Актacom АТА-2502. Верхний предел измерения токовых клещей, при котором приведенная погрешность не превышала 2 %, составлял 1000 А. Падение напряжения U на участке L измеряли двумя «точечными» потенциальными зондами, представляющими вольфрамовую нить диаметром 0,26 мм, на конце которой формировали сферу. Потенциальные зонды вставляли в отверстие диаметром около 0,27 мм и выводили из камеры через боковое смотровое окно. Падение напряжения на участке L измеряли мультиметром В7-38 с погрешностью $\pm 0,06$ %. Значения силы тока и падения напряжения на участке L записывали на ЭВМ.

Система температурной диагностики состояла из двух пирометров, 12-разрядного 4-канального АЦП L-780 фирмы «L-Card» быстродействием 10 мкс и персонального компьютера. Температуру определяли двумя яркостными автоматическими спектральными микропирометрами. В состав каждого прибора входили пирометрическая головка с блоком питания и встроенный блок термической стабилизации приемника излучения. Длину волны ($\lambda = 0,65 \pm 0,01$ мкм) задавали с помощью узкополосного интерференционного фильтра, установленного перед приемником излучения, которым служил фотодиод ВТР-112. Градуировку пирометров выполняли с использованием модели абсолютно черного

тела [8], а также температурной лампы СИ-10-300 и оптического пирометра ЭОП-66, калиброванных в качестве образцовых средств измерений 2-го разряда по методике стандарта [9]. Диаметры пятен визирования пирометров для измерений внутренней и внешней поверхностей составляли 0,3 и 0,9 мм, соответственно.

Центральное отверстие и внутренняя полость изотермического участка позволяли имитировать модель абсолютно черного тела. Через это отверстие радиусом 0,5 мм измеряли температуру внутренней поверхности экспериментального образца. Излучательная способность данной модели, рассчитанная по методике Гюффе [10], составляла 0,9989 для цилиндра размерами $D/d = 8,1$ мм/5,9 мм; 0,9988 для образца $D/d = 8,1$ мм / 5,5 мм и 0,9986 для образца $D/d = 8,1$ мм/4,9 мм.

Яркостную температуру внешней поверхности измеряли также на центральной образующей цилиндра. При этом пятно визирования пирометра находилось от центрального отверстия на расстоянии не менее его 1,5 радиусов для измерения температуры внутренней поверхности. Это исключало влияние температурного возмущения от отверстия на измеряемую яркостную температуру [11].

Предварительные эксперименты.

1. Определили максимальное расстояние между зондами, при котором при одинаковой плотности теплового потока q_s , снимаемой с внешней поверхности образца на длине L , температура внутренней поверхности остается равной температуре, измеренной на более коротком участке. Затем дополнительно провели проверку выполнения условия $T = \text{const}$ на найденной таким образом длине L , для чего измеряли яркостную температуру на внешней поверхности. Такие эксперименты выполнены на образцах с различными внутренними диаметрами и при максимально высоких температурах. Установили оптимальные значения длины участка: $L = 8,0 \pm 0,5$ мм для цилиндра $D/d = 8,1/5,9$, $L = 7,0 \pm 0,5$ мм для цилиндра $D/d = 8,1/5,45$, $L = 6,25 \pm 0,5$ мм для цилиндра $D/d = 8,1/4,9$. Далее провели оценку справедливости предположения об одномерном приближении для поля температуры $L/R_v > 10$ [12]. Обобщенный размер $R_v = V/S$ (V — объем тела, S — его поверхность) [12], для образца $D/d = 8,1/5,9$ составил $R_v = 0,484$ мм, а отношение $L/R_v = 8,0$ мм / 0,484 мм = 16,5 (при комнатной температуре). Аналогичные оценки L/R_v для цилиндров $D/d = 8,1/5,5$ и $D/d = 8,1/4,9$ мм составляют соответственно 6,25/0,547 = 11,7 и 6,3/0,638 = 9,9. Полученные результаты позволили считать, что одномерное приближение температурного поля выполняется для всех цилиндров. Следовательно, метод двух цилиндров, основанный на одномерном уравнении теплопроводности, мог быть реализован при выбранных геометрии экспериментальных образцов и длине L .

2. Поправку на линейное тепловое расширение участка длиной L в процессе нагрева образца вводили на основании результатов специально проведенного опыта, так как изначально полагали, что экспериментальный образец был только частично разгружен канговыми конусами от действия пружинных токоподводов, и его удлинение нельзя считать сво-

бодным. Линейное расширение образца на участке L определяли по относительному удлинению расстояния между двумя отверстиями, использованными затем для крепления потенциальных зондов. Образец устанавливали так, чтобы ось каждого отверстия совмещалась с оптической осью пирометра. Перемещение пирометра осуществляли при помощи оптического микрометрического устройства с шагом 5 мкм. Это позволяло одновременно измерять расстояние между двумя отверстиями и действительную температуру внутренней поверхности образца. Таким образом, экспериментально находили зависимость относительного линейного удлинения участка L от действительной температуры внутренней поверхности $\Delta L/L = 2,221 \cdot 10^{-5} T_{r1} + 0,9653$ (для цилиндра $D/d = 8,1/5,9$). Максимальное относительное линейное удлинение участка $\Delta L/L$ при температуре около 3300 К не превышало 4 %, что совпадает с приведенным в [13] для графитов аналогичной плотности. Это совпадение позволяет считать, что воздействие на образец пружинных токоподводов незначительно, а основное влияние оказывает тепловое расширение. Результаты относительного удлинения участка L использовали при определении теплопроводности и интегральной полусферической излучательной способности.

3. Поправку на ослабление температуры T в стекле ΔT_{CT} рассчитывали по формуле [5]:

$$\Delta T_{CT} = AT^2 / (1 - AT).$$

Экспериментально установили значение коэффициента пирометрического ослабления $A = 4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ используемого стекла для длины волны $\lambda = 0,65$ мкм, который не зависит от температуры в диапазоне ее изменения.

4. Поправку на отражение от стенок камеры при определении спектральной нормальной излучательной способности определяли следующим образом. При наличии излучения, отраженного от стенок камеры, пирометр измеряет яркостную эффективную температуру внешней поверхности образца $T_{ярк}^{эфф}$ и яркостную $T_{ярк}$ температуру стенки камеры.

Для экспериментального определения температуры $T_{ярк}$ в образце недалеко от отверстия — модели черного тела — было просверлено сквозное отверстие, через которое визуировалась зачерненная внутренняя поверхность камеры [14].

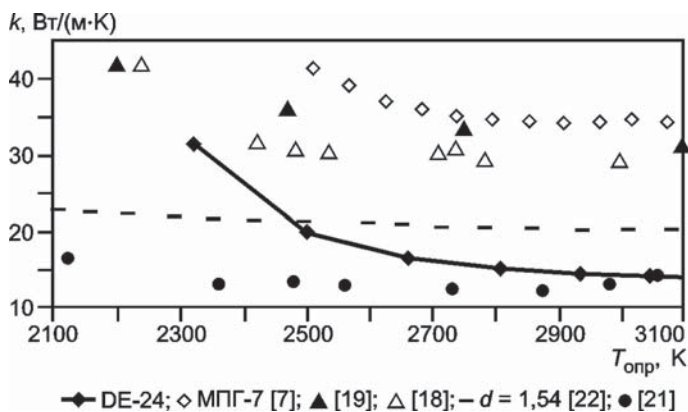


Рис. 3. Теплопроводность графита DE-24:

сравнение экспериментальных и литературных данных

С учетом отраженного излучения спектральную нормальную излучательную способность находили по формуле [15]:

$$\varepsilon_{\lambda}^n = \frac{J_{\lambda}(T_{ярк}^{эфф}) - J_{\lambda}(T_{ярк})}{J_{\lambda}(T_{r2}) - J_{\lambda}(T_{ярк})}, \quad (8)$$

где J_{λ} — спектральная интенсивность излучения при соответствующей температуре на длине волны 0,65 мкм.

Основной эксперимент. Реализация метода двух цилиндров включает в себя два самостоятельных эксперимента на образцах с разной толщиной стенок. Для каждого эксперимента заранее вакуумировали рабочую камеру, затем заполняли ее буферным газом (аргоном высокой чистоты) до давления $p = 0,15$ МПа. Предварительно отжигали образец при температуре 2300 К не менее 10 мин. Основной эксперимент осуществляли в режиме пошагового подъема подводимой к образцу электрической мощности с выдержкой во времени до момента наступления стационарного режима. Выполнение условия $dT/dt = 0$ определяли на основании двух измеренных локальных значений температуры: действительной внутренней поверхности образца и яркостной внешней поверхности. Для каждого стационарного режима фиксировали эти локальные значения, а также силу тока и падение напряжения. Перед каждым измерением температуры камеру продували аргоном для очистки поверхности стекла и оптического тракта от возможных продуктов испарения графита. Сигналы от пирометров, токовых клещей и значения падения напряжения, снимаемые с зондов, поступали в ЭВМ. Образец использовали однократно.

Теплопроводность, интегральную полусферическую и нормальную спектральную излучательные способности графита DE-24 определяли по формулам (5), (7), (8), соответственно. Основные результаты получили на нескольких образцах размерами $D/d = r_2/r_1 = 8,1 \text{ мм}/5,5 \text{ мм}$ и $8,1 \text{ мм}/5,9 \text{ мм}$. Воспроизводимость результатов дополнительно проверяли с применением образцов $r_2/r_1 = 8,1 \text{ мм}/4,9 \text{ мм}$. Определяющая температура найдена как среднее арифметическое значение между температурами внутренней и внешней поверхностей [11], при этом из двух образцов выбирали цилиндр с более тонкой стенкой.

Обсуждение результатов эксперимента. Изучение теплофизических свойств подавляющего большинства отечественных графитов ограничено максимальной температурой 2500 К [16]. Графит марки DE-24 ранее не исследовался, поэтому полученные результаты являются новыми на интервале температур 2300—3000 К.

Отметим, что в экспериментах максимальный перепад температуры по толщине стенки не превышал 200 К. Найденные значения теплопроводности графита DE-24 показали, что ее изменение не превышало 4 % в указанном интервале 200 К. Теплоемкость и плотность графитов также изменялись незначительно [17]. Таким образом, основные предположения, использованные при выводе уравнения (1), выполнялись.

Теплопроводность. На рис. 3 приведены результаты определения теплопроводности графита DE-24 в диапазоне температур 2300—3000 К и сравнение с литературными данными [7, 18, 19] для изотропных графитов плотностью 1,6—1,8 г/см³. Заметна общая тенденция — теплопроводность уменьшается с ростом температуры, что согласуется с

фононной моделью теплопроводности [20], однако численные значения существенно разнятся. Факторы, определяющие такой разброс результатов, анализировались ранее [13, 21]. Основные из них: сложность выполнения одномерного приближения для поля температуры, проблемы экспериментального измерения плотности теплового потока, трудность температурных измерений при высоких температурах, причем, в первую очередь, это касается действительной температуры внешней поверхности образца. Дополнительное влияние оказывает зависимость значений теплопроводности от исходного состава материала и условий его отжига. Тем не менее, из рис. 3 следует, что экспериментальные данные при температуре около 2300 К согласуются с результатами работ, полученными на относительно толстостенных образцах толщиной стенки 10 мм [18] и 18 мм [19] в сочетании с определением теплового потока проточным водяным калориметром. При температурах на уровне 3000 К результаты проведенного авторами эксперимента совпадают с данными [21, 22], в которых использовались стержни, нагреваемые электрическим током, причем их радиусы (4,33 и 3,13 мм [21]) были меньше толщины стенок образцов [18, 19]. По-видимому, применение полых цилиндров толщиной стенок 1,1–1,3 мм позволило выявить более сильную зависимость теплопроводности от температуры по сравнению с результатами [18, 19].

Надежность полученных значений теплопроводности обусловлена, в первую очередь, методическими аспектами. В данном исследовании впервые действительную температуру внешней поверхности образца не измеряли непосредственно, а находили по двум температурам, которые фиксировали в модели абсолютно черного тела. Как следствие, повысилась точность определения перепада температуры по толщине стенки. Применение тонкостенных образцов снижает перепад температуры, уточняет одномерное приближение для поля температуры и позволяет реализовать предположение о постоянстве свойств исследуемого материала. Сочетание температурных и электрических измерений обеспечивает возможность косвенной проверки корректности температурных измерений с помощью теплового баланса между подводимой электрической мощностью и тепловым потоком, снимаемым с внешней поверхности.

Излучательная способность. Экспериментальные значения интегральной полусферической и нормальной спектральной излучательных способностей графита DE-24 на длине волны $\lambda = 0,65$ мкм представлены на рис. 4, 5. Наблюдается согласование с литературными данными [5, 6]. Такой сравнительный анализ представляется достаточно корректным, так как многочисленные экспериментальные данные по радиационным свойствам графитов принято обобщать единой рекомендуемой зависимостью [6].

При температуре 2800 К получены относительные погрешности измерений теплопроводности 10 %, интегральной полусферической излучательной способности 9 %, спектральной нормальной излучательной способности 8 %.

Выводы. Метод двух цилиндров в представленной экспериментальной реализации позволил впервые определить комплекс свойств графита марки DE-24: теплопроводность, интегральную полусферическую и спектральную нормальную излучательные способности в области температур 2300–3000 К. Исследования выполняли на тонкостенных образцах и в идентичных условиях, что повышает точность и надежность полученных данных. Эксперимент проводили в стационарном режиме, т. е. в реальных условиях эксплуата-

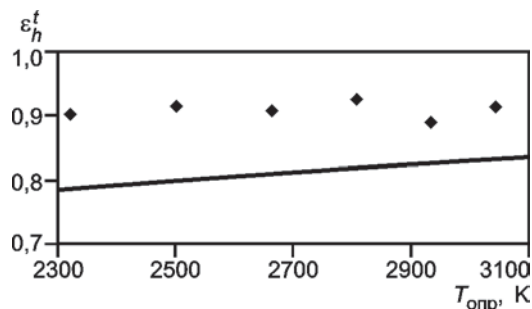


Рис. 4. Интегральная полусферическая излучательная способность графита марки DE-24 в зависимости от температуры: линия — рекомендуемые значения [6]; точки — экспериментальные данные

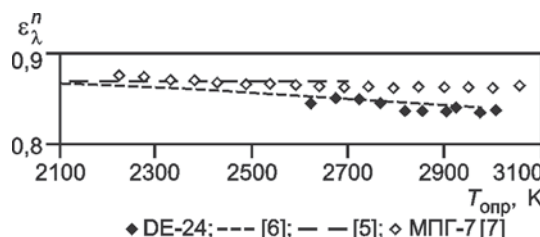


Рис. 5. Спектральная нормальная излучательная способность графита DE-24 на длине волны 0,65 мкм в зависимости от температуры:

сравнение экспериментальных (DE-24, МПГ-7) и рекомендуемых в [5, 6] данных

ции материала. Результаты могут найти применение в метрологической практике, например, при разработке высокотемпературных моделей абсолютно черных тел.

Л и т е р а т у р а

1. Сильд Ю. А. и др. Исследование нового излучателя ВНИИМ для метрологического обеспечения радиационной термометрии // Приборы. 2008. V. 100. № 10. С. 46–52.
2. Никоненко В. А. и др. Метрологическое обеспечение в радиационной термометрии: проблемы и их решения // Там же. С. 12–26.
3. Костановский А. В., Зеодинов М. Г., Костановская М. Е. Определение фиксированной температуры при использовании эвтектик металл–углерод // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 55–56; Kostanovskii A. V., Zeodinov M. G., Kostanovskaya M. E. The determination of a fixed point using a metal-carbon eutectic // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 6. P. 666–667.
4. Шульман А. Р., Федоров В. Н., Шепсенвол М. А. Теплопроводность окиси алюминия при высоких температурах // ЖТФ. 1952. V. 22. С. 1271–1280.
5. Петров В. А. Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969.
6. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
7. Костановский А. В., Зеодинов М. Г., Костановская М. Е. Определение теплопроводности и излучательной способности графита при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 5. С. 791–793.
8. Костановский А. В., Нефедкина Л. Б., Костановская М. Е. Высокотемпературная модель абсолютно черного тела // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. № 1. С. 122–128.

9. ГОСТ 8.558—93. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.

10. Gouffe A. Estimation of perfection of black body model // Rev. opt. 1945. V. 24. P. 1—9.

11. Пелецкий В. Э., Тимрот Д. Л., Воскресенский В. Ю. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел. М.: Энергия, 1971.

12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

13. Графит как высокотемпературный материал / Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.

14. Латыев Л. Н., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Экспериментальное определение излучательной способности вольфрама в видимой области спектра в диапазоне температур 1200—2600 К // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. № 4. С. 666—674.

15. Хрусталева Б. А., Раков А. М. // Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. М.: Наука, 1968. С. 280.

16. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В. П. Соседова. М.: Металлургия, 1975.

17. Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials / Ed. Y. S. Touloukian. N. Y.: Macmillan Company, London: Collier-Macmillan Ltd., 1967.

18. Bapat S. C., Nickel H. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of POCO Grade AXF-Q1 Graphite to 3300K // Carbon. 1973. V. 11. P. 323—327.

19. Rasor N. S., McClelland J. D. Thermal Property Measurements at Very High Temperatures // Rev. Sci. Instrum. 1960. V. 31. N 6. P. 595—603.

20. Лутков А. И. // Материалы V конф. по теплофизическим свойствам веществ. Киев: Наука, 1976.

21. Powell R. W., Schofield F. H. The Thermal and Electrical Conductivities of Carbon and Graphite to High Temperatures // Proc. Phys. Soc. 1939. V. 51. P. 153—172.

22. Strauss H. E. Studies of Thermal Conductivity of Polycrystalline Graphite at High Temperature // Proc. 4th Conf. Carbon. 1960. P. 473—480.

Дата принятия 15.04.2010 г.

518.6:536.6

Программная реализация методов диагностирования теплофизических свойств материалов

А. И. ФЕСЕНКО*, И. Н. ИЩУК**

* Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, e-mail: fesenkoai@rambler.ru

** Военный авиационный инженерный университет, Воронеж, Россия, e-mail: boerby@rambler.ru

Представлено решение прямой задачи теплопроводности при действии в плоскости контакта двух полуграниченных тел линейного импульсного источника тепла, полученное методом конечных разностей. Приведены результаты программной реализации и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: теплофизические свойства, разностные схемы, математическое моделирование.

The task solution by finite differences method of thermoconductivity at acting of two semibound bodies of linear pulsed heat source in contact plane is presented. The results of program realization and experimental studies are given.

Key words: thermophysical properties, difference schemes, mathematical modelling.

Переход к новой экономической системе в России предъявляет повышенные требования к технической диагностике сложных инженерных систем, контролю качества выпускаемой продукции, в связи с чем у производителей возрос интерес к недорогим, безопасным и простым в эксплуатации методам неразрушающего контроля.

Следует принять во внимание трагический итог эксплуатации системы «Space Shuttle»: из шести построенных космических аппаратов два потерпели техногенную катастрофу — «Челленджер» при запуске 28 января 1986 г. после десяти полетов и «Колумбия» при спуске с орбиты, что свидетельствует, в первую очередь, о низком уровне диагностики дефектов в межполетных периодах. Как показывает пред-

варительный анализ, одной из основных причин катастрофы космического аппарата «Колумбия» является нарушение теплоизоляционных характеристик наружной тепловой защиты при вхождении аппарата в атмосферу [1].

Развитие прикладной теплофизики и появление на рынке относительно недорогих средств измерений температуры дало новый толчок к применению теплового неразрушающего экспресс-контроля качества материалов, изделий и конструкций из них. К основным преимуществам теплового контроля можно отнести простоту аппаратной реализации, возможность контактного и бесконтактного измерений температуры, высокую производительность контроля с обработ-