

**Р. А. Миронов** (✉), к. ф.-м. н. **М. О. Забежайлов**, к. ф.-м. н. **С. П. Бородай**

ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск Калужской обл., Россия

УДК 666.762.11:66.085

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

По результатам измерения коэффициентов полного отражения от слоев различных толщин определены оптические параметры (показатели поглощения и рассеяния) алюмооксидной керамики в диапазоне длин волн 1–20 мкм. На основе полученных данных определена спектральная излучательная способность слоев материала произвольной толщины. По литературным данным о температурной зависимости показателя поглощения сапфира смоделирована температурная зависимость спектральной и интегральной излучательной способности алюмооксидной керамики. Полученные данные могут быть использованы в теплофизических расчетах.

Ключевые слова: частично прозрачная керамика, излучательная способность, алюмооксидная керамика, перенос тепла излучением.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря хорошим физико-механическим свойствам, химической устойчивости и относительно невысокой стоимости алюмооксидная керамика применяется в различных областях техники. Особенно актуально применение вакуум-плотной алюмооксидной керамики для создания металлокерамических узлов. Экстремальные температурные условия эксплуатации делают актуальной задачу нахождения теплофизических свойств материала. Одним из основных теплофизических параметров, характеризующих взаимодействие теплового излучения с материалом, является излучательная способность. Особенно важную роль тепловое излучение играет при переносе тепла в частично прозрачных материалах, к которым относится и алюмооксидная керамика. Для алюмооксидной керамики наблюдаются значительные расхождения в данных различных авторов по излучательной способности [1]. Подобные расхождения существенно затрудняют теплофизические расчеты конструкций из алюмооксидной керамики.

Традиционные методы определения интегральной полусферической излучательной способности — калориметрические. В их основе лежит вычисление величины теплового потока за счет излучения с поверхности материала при его одностороннем нагреве. При этом используются

данные о температурах в нескольких точках, полученные в рамках модельного эксперимента [2]. Однако в случае частично прозрачных материалов результат, полученный таким образом, становится зависимым от условий эксперимента из-за влияния переноса тепла излучением в объеме образца. Наиболее совершенный экспериментальный метод определения излучательной способности частично прозрачных материалов, основанный на равномерном нагреве образца по всему объему и отстреле печи нагревателя, представлен в работе [3], однако для его реализации требуется уникальное оборудование. Вышеуказанные трудности делают актуальной задачу исследования излучательных характеристик частично прозрачных материалов на основе оксида алюминия при помощи расчетно-экспериментальных методов, позволяющих исключить влияние ряда погрешностей и получить достоверный результат при отсутствии сложных испытательных стендов. Оптические параметры (показатели поглощения и рассеяния) представляют интерес для задач определения содержания примесей в материалах и моделирования радиационно-кондуктивного теплообмена в сложных конструкциях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [4] показано, что для нахождения оптических параметров могут быть использованы асимптотические формулы [5], которые получены в ходе изучения численных решений уравнений переноса излучения и представляют собой аналитические выражения, связывающие оптические параметры среды и коэффициенты диф-



Р. А. Миронов
E-mail: manarom@yandex.ru



фузного пропускания $T(X,Y)$ и отражения $R(X,Y)$ для плоскопараллельных слоев

$$T = \frac{\text{sh}(Y)}{\text{sh}(X+Y)}, R = \frac{\text{sh}(X)}{\text{sh}(X+Y)}, \quad (1)$$

где в X и Y содержится полная информация об оптических свойствах среды, включая оптические параметры. Показано [6, 7], что для их нахождения достаточно измерить коэффициенты диффузного отражения двух полупрозрачных слоев и параметр асимметрии индикатрисы рассеяния. Зная показатели поглощения и рассеяния, можно из уравнений (1) определить T и R слоев любой толщины, а из уравнения

$$T + R + A = 1 \quad (2)$$

определить коэффициент поглощения A , который согласно закону Кирхгофа при условии термодинамического равновесия равен излучательной способности ε .

По спектральной излучательной способности может быть рассчитана интегральная по формуле

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) d\lambda}, \quad (3)$$

где $\varepsilon(T)$ — интегральная излучательная способность; $\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральная излучательная способность; $B(\lambda, T)$ — спектральная плотность излучения абсолютно черного тела.

Как видно из формулы (3), задача вычисления температурной зависимости интегральной излучательной способности состоит в учете температурной зависимости спектральной излучательной способности, определяемой зависимостью от температуры оптических свойств материала, и температурного смещения излучения абсолютно черного тела.

Таким образом, задача нахождения оптических параметров материала (натуральных показателей поглощения и рассеяния) сводится к измерению спектров полного (полусферического) отражения при комнатной температуре для слоев нескольких толщин и решению коэффициентной обратной задачи переноса излучения, а вычисление спектральной излучательной способности при комнатной температуре — к решению прямой задачи переноса излучения в слое заданной толщины по известным оптическим параметрам среды.

Для определения коэффициентов полного отражения была использована алюмооксидная керамика, полученная горячим пластифицированным литьем на парафиновом связующем. Плотность керамики $3,75 \text{ г/см}^3$, пористость ну-

левая. Спектры полного отражения образцов измеряли в видимой области ($0,5\text{--}0,7 \text{ мкм}$) при помощи спектрометра СФ-14 и в ИК-диапазоне ($1\text{--}18 \text{ мкм}$) на Фурье-спектрометре Nicolet iS50 с интегрирующими сферами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На спектрах коэффициентов полного отражения для образцов различных толщин (рис. 1) видна область частичной прозрачности $0,5\text{--}5 \text{ мкм}$. В этой области полное отражение возрастает с увеличением толщины слоя материала.

Зависимость коэффициента полного отражения от толщины образца связана с диффузным отражением падающего излучения в объеме материала. При длинах волн больше 5 мкм образцы различных толщин практически не отличаются друг от друга, так как из-за поглощения в материале, из которого получена керамика, излучение проникает на незначительную глубину. Согласно [6] спектральная область частичной прозрачности может быть использована для определения оптических параметров материала — натуральных показателей поглощения и рассеяния (далее показатели поглощения и рассеяния).

На рис. 2 представлены результаты расчета показателей рассеяния и поглощения алюмооксидной керамики, для сравнения показан спектр сапфира по справочным данным [8].

Видно, что для алюмооксидной керамики существенное влияние показателя рассеяния наблюдается до 5 мкм , так как показатели поглощения и рассеяния сравнимы по величине. Согласно [8] показатель поглощения сапфира и других материалов на основе оксида алюминия увеличивается с ростом длины волны.

Температурное смещение показателя поглощения в области частичной прозрачности алюмооксидной керамики определяется в основном

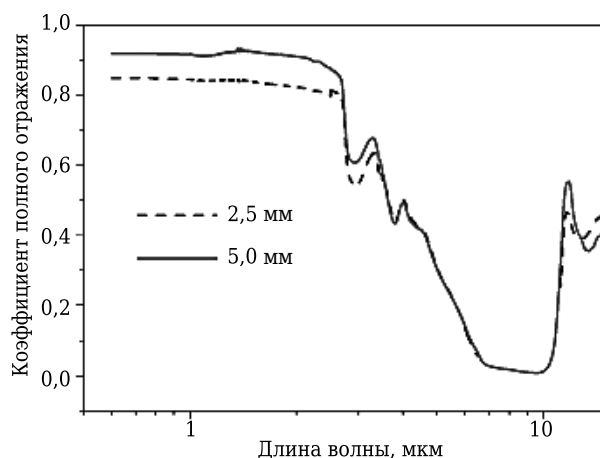


Рис. 1. Спектры коэффициента полного отражения образцов двух толщин (2,5 и 5,0 мм) алюмооксидной керамики

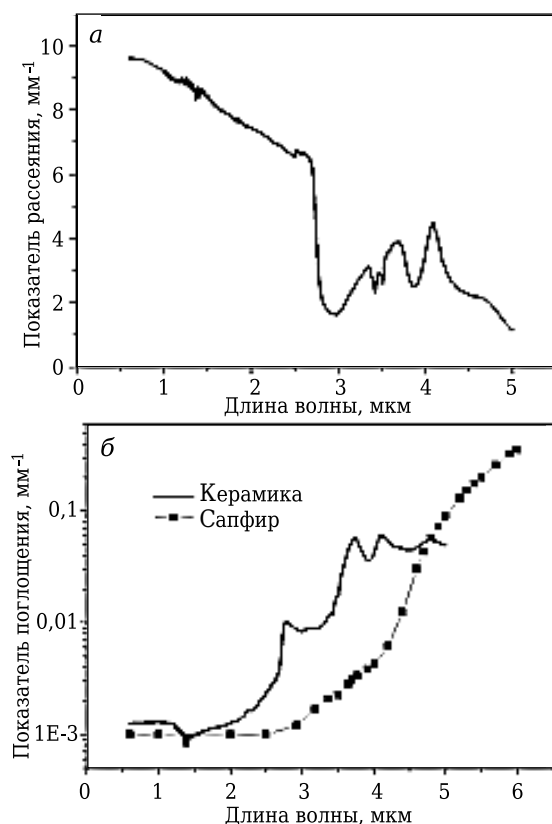


Рис. 2. Спектры показателей рассеяния и поглощения алюмооксидной керамики при комнатной температуре

тепловым уширением фундаментальных полос поглощения, расположенных в средней ИК-области (>5 мкм). Несмотря на определенные различия в полосах примесного поглощения, близость при комнатной температуре показателей поглощения исходного некерамического материала (сапфир) и керамики позволяет предположить, что такое подобие сохраняется и при повышенных температурах. Следовательно,

имея надежные данные по температурной зависимости показателя поглощения исходного материала, можно смоделировать температурную зависимость показателя поглощения керамики. Величина показателя рассеяния определяется структурой материала и величиной показателя преломления. Предполагая, что структура керамики сохраняется неизменной вплоть до 1273 К, пренебрегая зависимостью показателя преломления от температуры, можно предположить, что показатель рассеяния керамики не зависит от температуры.

Температурное смещение показателя поглощения алюмооксидной керамики корректировалось согласно данным [8] в области частичной прозрачности (0,5–5 мкм):

$$k_{\text{керам}}(l, T) = k_0(l, T) \cdot k_{\text{керам}}(l, T_K) / k_0(l, T_K),$$

где $k_{\text{керам}}$, k_0 — показатели поглощения керамики и сапфира соответственно, T_K — комнатная температура, λ и T — длина волны излучения и температура соответственно.

После экстраполяции температурной зависимости показателя поглощения была рассчитана температурная зависимость спектральной полусферической излучательной способности слоя заданной толщины на основе решения прямой задачи распространения излучения (рис. 3).

Далее по спектральной полусферической излучательной способности была рассчитана интегральная и ее температурная зависимость, при этом интегрирование в формуле (3) вели во всем экспериментально доступном диапазоне длин волн — от 0,5 до 20 мкм (рис. 3).

Результаты, представленные на рис. 3 для алюмооксидной керамики, в целом демонстрируют согласие с известными литературными данными [1]. Наблюдаются определенные отличия между полусферической (в данной работе)

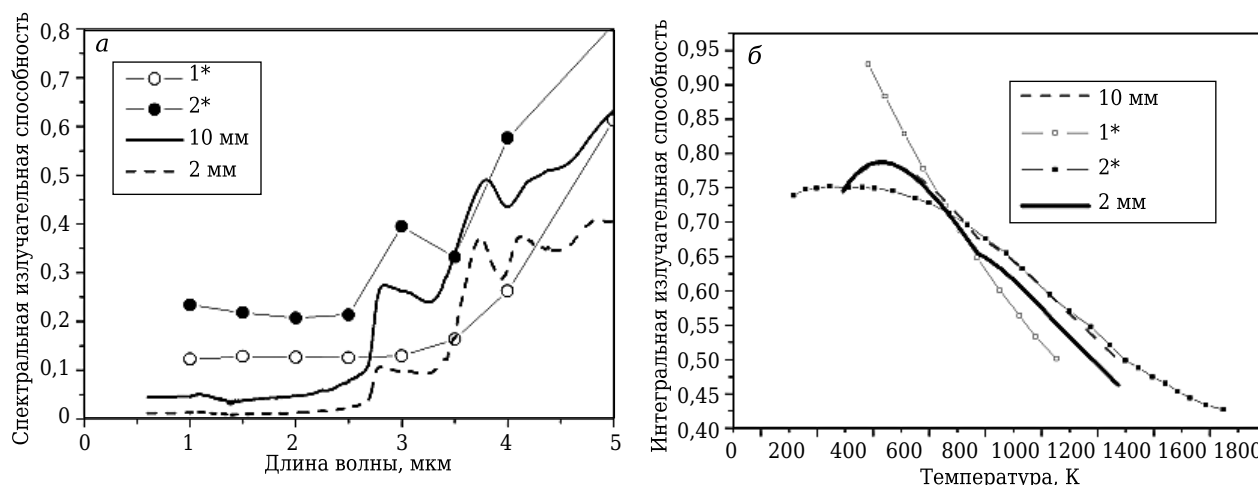


Рис. 3. Спектральная излучательная способность при комнатной температуре (а) и температурная зависимость интегральной излучательной способности (б) алюмооксидной керамики толщиной 2 и 10 мм; 1* и 2* — литературные данные [1]



и направленной (в работе [1]) спектральной излучательной способностью в области длин волн 1,0–2,5 мкм. При этом в настоящей работе излучательная способность меньше на 5–15 %. В этом спектральном диапазоне наибольшее влияние на излучательные свойства оказывает рассеяние в материале, которое на несколько порядков превышает поглощение (см. рис. 2). Рассеяние в материале существенным образом зависит от технологии его получения, размера зерен, степени их спекания, подготовки поверхности. По интегральной излучательной способности наблюдается очень хорошее согласие с некоторыми литературными данными (см. рис. 3, кривая 2*). Наблюдаемое расхождение с другими литературными данными не превышает 10 %. Следует отметить, что в литературе часто не приводится толщина слоя материала, которая существенным образом влияет на излучательную способность, это приводит к большому разбросу литературных данных.

Библиографический список

1. Излучательные свойства твердых материалов : справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. — М. : Энергия, 1974. — 472 с.
2. **Петров, В. А.** Излучательная способность высокотемпературных материалов / В. А. Петров. — М. : Наука, 1969. — 80 с.
3. **Двуреченский, А. В.** Исследование спектральных излучательных характеристик кварцевых стекол и кварцевой керамики при высоких температурах с помощью высокоскоростной экспериментальной установки : дис. ... канд. техн. наук. — М., 1978. — 190 с.
4. **Иванов, А. П.** Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах / А. П. Иванов, В. А. Лойко, В. П. Дик. — Минск : Наука и техника, 1988. — 343 с.
5. **Зега, Э. П.** Отражение и пропускание света слоем большой оптической толщины / Э. П. Зега, О. В. Бушмакова, И. Л. Кацев, Н. В. Коновалов // ЖПС. — 1979. — Т. XXX, вып. 5. — С. 900–907.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе определена спектральная излучательная способность алюмооксидной керамики при комнатной температуре на основе измерения спектров полного отражения. Описание распространения излучения в материале при помощи теории переноса излучения позволило перейти от характеристики образцов заданной толщины (полное отражение) к характеристикам единицы объема материала (показатели поглощения и рассеяния). На основе литературных данных о температурной зависимости показателя поглощения сапфира смоделировано температурное поведение спектральной и интегральной полусферической излучательной способности алюмооксидной керамики. Полученная интегральная излучательная способность алюмооксидной керамики может применяться при моделировании простых задач теплопереноса при заданной толщине слоя и равномерном по объему нагреве образца в интервале температур, в котором нет температурной зависимости показателя рассеяния.

6. **Миронов, Р. А.** Определение показателей поглощения, рассеяния и излучательной способности кварцевой керамики по измеренным спектрам коэффициента диффузного отражения в диапазоне длин волн 0,5–5 мкм / Р. А. Миронов, М. О. Забежайлов, С. П. Бородай // Тепловые процессы в технике. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 262–269.
7. **Забежайлов, М. О.** Методика определения показателей поглощения и рассеяния полупрозрачных рассеивающих материалов / М. О. Забежайлов, С. П. Бородай // Новые огнеупоры. — 2009. — № 6. — С. 47–49.
8. **Воронкова, Е. М.** Оптические материалы для инфракрасной техники / Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер [и др.] — М. : Наука, 1965. — 336 с. ■

Получено 03.09.14

© Р. А. Миронов, М. О. Забежайлов,
С. П. Бородай, 2014 г.

