

относительной расширенной неопределенности получены средние значения ОУ, которые показали стабильность при многократных нагревах. В исследованиях реализованы новые подходы для измерений ОУ по сквозным цилиндрическим меткам, расположенным на изотермическом участке образца, и определения действительной температуры с помощью моделей АЧТ, встроенных в образец.

Л и т е р а т у р а

1. **Аматуни А. Н., Компан Т. А., Родина Н. А.** Таблицы стандартных справочных данных. Материалы для образцовых мер ТКЛР. монокристаллический оксид алюминия. Температурный коэффициент линейного расширения. ГСССД № 176—96. М.: Изд-во стандартов, 1997.
2. **Компан Т. А., Коренев А. С., Родина Н. А.** Таблицы стандартных справочных данных. Материалы для образцовых мер ТКЛР. Монокристаллический оксид алюминия с ориентацией 59° относительно тригональной оси (С) кристаллографической решетки. ГСССД № 186—99. М.: Изд-во стандартов, 1999.
3. **Hahn T. A.** Thermal expansion of single crystal sapphire from 293 to 2000 K. Standard reference material 732 // AIP Conf. Proc. Thermal Expansion-6. N.Y., London, 1978. P. 191—201.

4. **Компан Т. А. и др.** Эталонные меры теплового расширения из монокристаллического оксида алюминия для широкого диапазона температур // Измерительная техника. 1999. № 8. С. 38—42; **Компан Т. А. е. а.** Standard measures of Thermal Expansion Made of Monocrystalline Aluminum Oxide for a Broad Range of Temperatures // Measurement Techniques. 1999. V. 42. N. 8. P. 776—781.
5. **Петухов В. А., Чеховской В. Я., Багдасаров Х. С.** Монокристаллическая окись алюминия — образцовое вещество в дилатометрии // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. № 5. С. 1083—1087.
6. **Petukhov V. A., Chekhovskoi V. Ya.** Investigation of the thermal expansion of molybdenum and tungsten at high temperatures // High Temperatures—High Pressures. 1972. V. 4. N. 6. P. 671—677.
7. **Антонов П. И. и др.** Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова. Л.: Наука, 1981.
8. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2001.
9. **Termophysical Properties of High Temperature Solid Materials** / Ed. Y. S. Touloukian. N.Y.: Macmillan Company, London: Collier-Macmillan Ltd., 1967. P. 22 (Klein D. E.).

Дата принятия 21.10.2014 г.

536.2.083

Погрешности определения теплофизических характеристик пористых конструкционных материалов методом лазерного импульса

М. Д. КАЦ, И. М. КАЦ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, e-mail: Katz@tpu.ru

Выполнен анализ погрешностей определения теплофизических характеристик типичного композитного гетерогенного материала — спеченного порошка алюминия. Погрешности обусловлены радиационным переносом энергии в прогретом слое материала в условиях реализации метода лазерного импульса при воздействии на поверхность композита коллимированного лазерного импульса конечной длительности. Установлено влияние пористости материала и процесса поглощения излучения на эти погрешности.

Ключевые слова: температуропроводность, спеченный алюминий, метод лазерного импульса, пористость, коэффициент поглощения излучения.

The analysis of errors of determination of thermal characteristics of a typical composite heterogeneous material — sintered aluminum powder — caused by radiation energy transfer in the heated layer of material in the conditions of laser pulse method realization at exposure of the collimated laser pulse of finite duration on the composite surface has been carried out. The influence of material porosity and radiation absorption process on this error value was determined.

Key words: thermal conductivity, sintered aluminum, laser pulse method, porosity, radiation absorption coefficient.

Развитие современной техники неразрывно связано с применением композиционных материалов в виде высокоэнергетических добавок, различного рода защитных покрытий, пористых изделий (фильтров, подшипников, поглощающих панелей) [1]. Анализ теплофизических процессов и определение с высокой точностью теплофизических свойств таких материалов особенно актуальны при разработке но-

вых изделий. Процесс теплопереноса при нагреве композиционных материалов осуществляется за счет теплопроводности, зависящей от состава смеси и пористости материала. Для исследования теплофизических свойств указанных материалов целесообразно использовать высокопроизводительные процедуры, например, метод лазерного импульса — лазерной вспышки, LFA [2]. Он основан на поглощении им-

пульса лучистой энергии в тонком слое фронтальной «горячей» поверхности образца и приближенном решении одномерной задачи теплопроводности для бесконечной пластины. По полученной временной температурной зависимости обратной («холодной») поверхности образца определяют максимальную температуру перегрева $T_{\max}$ относительно начальной температуры T_0 , время $\tau_{0,5}$ достижения половины максимальной температуры перегрева «холодной» поверхности образца.

Температуропроводность a , удельную теплоемкость c и теплопроводность λ исследуемого материала при реализации метода [2] вычисляют как

$$a = 0,1388L^2/\tau_{0,5}; c = Q/(\rho T_{\max}L); \lambda = a c \rho,$$

где L — толщина образца; ρ — плотность материала; Q — энергия, поглощенная образцом.

Условия применения метода лазерного импульса для определения температуропроводности частично прозрачных однородных материалов рассмотрены в [3, 4] в рамках одномерных задач теплопроводности, где установлена возможность появления существенно больших методических погрешностей (из-за интенсификации процесса нагрева в результате радиационного теплопереноса в образце), чем были установлены ранее для непрозрачных материалов. Показано, что при практической реализации метода лазерного импульса необходимы ограничения по длине волны падающего излучения и коэффициентам поглощения [3, 4].

До настоящего времени не анализировали погрешности метода лазерного импульса при определении теплофизических характеристик (ТФХ) композиционных гетерогенных материалов, например, спрессованных и спеченных металлических порошков [5]. Процесс нагрева последних сопровождается аккумуляцией теплоты, поступившей не только благодаря теплопроводности, но также объемного поглощения в определенных областях спектра, зависящих от длины волны теплового излучения.

Однако теория метода разработана только для определения ТФХ однородных материалов [2]. Поэтому целесообразно проанализировать возможности применения импульсного лазерного метода для определения ТФХ пористых полупрозрачных материалов, например, спрессованного и спеченного порошка алюминия (СПА), представляющего пористую систему, состоящую из частиц алюминия и воздуха [6].

Цель работы — оценка погрешностей определения ТФХ пористой системы на примере СПА методом лазерного импульса [2], обусловленных неучитываемыми при разработке метода пористостью материала и радиационным теплопереносом в образце. Рассмотрена композиционная гетерогенная система СПА-4 — воздух (рис. 1) в виде бесконечной пластины при воздействии на ее поверхность лазерного излучения конечной временной дли-

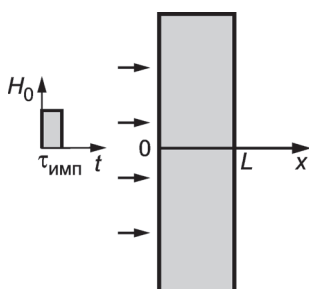


Рис. 1. Схема области решения

тельности $\tau_{\text{имп}}$ и отсутствии теплообмена на «горячей» и «холодной» поверхностях за исключением участка, нагреваемого лазерным излучением. Погрешности определения ТФХ материала методом лазерного импульса получены из сравнения справочных данных с найденными в результате численного моделирования условий реализации экспериментов по определению ТФХ материалов рассматриваемым методом в условиях радиационно-кондуктивного теплопереноса в образце.

При численном решении задачи теплопереноса допущено:

материал и граничные поверхности образца — серые и собственное излучение мало по сравнению с внешним радиационным потоком;

возможные эффекты изменения теплофизических параметров с изменением температуры не рассмотрены, так как методом лазерного импульса [2] такие зависимости невозможно определить;

участок поверхности образца $x = 0$ нагревается коллимированным потоком энергии, направленным перпендикулярно плоскости пластины, плотностью H_0 и длительностью импульса $\tau_{\text{имп}}$;

пористость образца постоянна по объему.

Математическая модель и метод решения. Математическая модель включает нестационарное дифференциальное уравнение энергии

$$\rho_{\text{эфф}} c_{\text{эфф}} \partial T(x, t) / \partial t = \lambda_{\text{эфф}} \partial^2 T(x, t) / \partial x^2 - \partial H(x) / \partial x \quad (1)$$

с граничными условиями

$$x = 0: -\lambda_{\text{эфф}} \partial T(x, t) / \partial x = H_0, \tau_{\text{имп}} > t > 0; \quad (2)$$

$$x = 0: -\lambda_{\text{эфф}} \partial T(x, t) / \partial x = 0, t > \tau_{\text{имп}}; \quad (3)$$

$$x = L: \lambda_{\text{эфф}} \partial T(x, t) / \partial x = 0, t > 0 \quad (4)$$

и начальным условием

$$t = 0: T(x, 0) = T_0, \quad (5)$$

где $c_{\text{эфф}}$, $\rho_{\text{эфф}}$, $\lambda_{\text{эфф}}$ — эффективные значения удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности материала; $H(x)$ — плотность энергии излучения в материале; T — текущая температура; t — время.

Изменение плотности энергии в материале определяли по закону Бугера—Ламберта—Бера [7]:

$$H(x) = H_0 \exp(-k_{\lambda} x), \quad (6)$$

где k_{λ} — коэффициент поглощения энергии коллимированного потока лазерного излучения.

Эффективные значения ТФХ гетерогенного материала рассчитывали по известным формулам [8]:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_1(1 - y_2 / [(1 - \lambda_2 / \lambda_1)^{-1} - y_1 / 3]);$$

$$c_{\text{эфф}} = m_1 c_1 + m_2 c_2; \quad (7)$$

$$\rho_{\text{эфф}} = (m_1 / \rho_1 + m_2 / \rho_2)^{-1},$$

где y , m — объемная и массовая доли компонента материала; индексы 1, 2 относятся к алюминию и воздуху, соответственно.

Сформулированная нелинейная краевая задача решена методом конечных разностей [9] с использованием итерационного алгоритма [10], разработанного для численного решения задач высокотемпературного теплопереноса в областях с локальными источниками энергии. Задача (1)–(7) относится к категории сингулярно возмущенных [11]. При ее решении шаги разностной сетки по времени выбирали в диапазоне 10^{-5} – 10^{-7} с [12]. Обоснование достоверности результатов численного моделирования температурных полей проведено по методике, предназначенной для верификации численных решений нелинейных задач теплопроводности при интенсивном поглощении или выделении теплоты в области малой толщины в условиях физико-химических превращений [13].

Тепловой поток и длительность лазерного импульса задавали в соответствии с характеристиками типовых лазерных источников нагрева в экспериментальных установках для определения ТФХ материалов. При численном моделировании приняты следующие параметры источника нагрева образца материала [14]: $H_0 = 10^7 \dots 10^8$ Вт/м², $\tau_{\text{имп}} = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ с, длина волны излучения 1,06 мкм.

Результаты и обсуждение. Моделирование условий эксперимента выполнено для СПА-4 (диаметр частиц 100 мкм) с формированием образцов на гидравлическом прессе и последующем спеканием на воздухе в течение 30 мин при температуре 773 К [6]. При давлении пресса 40 и 80 МПа пористость образцов составляла соответственно 0,3 и 0,24.

В расчетах использованы ТФХ для алюминия [7]: $c_1 = 899,0$ Дж/(кг·К); $\rho_1 = 2710$ кг/м³; $\lambda_1 = 217$ Вт/(м·К) и воздуха [15]: $c_2 = 1000$ Дж/(кг·К); $\rho_2 = 1,166$ кг/м³; $\lambda_2 = 0,0258$ Вт/(м·К).

Эффективные ТФХ гетерогенной системы для двух значений пористости, вычисленные по выражениям (7), приведены в таблице.

Зависимость эффективных значений ТФХ СПА от пористости образца

Объемная пористость	$c_{\text{эфф}},$ Дж/(кг·К)	$\lambda_{\text{эфф}},$ Вт/(м·К)	$\rho_{\text{эфф}},$ кг/м ³
0,30	899,19	143,6	1886
0,24	899,14	160,4	2060

Как следует из таблицы и общей теории [8], с уменьшением пористости материала его теплопроводность увеличивается.

Начальная температура и толщина образца в условиях рассматриваемых экспериментов составляли соответственно $T_0 = 293$ К, $L = 3$ мм. Диапазон длин волн области поглощения алюминия 410–780 нм, что соответствует изменению коэффициента поглощения в диапазоне $7,8$ – $19,8$ м⁻¹ [16]. Значения $H_0 = 2 \cdot 10^7$ Вт/м², $\tau_{\text{имп}} = 1,5$ мс выбирали исходя из реальных характеристик лазерного источника в экспериментальных установках для определения ТФХ материалов. Также при выборе этих параметров учитывали основное положение метода — обязательный температурный перегрев на холодной поверхности образца, не менее 3–6 К [2]. Шаги разностной сетки по времени и пространству составляли соответственно до 2 мкс и 10 мкм.

На рис 2. приведены результаты численного моделирования процесса нагрева образца СПА толщиной 3 мм

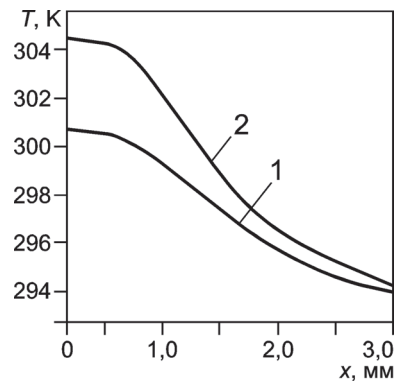


Рис. 2. Температурное распределение в образце СПА при $k_\lambda = 11,61$ м⁻¹ и различных $\Pi = 0; 0,3$, соответственно кривые 1, 2

в виде распределения $T(x)$ в момент времени 10 мс при $k_\lambda = 11,6$ м⁻¹ и пористостей образца $\Pi = 0$ (гомогенный), $\Pi = 0,3$ (гетерогенный). Как следует из рис. 2, дополнительное поглощение энергии, поступающей в глубинные слои образца при радиационном теплопереносе, вызывает рост температуры.

Зависимости погрешностей определения удельной теплоемкости δ_c и температуропроводности δ_a СПА от k_λ (рис. 3) иллюстрируют влияние рассматриваемого эффекта — дополнительного притока энергии в глубинные слои образца из-за радиационного теплопереноса при различной пористости материала. С увеличением k_λ растет T_{max} на холодной поверхности образца и уменьшается $\tau_{0,5}$. В результате увеличивается погрешность δ_c и уменьшается δ_a . Так, $\delta_c \approx 7\%$, $\delta_a \approx 2,3\%$ при $k_\lambda = 150$ м⁻¹ и $\Pi = 0,3$, причем $\delta_c < \delta_a$.

Таким образом, результаты выполненного математического моделирования показывают, что метод лазерного импульса [2] можно использовать для нахождения температуропроводности гетерогенных пористых систем. Однако при его практической реализации необходимо ограничить длину волны падающего излучения и коэффициенты поглощения. Снижение погрешности δ_a до минимально допустимых значений возможно при значительном увеличении длины волны лазерного излучения в области полупрозрачности. В реальных экспериментах это сделать достаточно трудно из-за технических характеристик используемых лазеров.

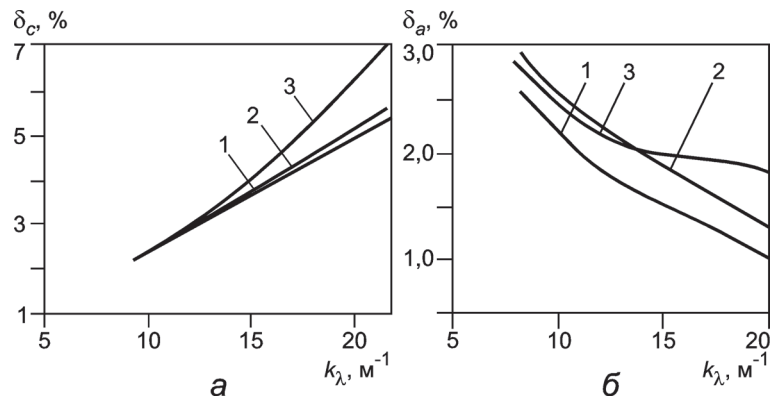


Рис. 3. Зависимости погрешностей δ_c (а) и δ_a (б) СПА от k_λ при пористости $\Pi = 0; 0,24; 0,30$, соответственно кривые 1—3

Л и т е р а т у р а

1. Ржевская С. В. Материаловедение. М.: Логос, 2004.
2. Parker W. J. e. a. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. P. 1675—1684.
3. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Погрешности определения теплофизических характеристик полупрозрачных материалов импульсным методом // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 43—45; Kuznetsov G. V., Katz M. D. The errors in determining the thermal characteristics of semitransparent materials by a pulse method // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 9. P. 1057—1060.
4. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Погрешности определения теплофизических характеристик оптического кварцевого стекла импульсным методом // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. 2012. № 2. С. 49—52.
5. Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971.
6. Нарва В. К., Вин Т. Технология и свойства пористых проницаемых материалов на основе алюминия // Известия вузов. Цветные металлы. 2007. № 1. С. 70—73.
7. Яворский Б. М. Справочник по физике. М.: Наука, 1979.
8. Шелудяк Ю. Е. и др. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справ. пособие. М.: НПО «Информ ТЭИ», 1992.

9. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
10. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Математическое моделирование сложного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области // Теплофизика и аэродинамика. 2009. Т. 16. № 1. С. 123—133.
11. Чанг К., Хауэс Ф. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи. Теория и приложения. М.: Мир, 1988.
12. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 1. С. 78—85.
13. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. 3D problem of heat and mass transfer at the ignition of a combustible liquid by a heater metal particle // J. Engin. Thermophys. 2009. V. 18. N. 1. P. 72—79.
14. Абилюлинов Г. А. Технологические лазеры: справочник Т. 1. М.: Машиностроение, 1991.
15. Юренев В. Н., Лебедев П. Д. Теплотехнический справочник. Т. 2. М.: Энергия, 1976.
16. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: справочник. М.: Машиностроение, 1980.

Дата поступления 21.11.2014 г.

621.421.37

Экспериментальное исследование упругих динамических характеристик модели ампулы для космической транспортировки радиоактивных отходов при повышенных температурах

А. В. ОНУФРИЕВ, С. Н. ДМИТРИЕВ, И. Н. АЛИЕВ, В. В. ОНУФРИЕВ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: onufriyev@bmstu.ru

Исследованы упругие динамические характеристики экспериментальной физической модели ампулы для космической транспортировки радиоактивных отходов в режиме самодоставки, т. е. когда отходы являются первичным источником энергии. Для исследования характеристик модели ампулы создан экспериментальный комплекс, разработана методика исследования как холодного, так и теплонапряженного состояний ампулы. Получены амплитудно-частотные характеристики модели ампулы для различных температурных режимов.

Ключевые слова: космическая транспортировка, радиоактивные отходы, упругие динамические характеристики, вибрационные нагрузки, гармоническое воздействие.

The experimental study of elastic dynamic characteristics of physical model of ampoule for space transportation of radioactive wastes in the «self-delivery» mode when the radioactive wastes are a primary energy source is described. For experimental study of the elastic dynamics characteristics of ampoule the experimental complex was created and the procedure of study of cold and heat-stressed state of the ampoule is developed. The amplitude frequency characteristics of experimental physical model of the ampoule for various temperature modes were received.

Key words: space transportation, radioactive waste, elastic dynamics characteristics, vibration load, harmonic action.

Вопросам космического удаления радиоактивных отходов (РАО) в настоящее время уделяется много внимания [1—3]. Проблема охватывает методики проектирования кос-

мического аппарата (КА), конструктивно-компоновочную и конструктивно-силовую схемы, механические и динамические характеристики как аппарата в целом, так и его узлов и