

УДК 536.24:517.968

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО КОМПЛЕКСА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ОДНОСТАДИЙНОМ КОНТРОЛЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Чуриков, Н.А. Коньшева

Кафедра «Автоматизированные системы и приборы», ТГТУ

Ключевые слова и фразы: анизотропный твердый материал; интегральные характеристики температуры и теплового потока; комплекс теплофизических свойств; неразрушающий контроль; ортотропные свойства.

Аннотация: Показан одностадийный метод неразрушающего контроля полного комплекса теплофизических свойств анизотропных твердых материалов. Метод осуществляется путем нагрева квадратного участка поверхности исследуемого образца, получения информации о распространении температурного поля поверхности по двум взаимно перпендикулярным осям и плотности теплового потока, вычисления интегральных характеристик измеренных температур и плотности теплового потока, по которым находятся теплофизические свойства.

Во многих отраслях современного промышленного производства используются новые полимерные строительные материалы, многие из которых по своим физическим свойствам относятся к неоднородным твердым материалам (композиционные, волокнистые материалы, металлокерамика, изделия из железобетона и дерева различной модификации и т.п.). Физические свойства данных материалов ортотропны (ортогонально анизотропны), то есть имеют три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии строения. Таковы древесина, фанера, стеклопластики, армированные непрерывным стекловолокном, различные текстолиты, прокатные металлы, пленки ориентированных полимеров. В ортогонально анизотропных материалах теплопроводность всегда оказывается выше в направлении ориентации, чем в направлении перпендикулярном ориентации, а также в изотропном состоянии. Следует признать, что теоретические и экспериментальные основы ме-

тодов исследования теплофизических свойств (ТФС) анизотропных материалов требуют своего дальнейшего совершенствования и развития.

Существующие методы контроля ТФС анизотропных материалов не отличаются большим разнообразием и, как правило, позволяют определять только одну теплофизическую характеристику. Эти методы предусматривают наличие исследуемых материалов в виде специальных проб или образцов определенных геометрических форм и размеров и требуют проведения эксперимента в несколько стадий с изменением расположения измерительного устройства [6].

С целью устранения таких нежелательных явлений, как разрушение образца или нарушение его структуры, нами был разработан метод неразрушающего контроля (НК) ТФС анизотропных твердых материалов, основанный на получении информации о распространении температурного поля поверхности по двум взаимно перпендикулярным координатным осям. Математическая модель данного метода описана в [1].

Предлагаемый нами метод по сравнению с известными методами позволяет определять комплекс ортотропно направленных ТФС на выбранном участке поверхности образца за один этап, не меняя положения измерительного устройства на поверхности образца в течение всего эксперимента, что делает измерения оперативнее, объективнее и точнее, и значительно сокращает время проведения эксперимента (до 15 – 20 минут). Была решена трехмерная обратная задача теплопроводности (ОЗТ), нагрев в которой производится через квадратный участок поверхности полуограниченного образца с различными ТФС, направленными по осям x , y и z . Тепловое воздействие создается постоянным во времени тепловым потоком плотностью $q(t) = q = \text{const}$ от электронагревателя постоянной мощности, благодаря чему температурное поле в исследуемом образце в процессе нагрева достигает стационарного значения, а температура исследуемого образца в измеряемой плоскости при $t \gg 0$ стремится к установившемуся значению $U_{\text{ст}}$. ОЗТ решена методами, основанными на интегральных преобразованиях Лапласа и Фурье. Была представлена методика определения комплекса ортотропных теплофизических свойств – температуропроводности a_x , a_y и величины тепловой активности θ_z .

Отношение температуропроводностей a_y/a_x определяется при условии [4], что в указанных контролируемых точках поверхности x_1 и y_1 (рис. 1) температура достигнет стационарного значения. Исходя из технологических и производственных требований, мы не можем ждать естественного момента времени $t_{ст}$, когда температура $U(x_1, 0, t)$ и $U(0, y_1, t)$ достигнет стационарного значения $U_{ст}(x_1)$ и $U_{ст}(y_1)$. Поэтому задачу определения безразмерной величины a_y/a_x решаем за конкретный конечный промежуток времени t_k . Эта задача решается с помощью методики, описанной в литературе [5]. Суть ее такова, что по экспериментальным данным определяются параметры преобразования Лапласа $p_1; p_2 = kp_1$, используемые для определения температуропроводности, и так как величина p – это временной параметр, то мы можем задать конечное время $t_k \cong t_{ст}$, при котором температура исследуемого тела достигнет стационарного значения, исходя из этого найти оптимальные p_1, p_2 и k , и, что самое главное для нашего метода определить отношение температуропроводностей a_y/a_x не дожидаясь естественного момента времени $t_{ст}$.

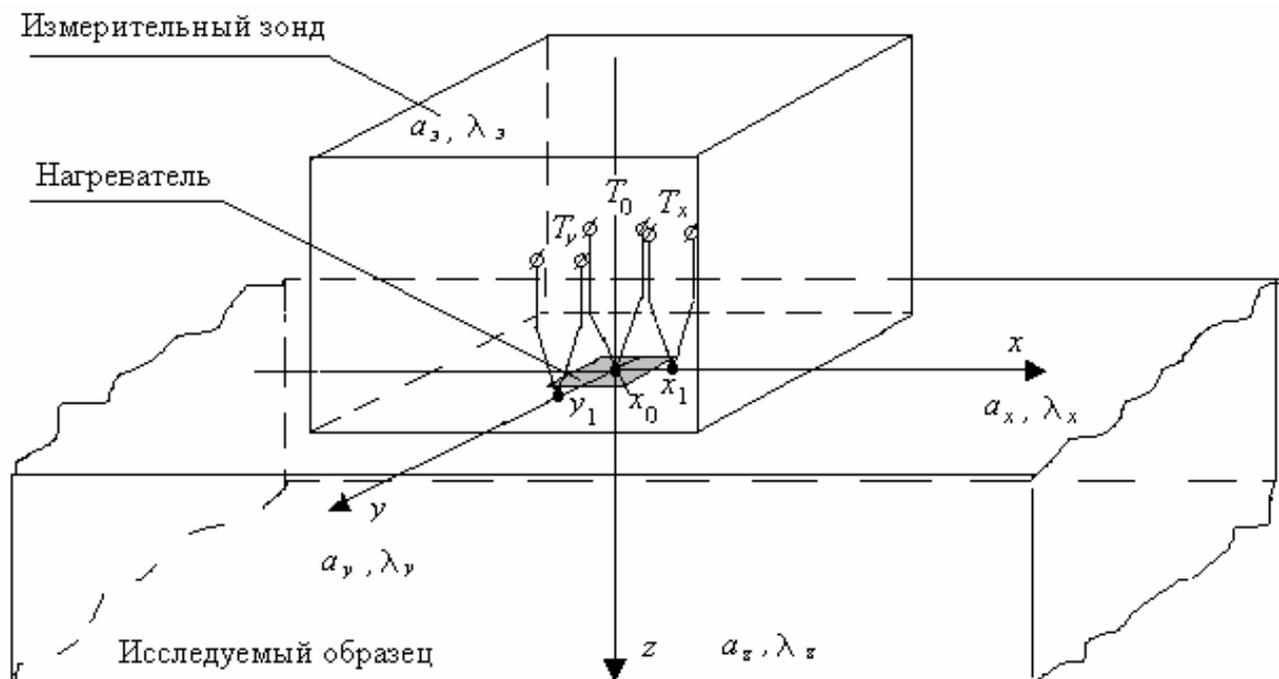


Рис. 1. Измерительная схема

Используя данную методику, заранее задаем конечное время проведения эксперимента $t = t_k$, принимаем $U(x_1, 0, t_k) \cong U_{ст}(x_1)$ и $U(0, y_1, t_k) \cong U_{ст}(y_1)$ и определяем a_y/a_x , после чего по оптимальным p_1, p_2 и k определяем a_x, a_y и величину тепловой активности θ_z .

Для определения полного комплекса ТФС образцов из анизотропных твердых материалов, а именно для определения $\lambda_x, \lambda_y, a_z$ и λ_z используется решение задачи, нагрев в которой полуограниченного тела производится постоянным тепловым потоком плотностью q , поступающего через бесконечную полосу $-\ell < x < \ell$ поверхности тела $z = 0$, при этом одна часть $-\ell < x < \ell$ нагревается, а другая $|x| > \ell, -\infty < y < \infty, z = 0$ находится при начальных нулевых граничных условиях.

Решение данной задачи (рис. 2, б) для изотропного полуограниченного тела полученное классическим методом представлено в литературе [2]. Для анизотропного тела решение краевой задачи теплопроводности, нагрев в которой производится через бесконечную полосу, т.е. температура U в точке $x_0 = 0$ поверхности в момент времени t опишется следующим уравнением

$$U(x_0, t) = \frac{ql}{\lambda_x} \sqrt{\frac{Fo_x}{\pi}} \left\{ \Phi\left(\frac{\ell}{2l\sqrt{Fo_x}}\right) + \Phi\left(\frac{\ell}{2l\sqrt{Fo_x}}\right) - \frac{\ell}{2l\sqrt{\pi Fo_x}} \left(-\frac{(\ell)^2}{4l^2 Fo_x} \right) - \frac{\ell}{2l\sqrt{\pi Fo_x}} \text{Ei} \left(-\frac{(\ell)^2}{4l^2 Fo_x} \right) \right\}. \quad (1)$$

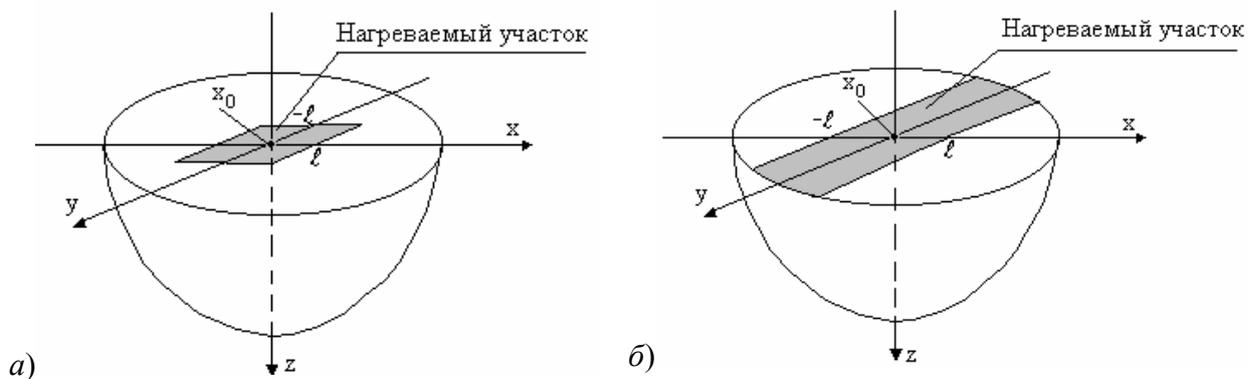


Рис. 2. Схема теплового воздействия поверхностными нагревателями:

a – квадратным и *б* – в виде бесконечной полосы

По аналогии выражение для температуры U в точке y_0 (если нагрев производится вдоль оси Ox) поверхности в момент времени t

$$U(y_0, t) = \frac{ql}{\lambda_y} \sqrt{\frac{Fo_y}{\pi}} \left\{ \Phi \left(\frac{\ell}{2\ell\sqrt{Fo_y}} \right) + \Phi \left(\frac{\ell}{2\ell\sqrt{Fo_y}} \right) - \frac{\ell}{2\ell\sqrt{\pi Fo_y}} \left(-\frac{(\ell)^2}{4\ell^2 Fo_y} \right) - \frac{\ell}{2\ell\sqrt{\pi Fo_y}} \text{Ei} \left(-\frac{(\ell)^2}{4\ell^2 Fo_y} \right) \right\}, \quad (1')$$

где $Fo_x = a_x t / \ell^2$, $Fo_y = a_y t / \ell^2$ – критерий Фурье; $\Phi(\tilde{x})$ – функция ошибок;

$-\text{Ei}(-\tilde{x}) = \int_{\tilde{x}}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$ – интегральная показательная функция.

Найдем условие адекватности температурного поля в точке x_0 , создаваемого квадратным нагревателем (см. рис. 2, а) температурному полю в этой же точке, создаваемого бесконечной полосой. Для этого решим данную задачу в области временного интегрального преобразования Лапласа и пространственного косинус преобразования Фурье. Зависимость временной интегральной характеристики (ВИХ) температуры U_{Π}^* анизотропного тела, нагреваемого через бесконечную полосу в точке $x_0 = 0$ запишется

$$U_{\Pi}^*(g_x) = \frac{2}{\pi} \frac{ql}{p\theta_z \sqrt{a_x}} \int_0^{\infty} \frac{\sin \mu}{\mu \sqrt{g_x + \mu^2}} d\mu, \quad (2)$$

где $g_x = \frac{p\ell^2}{a_x}$, $\mu = s\ell$, p – параметр преобразования Лапласа; s – параметр косинус-преобразований Фурье по координате x [3].

Применяя численные методы, рассчитаем ВИХ температуры в точке x_0 для двух задач через безразмерные параметры g_x и Fo_x .

Из анализа нами было найдено, что рабочий диапазон g_x будет $15 \dots 25$ ($15 \leq g_x \leq 25$, рис. 3, а), или, если рассчитать через Fo_x – $0,8 \leq Fo_x \leq 1,2$ (рис. 3, б). В этом диапазоне ВИХ температуры U_{κ}^* стремится к ВИХ температуры U_{Π}^* , т.е. до

определенного момента $t_{\text{опт}}$ для конкретного твердого анизотропного тела, по заранее найденным значениям температуропроводности a_x, a_y [1] и измеренной температуре в точке x_0 нагреваемого квадратного участка исследуемого тела $U(t)$ из уравнений (1) и (1') можно определить теплопроводность λ_x и λ_y .

Далее по известным значениям a_x и λ_x (или a_y и λ_y) можем определить объемную теплоемкость материала c_v , которая одинакова во всех направлениях анизотропного тела, т. е. $c_v = a_x/\lambda_x = a_y/\lambda_y = a_z/\lambda_z$.

Температуропроводность и теплопроводность, направленные по оси z находятся по ранее найденному значению величины тепловой активности θ_z и объемной теплоемкости c_v : $a_z = (\theta_z/c_v)^2$ и $\lambda_z = \theta_z \sqrt{a_z}$.

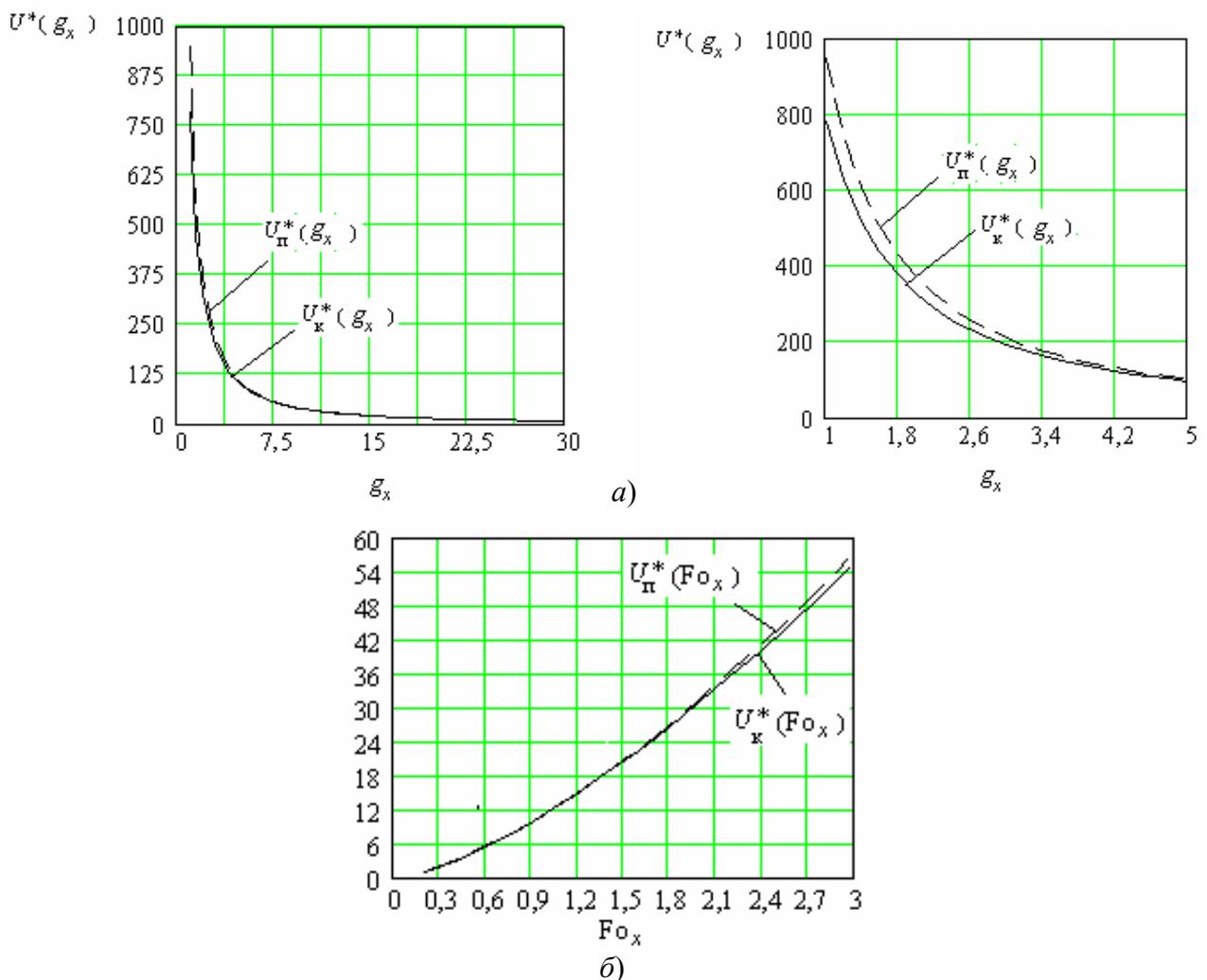


Рис. 3. Расчет ВИХ температур двух задач – с квадратным нагревателем

U_k^* и полосовым нагревателем U_n^* :

a – через параметр g_x ; b – через параметр Fo_x

На основании теоретических исследований нами выбрана схема измерений (см. рис. 1), реализующая разработанный одностадийный метод НК анизотропных материалов.

Измерительное устройство (см. рис. 1) представляет собой зонд в виде прямоугольного параллелепипеда из теплозащитного материала с известными ТФС (a_3, λ_3). В плоскости контакта $z = 0$ зонда с исследуемым образцом расположен плоский металлический квадратный нагреватель со стороной 2ℓ , в центре него находится рабочий спай термоэлектрического преобразователя (термопары) T_0 , с помощью которого измеряется избыточная температура контакта нагревателя с исследуемым телом, используемая в расчетах на начальной стадии нагрева до момента времени $t_{\text{опт}}$, который рассчитывается через Fo_x (или Fo_y). Датчики температуры T_x и T_y , по результатам измерений которых определяются коэффициенты температуропроводности a_x, a_y и величина тепловой активности θ_z , представляют собой термоэлектрические преобразователи, которые расположены на заданных расстояниях от центра квадрата. Расстояния от края нагревателя до точек x_1, y_1 ($x_1 = y_1$) находятся из анализа параметров эксперимента, обеспечивающих наибольшую чувствительность метода к анизотропии и минимальную методическую погрешность определения величин ВИХ температуры поверхности и искомым ТФС. С целью повышения надежности измеряемого сигнала симметрично этим датчикам относительно центра квадрата размещаются дополнительные термопары также на расстоянии x_1 и y_1 от центра (на рис. 1 не показаны). Использование дополнительной пары поверхностных датчиков позволяет повысить точность измерения температуры в двух координатах полупространства x и y .

Величина q измеряется с помощью квадратного (со стороной 2ℓ) плоского малоинерционного датчика теплового потока, расположенного над электронагревателем, при этом $q = Q - q_d$, где q_d – плотность теплового потока, идущего через датчик теплового потока; $Q = \text{const}$ – мощность электронагревателя.

Список литературы

1. Конышева, Н.А. Математическая модель неразрушающего теплофизического контроля теплофизических свойств ортотропного полуограниченного образца / Н.А. Конышева, А.А. Чуриков // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях : межвуз. сб. / под ред. Г.В. Леонова ; Алт. гос. техн. ун-т БТИ. – Бийск, 2005. – С. 13–15.
2. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
3. Власов, В.В., Методы неразрушающего теплофизического контроля анизотропных тел / В.В. Власов, Ю.С. Шаталов, Е.Н. Зотов, А.С. Лабовская, А.А. Чуриков // Инж.-физ. журн. – 1977. – Т. 33, № 3. – С. 479–485.
4. Чуриков, А.А. Неразрушающий контроль теплофизических свойств анизотропных дисперсных материалов / А.А. Чуриков, Н.А. Буренина // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т. 6, № 3. – С. 393–401.
5. Шишкина, Г.В. Экспериментальное определение параметров преобразования Лапласа при вычислении интегральных характеристик температуры / Г.В. Шишкина, А.А. Чуриков // Тр. молод. ученых и студ. ТГТУ / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2000. – С. 4–8.
6. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин, Г.С. Петров ; под общ. ред. Е.С. Платунова. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 256 с.

**DETERMINATION OF COMPLETE COMPLEX OF THERMOPHYSICAL
PROPERTIES DURING SINGLE-STAGE CONTROL OF SOLID
ANISOTROPIC MATERIAL SAMPLES**

A.A. Churikov, N.A. Konisheva

Key words and phrases: solid anisotropic material samples; complex of thermophysical properties; heat flow; integral characteristics of temperature and heat flow; integral Laplace's transformation; orthotropic properties.

Abstract: One-stage method of nondestructive control of full complex of thermophysical properties of orthotropic materials is shown. The method is carried out by mean of heating square part of surface of the investigated sample, obtaining information about distribution of temperature field of the surface along two perpendicular axes and density of heat flow, calculating integral characteristics of measured temperatures and density of heat flow with the help of which thermophysical properties are found.