DOI: 10.17117/na.2015.10.03.229

Поступила (Received): 25.10.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.10.03.229.pdf>

Сенкевич А.Ю.
Неразрушающий тепловой контроль твердых
материалов с неравномерным начальным
распределением температуры

Senkevich A.Yu.
Non-destructive thermal control of solid materials
with non-uniform initial temperature distribution

Описываются теоретические основы метода многостадийного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов, обеспечивающего надежность и точность получаемых результатов за счет оперативного проведения многократных идентичных последовательных измерений.

Приводятся расчетные зависимости определения теплофизических свойств на стадиях нагрева и остывания с учетом начального неравномерного распределения температуры в образце

Ключевые слова: тепловой контроль, теплофизические свойства, распределение температуры, неразрушающий контроль

It describes the theoretical basis of the method of nondestructive testing of a multi-stage thermo-physical properties of solid insulating materials ensure reliability and accuracy of the results due to the operational conduct of multiple identical consecutive measurements. Calculated based on the determination of thermal properties of heating and cooling stages, taking into account the initial uneven temperature distribution in the sample

Key words: thermal control, thermal properties, temperature distribution, non-destructive control

Сенкевич Алексей Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент
Тамбовский государственный технический университет
г. Тамбов, ул. Советская, 106

Senkevich Alexey Yurievich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Tambov state technical university
Tambov, Sovetskaya st., 106

В данной работе рассматривается задача определения теплофизических свойств (ТФС) образцов из твердых теплоизоляционных материалов без нарушения их целостности тепловым методом. Наиболее эффективным способом получения надежных и достоверных результатов теплофизического контроля является проведение определенного количества идентичных экспериментов. При проведении таких многократных измерений процесс контроля представляется совокупностью чередующихся стадий нагрева $[\tau_0, \tau_1]$ и остывания $[\tau_1, \tau_2]$ и их последовательного повторения.

На стадии остывания традиционно производится термостатирование, заключающееся в выравнивании температурных полей измерительного зонда и исследуемого образца до начального равномерного значения T_0 . Значительная

продолжительность данного процесса существенно сказывается на производительности и точности метода неразрушающего контроля (НК).

В разработанном нами многостадийном методе процесс контроля предлагается вести значительно быстрее, выбрав конечным моментом стадии остывания момент времени τ_2^* , при котором в исследуемом образце сохраняется остаточное температурное поле от предыдущего нагрева [1, с. 4].

Создание в исследуемом образце сферического или полусферического температурного поля с центром на поверхности в месте расположения нагревателя в наибольшей степени отвечает поставленной задаче контроля ТФС без нарушения целостности образца, поскольку для нахождения вида этого поля и измерения его параметров не требуется внедрения термодатчиков вглубь исследуемого тела, а достаточно их размещения на его поверхности в плоскости контакта с зондом ($z = 0$). Как показывают наши исследования, реализовать такое распределение на практике при определенных условиях возможно с использованием плоского нагревателя, имеющего форму круга небольшого диаметра.

Показано, что при больших временах ($\tau \gg 0$) процесс распространения тепла в массивном теле, нагреваемом круглым плоским нагревателем постоянной мощности и радиусом R , будет мало разниться с тепловым процессом, протекающим в этом же теле, нагреваемом тем же тепловым потоком, но полусферической полостью радиусом R_c , расположенной в той же, что и круглый нагреватель, центральной части поверхности тела.

В этом случае в исследуемом образце формируется сферическое одномерное температурное поле, а задача определения вида и параметров начального распределения температуры решается посредством размещения в плоскости контакта $z = 0$ термодатчиков и обработки их показаний при проведении эксперимента.

Заменой реального плоского круглого нагревателя радиусом R , воздействующего на исследуемый образец тепловым потоком постоянной плотности q , на эквивалентный полусферический нагреватель с соответствующими ему параметрами R_c и q_c приходим к следующей одномерной краевой задаче теплопроводности, адекватно описывающей процесс распространения тепла в рассматриваемом полуограниченном твердом теле:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (R_c \leq r < \infty, \quad \tau \geq 0), \quad (1)$$

начальное условие:

$$T(r, 0) = f(r), \quad (2)$$

граничные условия:

$$T(\infty, \tau) = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial r} = q_c - c_H \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где $T(r, \tau)$ – избыточная температура, a – температуропроводность, $f(r)$ – функция начального распределения температуры в образце, λ – теплопроводность, c_H – теплоемкость нагревателя.

Методом интегрального преобразования Лапласа получено решение задачи (1) – (3) для поверхности полусферы $r = R_c$:

$$T(R_c, \tau) = \frac{q_c R_c}{\lambda} \left(1 - \frac{R_c}{\sqrt{\pi a \tau}} \right) + I(\tau), \quad (4)$$

где первое слагаемое описывает изменение температуры под действием теплового потока поверхностной плотности q_c , а второе $I(\tau)$ учитывает известное начальное распределение температуры.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований был установлен вид функции начального распределения температуры $f(r)$ в исследуемом образце, параметры которой определяются на момент начала стадии нагрева $\tau = \tau_2^*$ по показаниям датчиков температуры, расположенных только в плоскости $z = 0$ контакта измерительного зонда с исследуемым образцом.

Для получения расчетных зависимостей метода на стадии нагрева выражение (4) запишем следующим образом

$$\tilde{T}(R_c, \tau_c) = b_0 - b_1 \tau_c, \quad (5)$$

где $\tilde{T}(R_c, \tau_c) = \tilde{T}(R_c, \tau) = T(R_c, \tau) - I(\tau)$, $b_0 = q_c R_c / \lambda$, $b_1 = q_c R_c^2 / (\lambda \sqrt{\pi a})$, $\tau_c = 1/\sqrt{\tau}$

Тогда, выделяя на экспериментальной термограмме участок (при $\tau \gg 0$), описываемый линейной зависимостью (5), и определяя методом наименьших квадратов его параметры b_0 и b_1 , находят искомые ТФС:

$$\lambda = \frac{q_c R_c}{b_0}, \quad (6) \quad a = \frac{1}{\pi} \left(\frac{b_0}{b_1} R_c \right)^2, \quad (7)$$

где q_c и R_c являются реально измеряемыми постоянными характеристиками измерительного устройства и определяются при его градуировке.

Протекание теплового процесса в исследуемом теле после выключения нагревателя (стадия остывания – $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2^*$) описывается следующей краевой задачей теплопроводности:

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

$$(0 \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad \tau \geq 0),$$

начальное условие:

$$T(r, z, 0) = f(r, z), \quad (9)$$

граничные условия:

$$\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = 0 \text{ и } T(r, z, \tau) \rightarrow 0 \text{ при } r^2 + z^2 \rightarrow \infty, \quad (10)$$

где $f(r, z)$ – распределение температуры в образце на момент окончания стадии нагрева, являющееся начальным для рассматриваемой стадии остывания.

Решая задачу (8) – (10) методом двойных пространственно-временных интегральных преобразований Лапласа-Ханкеля, получено выражение для температуры в точке $r = 0$ плоскости $z = 0$ контакта измерительного зонда с образцом:

$$T(0,0,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}(a\tau)^{3/2}} \int_0^\infty \int_0^\infty r \exp\left(-\frac{r^2 + z^2}{4a\tau}\right) f(r,z) dz dr, \quad (11)$$

которое с учетом вида начального распределения [1, с. 7] позволило получить формулу для независимого определения температуропроводности на стадии остывания

$$a = \frac{B_0}{4\tau} \left[\left(\frac{A_0}{T(0,0,\tau)} \right)^{2/3} - 1 \right]. \quad (12)$$

Использование закономерностей процесса остывания твердого тела для определения его температуропроводности a позволяет проводить коррекцию результатов контроля ТФС на стадии нагрева в случае возникновения случайных промахов и ошибок и тем самым повышает производительность многократных измерений.

Список используемых источников:

1. Сенкевич А.Ю. Метод и автоматизированная система многостадийного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов. Автореферат диссертации. Тамбов, 2000. 16 с.

© 2015, Сенкевич А.Ю.

Неразрушающий тепловой контроль твердых материалов с неравномерным начальным распределением температуры

© 2015, Senkevich A.Yu.

Non-destructive thermal control of solid materials with non-uniform initial temperature distribution