УДК 536.24:517.967

Л.Л. АНТОНОВА, А.А. ЧУРИКОВ

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специфические свойства многостадийного производства и эксплуатации изделий из керамических электроизоляционных материалов накладывает определенные требования к методам и устройствам для измерения их теплофизических свойств (ТФС). Прежде всего, должна быть обеспечена возможность измерений без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик образцов и готовых изделий различных и весьма малых размеров. Особое значение при междустадийном теплофизическом контроле данных материалов, когда они представляют собой влажную мелкодисперсную среду, приобретает уменьшение времени процесса измерения с целью сохранения их первоначальных свойств. Данным требованиям в наибольшей степени отвечают методы неразрушающего контроля ТФС неоднородных твердых материалов, разработанные ранее и приведенные в [1]. Математические модели существующих методов предполагают, что исследуемое тело по отношению к тепловому воздействию является полуограниченным, а тепловое воздействие осуществляется тепловым потоком через круглый участок поверхности исследуемого образца. Плотность теплового потока во время эксперимента остается постоянной и равной $q(t) \equiv q_1 = \text{const}$, благодаря чему температура нагреваемой поверхности исследуемого тела достигает стационарного значения. В этих методах основным экспериментальным параметром является временная интегральная характеристика температуры поверхности нагреваемого образца вида

$$S_1^*(p) = \int_0^\infty e^{-pt} S_1(t) dt, \; p > 0, \tag{1}$$

где p - параметр преобразования Лапласа; $S_1(t)$ – измеряемая средне- интегральная температура нагреваемого круга

$$S_1(t) = \frac{2}{R^2} \int_0^R U_1(t,r,0)\, r\, dr\,. \tag{2}$$

Как видно из графической иллюстрации (рис. 1, *а*), где $f_1(t) = S_1(t) e^{-pt}$, для точного определения характеристики (1) необходимо измерять температуру $S_1(t)$ до момента времени $t \to \infty$. Применение квадратурных формул Чебышева-Лагерра позволяет находить приближенное значение данного интеграла с достаточной погрешностью за небольшой временной интервал $t_1 \approx 300$ с. Однако для реализации рассматриваемых методов необходимо постоянное во времени действие источника тепла, что приводит к нарушению условий полуограниченности образцов небольших изделий. Нами предлагается ограничить время действия теплового потока до момента времени t_2, причем $t_2 << t_1$. Тогда $S_2(t)$ будет иметь вид, представленный на рис. 1, *б*, а подынтегральная функция $f_2(t)$ будет намного быстрее стремиться к нулю, что позволяет значительно сократить эксперимент, а также повысить точность расчета интегральных характеристик температуры и теплового потока.

При этом температурное поле в полуограниченном теле при плоском круглом нагревателе радиусом R будет описываться решением следующей краевой задачи для абсолютного метода:

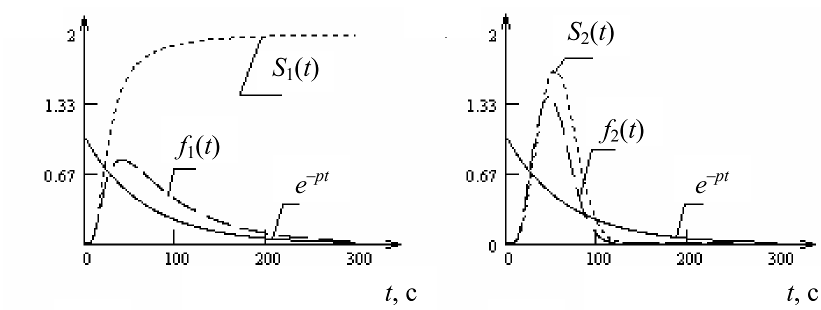
$$\frac{1}{a}\frac{\partial U_2(t,r,z)}{\partial t}=\frac{\partial^2 U_2(t,r,z)}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial U_2(t,r,z)}{\partial r}+\frac{\partial^2 U_2(t,r,z)}{\partial z^2}; \qquad (3)$$

$(t>0,\ 0\le r<\infty,\ 0\le z<\infty)$;

$$U_2(0,r,z)=0; \qquad (4)$$

$$U_2(t,r,z)=0 \text{ при } r,z\to\infty;\ \left.\frac{\partial U_2(t,r,z)}{\partial r}\right|_{r=0}=0; \qquad (5)$$

$$\lambda\left.\frac{\partial U_2(t,r,z)}{\partial z}\right|_{z=0}=\begin{cases}-q_2(t,r) \text{ при } 0\le r\le R;\\ 0 \text{ при } r>R,\end{cases} \quad q_2(t,r)=\begin{cases}q_2(t,r) \text{ при } t\le t_2;\\ 0 \text{ при } t>t_2.\end{cases} \qquad (6)$$



а) *б*)

РИС. 1

Применяем последовательно к (3) – (6) интегральное преобразование Лапласа по времени и интегральное преобразование Ханкеля по координате r. Затем, используя обратное преобразование Ханкеля и учитывая, что основная информация о температуре поверхности снимается в виде (2), находим связь временной интегральной характеристики (ВИХ) температуры круга радиусом R поверхности исследуемого тела $S_2^*(p)$ с ВИХ теплового потока $q_2^*(p)$

$$S_2^*(p)=\frac{2q_2^*(p)(1-e^{-pt_2})}{\lambda}\int_0^\infty \frac{1}{b\xi}J_1^2(R\xi)d\xi, \qquad (7)$$

где p и ξ – параметры интегрального преобразования Лапласа и Ханкеля соответственно; $b=\sqrt{\xi^2+\frac{p}{a}}$; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Для нахождения расчетных формул вводим в зависимость (7) безразмерные переменные $g(p)=\frac{pR^2}{a}$ и $\tau=pt_2$, а также функцию

$$W(g(p),\tau)=(1-e^{-\tau})\cdot V(g(p)), \qquad (8)$$

где $V(g(p))=\int_0^\infty \frac{J_1^2(\mu)d\mu}{\sqrt{\mu^2+g(p)\mu}}$; $\mu=R\xi$. После чего выражение (7) преобразуется в следующее

$$S_2^*(p)=\frac{2q_2^*(p)}{\lambda}W(g(p),\tau). \qquad (9)$$

По методике, используемой в [1], для двух значений параметра интегрирования p и kp, ($k>1$), получаем уравнение неразрушающего контроля параметра $g(p)$

$$\frac{S_2^*(p)q_2^*(kp)}{S_2^*(kp)q_2^*(p)}=\frac{W(g(p),\tau)}{W(g(kp),k\tau)}\equiv\Phi(g,k,\tau). \qquad (10)$$

Левая часть уравнения (10) определяется расчетным путем на основании данных, полученных из результатов экспериментальных измерений. Функция $\Phi(g, k, \tau)$ рассчитывается заранее для определенных k и τ, и из зависимости $\Phi = \Phi(g, k, \tau)$ при заданных фиксированных k и τ определяется g, по численному значению которого находится величина температуропроводности

$$a = \frac{pR^2}{g}.$$

Величину теплопроводности материала находим из (9)

$$\lambda = \frac{2Rq_2^*(p)}{S_2^*(p)} W(g(p), \tau).$$

Отличие полученных расчетных зависимостей от приведенных в работе [1] состоит в появлении параметрической функции $W(g, \tau)$ или $W(g, k\tau)$ вида (8), содержащей множители $(1 - e^{-\tau})$ или $(1 - e^{-k\tau})$, которые весьма просто могут быть рассчитаны, не усложняют математическую часть методов при решении многомерных задач теплопроводности, но при этом позволяют исследовать малые образцы и сократить активную стадию эксперимента [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ЧУРИКОВ А.А. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ И ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ: ДИС. ... Д-РА ТЕХН. НАУК. ТАМБОВ, 2000. 650 С.

2 Антонова Л.Л., Чуриков А.А. Совершенствование методов неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Междунар. теплофизической школы: В 2 ч. Тамбов, 2004. Ч. 1. С. 137 – 139.

Кафедра "Автоматизированные системы и приборы"