

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА
БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В современных средствах неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов и изделий из них широкое распространение получили бесконтактные методы контроля, основанные на регистрации теплового излучения с поверхности исследуемых объектов. Одной из главных задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации средств НК ТФС материалов является разработка их метрологического обеспечения.

Точность методов НК ТФС материалов зависит в основном от полноты решения задач учета разного рода потерь тепла в окружающую среду в процессе измерений. Разработанные ранее методы бесконтактного НК ТФС материалов позволяют в той или иной мере решать эти задачи [1, 2], однако большинству из них свойственен один общий недостаток – наличие механически подвижных узлов (источник тепла, термодатчики), вносящих дополнительные погрешности в результаты определения искомого ТФС.

Для устранения указанного недостатка был разработан новый бесконтактный метод определения ТФС твердых материалов, основанный на использовании математической модели неподвижного точечного источника тепла. Сущность метода заключается в следующем. Над исследуемым объектом помещают неподвижный точечный источник тепла и два термодатчика, измеряющих температуры в точках контроля, расположенных соответственно на расстояниях R_1 и R_2 от центра пятна нагрева. Сначала определяется коэффициент k , зависящий от значений степени черноты ϵ поверхности исследуемого образца и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемого образца и термодатчики. Далее включают источник тепла (лазер) мощностью $q_{\text{ит}}$ и производят нагрев. В момент времени $\tau_1 = (R_2/0,0004)^2$ производят измерение избыточных температур T_1, T_2 в точках контроля, расположенных на расстояниях соответственно R_1 и R_2 от центра пятна нагрева. Затем продолжают нагрев до тех пор, пока избыточная температура в точке контроля, расположенной на расстоянии R_1 от центра пятна нагрева не станет равной значению $T_{2\text{зад}} = 1,1T_1$. При этом фиксируют момент времени τ_x , а искомые ТФС (коэффициенты температуропроводности a и теплопроводности λ) определяют по следующим соотношениям:

$$a = \frac{1}{\pi\tau_1} \left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{k q_{\text{ит}} \left(\frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left(\frac{\frac{\tau_x T_2}{\tau_1}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2\text{зад}}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)}. \quad (2)$$

Для оценки качества и повышения эффективности практического применения разработанного метода было создано для него метрологическое обеспечение. Одним из наиболее важных разделов этого обеспечения является определение характеристик погрешностей разработанного метода.

Описание погрешностей результатов измерения ТФС было проведено с позиции разложения погрешности в полную группу составляющих, каждая из которых связана с преобразованием (частной измерительной процедурой), ее порождающим [3].

Рассмотрим выражение (1). Полная погрешность температуропроводности Δa^* зависит от точности определения всех изменяющихся в процессе измерений величин этого выражения. Так как расстояния R_1 и R_2 в процессе измерений остаются постоянными, то они исключаются из рассмотрения. Таким образом, полная погрешность Δa^* складывается из суммы погрешностей измерений T_1, T_2 и τ_1 :

$$\Delta a^* = a^* - a = \Delta_{T_1} a^* + \Delta_{T_2} a^* + \Delta_{\tau_1} a^*, \quad (3)$$

где a – истинное значение коэффициента температуропроводности; a^* – значение коэффициента температуропроводности, полученное в результате измерений; $\Delta_{T_1} a^*$ – погрешность, обусловленная отклонением T_1 от истинного значения $T_{1\text{ин}}$, т.е. $T_1 = T_{1\text{ин}} + \Delta T_1$; $\Delta_{T_2} a^*$ – погрешность, обусловленная отклонением T_2

от истинного значения $T_{2и}$, т.е. $T_2 = T_{2и} + \Delta T_2$; $\Delta_{\tau_1} a^*$ – погрешность, обусловленная отличием τ_1 от истинного значения $\tau_{1и}$, т.е. $\tau_1 = \tau_{1и} + \Delta\tau_1$.

Рассмотрим далее выражение (2). Полная погрешность $\Delta\lambda^*$ складывается из суммы погрешностей измерения T_2 , $T_{2зад}$, τ_1 , τ_x и определения коэффициента k :

$$\Delta\lambda^* = \lambda^* - \lambda = \Delta_{T_2} \lambda^* + \Delta_{T_{2зад}} \lambda^* + \Delta_{\tau_1} \lambda^* + \Delta_{\tau_x} \lambda^* + \Delta_k \lambda^*, \quad (4)$$

где λ – истинное значение коэффициента теплопроводности; λ^* – значение коэффициента теплопроводности, полученное в результате измерений; $\Delta_{T_2} \lambda^*$ – погрешность, обусловленная отличием T_2 от истинного значения $T_{2и}$, т.е. $T_2 = T_{2и} + \Delta T_2$; $\Delta_{T_{2зад}} \lambda^*$ – погрешность, обусловленная отличием $T_{2зад}$ от истинного значения $T_{2зади}$, т.е. $T_{2зад} = T_{2зади} + \Delta T_{2зад}$; $\Delta_{\tau_x} \lambda^*$ – погрешность, обусловленная отличием τ_x от истинного значения $\tau_{хи}$, т.е. $\tau_x = \tau_{хи} + \Delta\tau_x$; $\Delta_{\tau_1} \lambda^*$ – погрешность, обусловленная отличием τ_1 от истинного значения $\tau_{1и}$, т.е. $\tau_1 = \tau_{1и} + \Delta\tau_1$; $\Delta_k \lambda^*$ – погрешность, обусловленная отличием k от истинного значения $k_{и}$, т.е. $k = k_{и} + \Delta k$.

Полученные соотношения для полных погрешностей позволили оценить их характеристики и выделить в них доминирующие параметры. Результаты влияния параметров T_1 , T_2 , $T_{2зад}$, τ_1 , τ_x и k на погрешность определения искомых ТФС, приведены в табл. 1 (отклонение каждого параметра составляет $\pm 10\%$ при постоянстве остальных).

Таблица 1

Параметры		T_1	T_2	$T_{2зад}$	τ_1	τ_x	k
Максимальное отклонение, %	δa	27	49	–	9	–	–
	$\delta\lambda$	–	30	44	13	4,69	10

Таким образом, доминирующий вклад в общую погрешность определения ТФС при помощи разработанного метода вносят погрешности измерения температуры, причем больший вклад вносит погрешность определения температуры в точке, расположенной на большем расстоянии (R_2) от центра пятна нагрева. Полученная информация о доминирующих компонентах и их вкладе в общую погрешность позволила показать их влияние на результаты измерений и целенаправленно компенсировать источники составляющих погрешностей. Из вышесказанного следует, что для уменьшения погрешности определения искомых ТФС материалов необходимо выбирать термоприемники, обладающие возможно большей точностью измерения температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1056015 СССР, МКИ G01N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов / Ю.А. Попов, В.В. Березин, В.М. Коростелев и др. Заявл. 30.04.82; Опубл. 23.11.83.
2. Патент РФ № 2208778. Способ бесконтактного контроля теплофизических свойств материалов / В.Н. Чернышов, Э.В. Сысоев и др. Заявл. 12.01.2001; Опубл. 20.07.2003.
3. Цветков Э.И. Алгоритмические основы измерений. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 254 с.

Кафедра «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»