

А.С. Селянина, А.О. Антонов*

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При разработке, испытании и эксплуатации изделий из многослойных материалов необходимо иметь информацию о теплофизических свойствах как отдельных слоев, так и всей конструкции в целом, так как эти свойства являются параметрами, определяющими надежность, работоспособность, а в итоге и качество готовых объектов.

Среди методов и средств контроля особое место занимают неразрушающие методы определения теплофизических свойств (ТФС) материалов и изделий. При этом, реализация контактного метода неразрушающего контроля (НК) ТФС усложнена тем, что тепловое воздействие и получение измерительной информации в ходе эксперимента возможно осуществлять только на ограниченном участке поверхности исследуемого объекта. Поэтому наиболее важной и сложной задачей при создании теплового метода НК ТФС является разработка математической модели, адекватно описывающей реальный процесс теплопереноса в объекте [1].

Цель работы состоит в разработке и исследовании новых информационно-измерительной системы и реализуемого ею метода НК ТФС двухслойных изделий.

Теоретическое обоснование метода. Ограниченный стержень толщиной h_1 изготовлен из материала, имеющего следующие теплофизические свойства: теплопроводность λ_1 ; температуропроводность a_1 ; тепловую активность ε_1 . Данный ограниченный стержень приведен в соприкосновение с полуограниченным стержнем, имеющим другие термические коэффициенты ($\lambda_2, a_2, \varepsilon_2$). Боковые поверхности

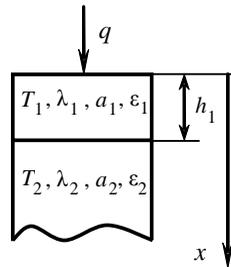


Рис. 1. Схема системы

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ГОУ ВПО ТГТУ Н.Ф. Майниковой.

стержней теплоизолированы. На протяжении всего процесса нагрева действует источник тепла постоянной мощности q . Требуется найти распределение температуры (T_1 и T_2) по длине стержней (x) в любой момент времени (τ).

Математически задача записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 < x < h_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, h_1 < x < \infty; \quad (2)$$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; \quad (3)$$

$$T_1(h_1, \tau) = T_2(h_1, \tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(h_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(h_1, \tau)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = q; \quad (6)$$

$$T_2(\infty, \tau) = 0. \quad (7)$$

Решение:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\tau}}{\varepsilon_2} + \left(1 - \frac{\varepsilon_1^2}{\varepsilon_2^2}\right) \frac{qh_1}{\lambda_1}. \quad (8)$$

Решение задачи (1) – (7) для первого стержня имеет вид:

$$T_1(x, \tau) = \frac{q}{\varepsilon_1} \left(2\sqrt{\tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\tau a_1}} \right) + 2\sqrt{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} (h^*)^n \times \right. \\ \left. \times \left(\operatorname{ierfc} \left(\frac{2nh_1 - x}{2\sqrt{\tau a_1}} \right) + \operatorname{ierfc} \left(\frac{2nh_1 + x}{2\sqrt{\tau a_1}} \right) \right) \right). \quad (9)$$

Здесь

$$h^* = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}; \quad K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Введем обозначения:

$$Fo = \frac{a_1 \tau}{(h_1)^2}; \quad \tilde{x} = \frac{x}{h_1}; \quad \Theta_1 = \frac{T_1 \lambda_1}{qh_1},$$

где Fo – безразмерное время (число Фурье); \tilde{x} – безразмерная координата; K_a – относительная теплопроводность тел; Θ_1 – безразмерная температура.

При $\tilde{x} = 0$ формула (9) преобразуется к виду:

$$\Theta_1(0, Fo) = 2\sqrt{Fo} \left(\frac{1}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(2(h^*)^n \operatorname{ierfc} \left(\frac{n}{\sqrt{Fo}} \right) \right) \right). \quad (10)$$

При больших значениях Fo формула (10) имеет вид:

$$\Theta_1(0, Fo) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{2h^*}{h^* - 1} \right) \sqrt{Fo} - \frac{4h^*}{(h^* - 1)^2}. \quad (11)$$

Получены решения задачи (1) – (7) в размерном и безразмерном представлениях для второго тела рассматриваемой системы.

Измерительная схема метода (рис. 2). Исследуемое тело представляет собой образец, состоящий из двух слоев: первый слой – например, металлический с теплофизическими свойствами $\lambda_1, c_1, a_1, \varepsilon_1$; второй – полимерный с теплофизическими свойствами $\lambda_2, c_2, a_2, \varepsilon_2$. Толщина первого слоя – h_1 , второго – h_2 . Температура соприкасающихся поверхностей первого и второго слоя одинакова. Длина и ширина тела – L_1 и L_2 , соответственно. Воздействие на исследуемое тело осуществляется с помощью источника тепла (Н1) постоянной мощности q , выполненного в виде тонкого диска радиусом R , встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Подложка ИЗ выполнена из рипора – хорошего теплоизолятора, что обеспечивает направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствует теплообмену в других направлениях. Теплофизические свойства подложки – $\lambda_3, c_3, a_3, \varepsilon_3$. Охранное кольцо (ОК) представляет собой нагреватель (Н2), предназначенный для реализации одномерного температурного поля в исследуемом объекте. Температура в точках контроля измеряется с помощью термоэлектрических преобразователей (ТП), расположенных в центре нагревателя (ТП1) и в области охранного кольца (ТП2). Нагреватель начинает действовать в начальный момент времени ($\tau = 0$). В ходе эксперимента фиксируются термограммы – зависимости значений температуры (T) в точках контроля от времени (τ).

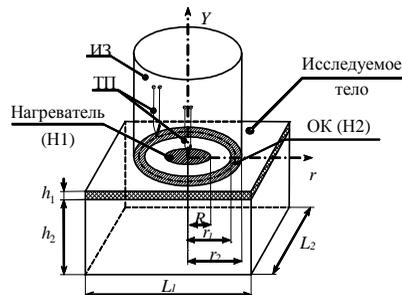


Рис. 2. Измерительная схема метода

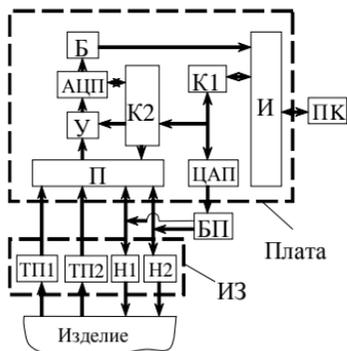


Рис. 3. Структурная схема ИИС

рез мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс (И) в ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов и различные диапазоны измерения на каждом из них.

Таким образом, разработанные ИИС, метод НК могут быть использованы для контроля толщины защитных покрытий, размеров слоев в многослойных изделиях, для определения ТФС материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М. : Машиностроение–1, 2004. – 288 с.

Структурная схема ИИС (рис. 3). ИИС состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы, ИЗ, регулируемого блока питания (БП).

В подложку ИЗ встроены круглый нагреватель постоянной мощности в виде диска (Н1) и нагреватель в виде кольца (Н2). Мощность и длительность теплового воздействия БП задаются программно через интерфейс (И), контроллер К1, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Сигналы с ТП1 и ТП2 поступают через