

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ

Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, А.А. Балашов

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

**Ключевые слова и фразы:** математическая модель; неразрушающий контроль; полимерные материалы; структурные переходы; тепловая активность; теплоемкость; теплопроводность; теплофизические свойства; температуропроводность.

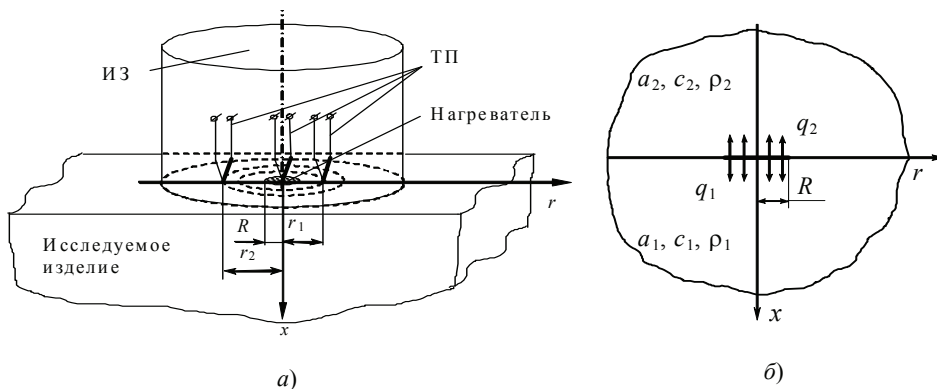
**Аннотация:** Разработан экспресс-метод теплового неразрушающего контроля температурно-временных характеристик структурных превращений (фазовых и релаксационных) в полимерных материалах. Представлены теоретические основы нового метода неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах.

Согласно измерительной схеме системы «изделие–зонд» (рис. 1, *a*), тепловое воздействие на исследуемое полимерное тело, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью нагревателя постоянной мощности, выполненного в виде тонкого диска радиусом  $R$ , встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Начальное температурное распределение контролируется одновременно несколькими (не менее трех) термоэлектрическими преобразователями (ТП), расположенными в центре нагревателя и на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от центра. Центральным ТП в ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость избыточной температуры  $T$  (или температуры изделия  $T^*$ ) от времени.

Аналитически решить задачу нестационарного теплопереноса в системе «исследуемое полимерное изделие–зонд» при наличии структурного превращения в полимерных материалах (ПМ) затруднительно, так как неизвестны изменения теплофизических свойств (ТФС) полимерного материала в температурном интервале структурного превращения и закон движения границы структурного перехода.

---

Жуков Н.П. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и теплотехника», e-mail: teplotehnika@nnn.tstu.ru; Майникова Н.Ф. – доктор технических наук, профессор кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; Рогов И.В. – кандидат технических наук, докторант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Балашов А.А. – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гидравлика и теплотехника», ТамбГТУ, г. Тамбов.



**Рис. 1. Схемы системы «изделие–зонд»:**  
*a* – измерительная; *б* – тепловая

Известные решения краевых задач нестационарной теплопроводности, описывающие процесс распространения тепла в твердом теле при наличии структурного превращения, имеют сложные решения, которые непригодны для использования при неразрушающем контроле.

В основе разработанного метода неразрушающего контроля (НК) температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах лежат следующие предположения.

1. При нагреве тела из полимерного материала вне зоны структурных превращений существует температурно-временной интервал, в котором соблюдаются условия одномерного распространения тепла в плоском полупространстве. На этом интервале можно выделить рабочий участок, соответствующий локальной регуляризации теплового процесса в ограниченной зоне исследуемого тела.

2. В температурно-временном интервале рабочего участка (вне зоны структурного превращения) изменения ТФС полимерного материала незначительны.

3. Теплофизические свойства полимерного материала в зоне структурного превращения изменяются существенно.

4. Структурные превращения в ПМ, сопровождающиеся тепловыми эффектами, проявляются на экспериментальных термограммах и могут быть выявлены в виде отклонений от аналитических моделей.

Регулярные тепловые режимы первого и второго рода имеют общее свойство, которое характеризуется независимостью от времени отношения теплового потока в любой точке тела к потоку тепла на его поверхности, что показано А.В. Лыковым [1]. Математическая модель, описывающая термограмму, в данном случае чаще всего является линейной по параметрам или легко линеаризуется. Однако основная часть этих методов базируется на моделях для тел конечных размеров (пластина, цилиндр, шар). В то время, как методы НК базируются на моделях полупространства (плоского, цилиндрического, сферического). Применительно к таким моделям следует говорить не о регулярном тепловом режиме для всего тела в целом (так как оно принимается неограниченным), а о регуляризации теплового процесса только для какой-то определенной области тела. Следовательно, если проводить НК ТФС, основываясь только на участках термограммы, соответствующих регуляризации теплового режима в области

нагревателей и термоприемников, то расчетные соотношения будут простыми и во многих случаях линейными по параметрам.

Для получения уравнения, описывающего процесс распространения тепла в системе «полимерное изделие–зонд» вне зоны структурного превращения, была использована модель плоского полупространства с бесконечным плоским нагревателем при регуляризации тепловых потоков.

**Постановка задачи.** Даны два полуограниченных тела при начальной температуре  $T(x, 0) = 0$ . В плоскости соприкосновения тел постоянно действует источник тепла с удельной поверхностной мощностью

$$q = q_1 + q_2 + c_n \frac{\partial T_6(0, \tau)}{\partial \tau},$$

имеющий теплоемкость  $c_n$  (см. рис. 1, б). В математической форме задача записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x > 0, \quad \tau > 0; \\ \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x < 0, \quad \tau > 0; \\ T_1(x, 0)|_{x \geq 0} &= T_2(x, 0)|_{x \leq 0} = 0; \\ T_1(\infty, \tau) &= T_2(-\infty, \tau) = 0; \\ T_1(+0, \tau) &= T_2(-0, \tau) = T_6(0, \tau); \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1(+0, \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(-0, \tau)}{\partial x} &= q - c_n \frac{\partial T_6(0, \tau)}{\partial \tau}; \quad \tau > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2$  – значения избыточной температуры, тепловая активность и теплопроводность материалов исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно;  $c_n$  – теплоемкость единицы площади нагревателя;  $T_6$  – температура бесконечного плоского нагревателя.

Требуется найти распределение температурного поля в данной системе в любой момент времени.

Решение задачи, описывающее процесс распространения тепла в исследуемом полуограниченном теле для поверхностного слоя ( $x = 0$ ) в предположении отсутствия структурного перехода, имеет вид

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} + \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \exp\left[\frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}{c_n^2} \tau\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{c_n} \sqrt{\tau}\right]. \quad (2)$$

В области больших значений  $\frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{c_n} \sqrt{\tau}$  выражение (2) представим в виде

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}. \quad (3)$$

Показано, что температурное поле в исследуемой системе, полученное численным моделированием температурных полей методом конечных элементов с помощью пакета ELCUT, близко аналитической модели (3) в температурно-временном интервале рабочего участка [2]. На рис. 2 представлены термограммы, построенные с помощью численного моделирования (термограмма 1) при использовании измерительной схемы: «изделие–зонд» (см. рис. 1, а, центральная термопара) и по зависимости (3) (термограмма 2).

Термограммы построены для условий: исследуемое изделие изготовлено из политетрафторэтилена (ПТФЭ); материал подложки зонда – Рипор;  $q = 10000 \text{ Вт/м}^2$ ;  $R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $c_1 = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\rho_1 = 2200 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_1 = 0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\varepsilon_1 = 743,47 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $c_2 = 1270 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\rho_2 = 50 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_2 = 0,028 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\varepsilon_2 = 42,17 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{0,5}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $\Delta\tau = 0,5 \text{ с}$ ; где  $c_1, c_2, \rho_1, \rho_2$  – удельные теплоемкости и плотности ПТФЭ и Рипора, соответственно;  $\Delta\tau$  – временной шаг определения температуры.

На термограммах (см. рис. 2) выделены участки, соответствующие различным состояниям температурного поля исследуемой системы. Первому участку термограммы соответствует одномерное температурное поле в исследуемом изделии. Тепловые потоки, поступающие в исследуемое изделие  $q_1$  и зонд  $q_2$ , изменяются во времени, так как между нагревателем и исследуемым изделием имеется контактное тепловое сопротивление и нагреватель обладает инерционностью. Второму (рабочему) участку термограмм отвечает одномерное температурное поле в исследуемом изделии, процесс соответствует стадии регуляризации. Тепловые потоки, поступающие в исследуемое изделие и зонд, становятся практически постоянными (рис. 4). Третьему участку термограммы соответствует двухмерное температурное поле в исследуемом изделии, поскольку нельзя пренебречь распространением тепла в радиальном направлении. Тепловой поток, поступающий в исследуемое изделие, снова становится переменным.

Относительная погрешность определения температуры, обусловленная различием модели (3) и данных численного моделирования температурных полей методом конечных элементов, на рабочем участке термограммы (см. рис. 2, 3) не превышает 3 %.

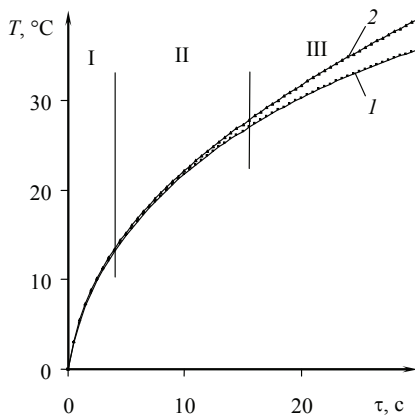


Рис. 2. Термограммы

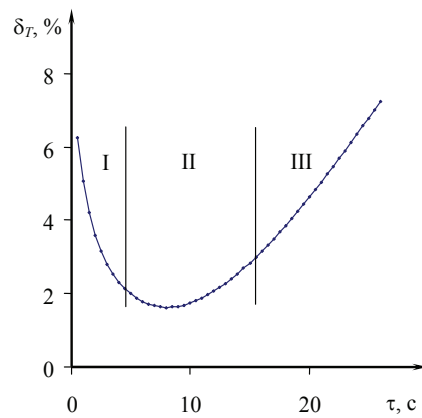
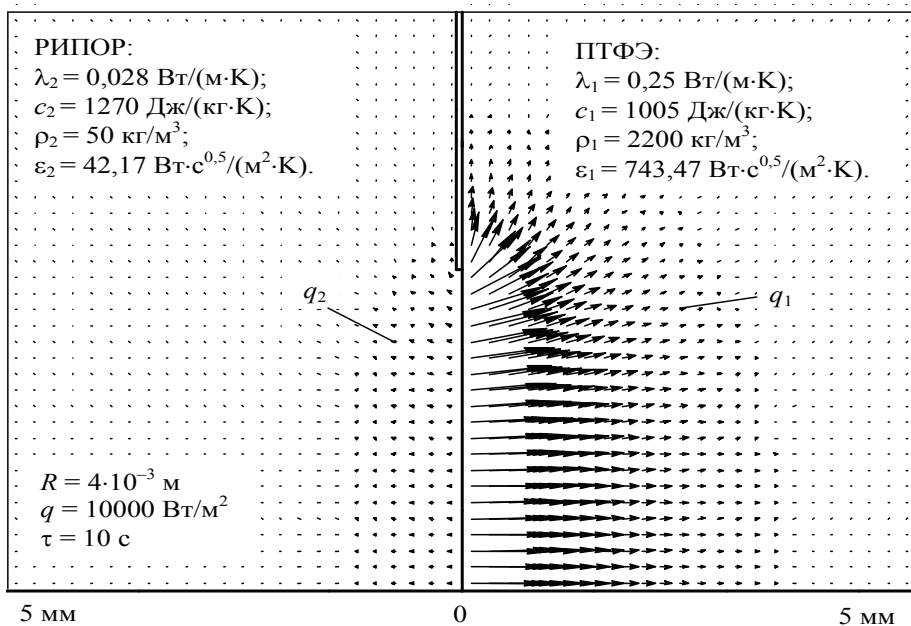


Рис. 3. Зависимость  $\delta_T = f(\tau)$



**Рис. 4. Поле плотностей тепловых потоков от круглого нагревателя постоянной мощности в системе двух полуограниченных тел при идеальной теплоизоляции между ними**

Визуализация полей температурного и плотностей тепловых потоков (см. рис. 4) в рассматриваемой системе двух полуограниченных тел свидетельствует о реализации одномерного температурного поля, соответствующего стадии регуляризации тепловых потоков.

Для получения расчетных зависимостей, реализуемых информационно-измерительной системой (ИИС), обозначим  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon'$  и  $z = \sqrt{\tau}$ . Тогда уравнение (3) можно представить в виде

$$T(0, z) = d_1 z + d_0. \quad (4)$$

Здесь

$$d_1 = \frac{E}{\varepsilon + \varepsilon'}, \quad (5)$$

$$d_0 = -\frac{F}{(\varepsilon + \varepsilon')^2}, \quad (6)$$

$E = 2q/\sqrt{\pi}$ ,  $F = qc_H$ ,  $\varepsilon'$  – параметры ИИС, определяемые режимами опыта, ТФС материалов нагревателя и подложки зонда.

Из уравнения (5) получено соотношение для вычисления текущего значения коэффициента  $\varepsilon_i^*$  по каждому интервалу термограммы

$$\varepsilon_i^* = \frac{E}{d_{1i}} - \varepsilon', \quad (7)$$

где

$$E = \frac{d_{11}d_{12}}{d_{12} - d_{11}}(\varepsilon_{01} - \varepsilon_{02}); \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon_{01}d_{11} - \varepsilon_{02}d_{12}}{d_{12} - d_{11}}, \quad (8)$$

$$d_{1i} = \left[ \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} T_j (z_j - \bar{z}_i) \right] \left[ \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (z_j - \bar{z}_i)^2 \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$\bar{z}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} z_j, \quad (10)$$

$d_{1i}$  – текущие значения параметра  $d_1$ ;  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $\varepsilon_{01}$ ,  $\varepsilon_{02}$  – параметры  $d_1$  и тепловые активности образцовых мер.

Текущие значения параметра  $d_{0i}$ :

$$d_{0i} = T_s - d_{1i} \bar{z}_i, \quad (11)$$

$$T_s = \frac{1}{k} \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} T_j, \quad (12)$$

где  $T_s$  – средняя температура изделия из  $k$  измерений в каждом интервале;  $T_j$  – температура на  $j$ -м шаге измерения.

В предположении, что модель (7) на рабочем участке – случайный стационарный процесс (протекающий во времени однородно, частная реализация которого с постоянной амплитудой колеблется вокруг средней функции), тогда дисперсия по сечениям – постоянная величина.

Уравнение (4) соответствует рабочему участку термограммы. Оценки дисперсий текущих параметров  $d_{1i}$  и  $d_{0i}$  на этом участке, в случае отсутствия структурного превращения, можно считать постоянными. Их рассчитывают по формулам:

$$S_{d_{1i}}^2 = \frac{S_{T_i}^2}{\sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\sqrt{j\Delta\tau} - \bar{z}_i)^2}, \quad (13)$$

$$S_{d_{0i}}^2 = S_{T_i}^2 \left( \frac{1}{k} + \frac{\bar{z}_i^2}{\sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\sqrt{j\Delta\tau} - \bar{z}_i)^2} \right), \quad (14)$$

где  $S_{T_i}^2 = \frac{1}{k-2} \left\{ \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (T_j - \bar{T}_i)^2 - \frac{\left[ \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} T_j (\sqrt{j\Delta\tau} - \bar{z}_i) \right]^2}{\sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\sqrt{j\Delta\tau} - \bar{z}_i)^2} \right\}$  – оценка дис-

персии значений температуры.

Если в исследуемом изделии из ПМ происходит структурное превращение, которое сопровождается тепловым эффектом, то значения текущих параметров  $d_{1i}$  и  $d_{0i}$  существенно изменяются в узких временном и температурном интервалах. Построив зависимость одного из текущих параметров  $d_{1i}$ ,  $d_{0i}$  (или их дисперсий  $S_{d_{1i}}^2$ ,  $S_{d_{0i}}^2$ ) от температуры изделия  $T_s$ , по характерным пикам определяют температурные интервалы структурных превращений в ПМ без проведения калибровки ИИС [3].

#### *Список литературы*

1. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. ELCUT : Моделирование двухмерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
3. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 288 с.

---

### **Method of Non-Destructive Control over Temperature Characteristics for Structural Transformations in Polymer Materials**

**N.P. Zhukov, N.F. Mainikova, I.V. Rogov, A.A. Balashov**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** mathematical model; non-destructive control; polymer materials; structural transformations; heat activity; heat capacity; heat conductivity; thermo-physical properties; thermal conductivity.

**Abstract:** The paper presents the developed express method of non-destructive control over time and temperature characteristics of structural transformations (phase and relaxation) in polymer materials.

---

© Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова,  
И.В. Рогов, А.А. Балашов, 2010