

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ТВЕРДОФАЗНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ**

Н. П. Жуков, И. В. Рогов, О. Н. Попов

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. Ф. Майникова

Ключевые слова и фразы: математическая модель; неразрушающий контроль; полимерный материал; структурный переход.

Аннотация: Сформулирована краевая задача нестационарной теплопроводности применительно к методу неразрушающего контроля твердофазных переходов в полимерах. Приведено решение задачи, описывающее процесс распространения тепла в исследуемом полугограниченном теле в предположении отсутствия структурного перехода. Предложена методика реализации неразрушающего контроля структурных переходов в полимерных материалах.

Известны тепловые методы неразрушающего контроля (**НК**), позволяющие определять теплофизические свойства (**ТФС**) твердых материалов и температурные характеристики твердофазных переходов в полимерных материалах [1 – 3], среди которых следует выделить контактные зондовые методы НК ТФС и НК структурных переходов в полимерных материалах (**ПМ**) по изменениям их ТФС с ростом температуры.

Методы реализуются с помощью измерительных систем [4 – 7]. Теплофизические свойства определяют по рабочим участкам нескольких термограмм, полученных при тепловом воздействии на поверхность полимерного объекта исследования от круглого источника тепла постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда (**ИЗ**).

Жуков Николай Павлович – доктор технических наук, кандидат химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», e-mail: teplotehnika@nntn.tstu.ru; Рогов Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; Попов Олег Николаевич – ассистент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ТамбГТУ, г. Тамбов.

По моделям плоского и сферического распространения тепла рассчитывают ТФС, а значение температуры перехода определяют по аномалиям ТФС на температурных зависимостях с помощью статистических критериев. Однако данные методы имеют существенные ограничения по времени и температуре, так как реализуется квазистационарная стадия.

Известно, что при распространении тепла от линейного источника постоянной мощности в полуограниченном теле нет ограничений по времени нагрева, квазистационарная стадия не реализуется, скорость нагрева, при прочих равных условиях, выше, чем в методе, использующем круглый источник тепла [8, 9]. При применении двух линейных источников тепла на поверхности исследуемого объекта в области, расположенной между ними, градиент температуры меньше, чем при использовании одного линейного источника тепла, что позволяет более точно определить структурный переход. Возможно расширение температурного диапазона исследования при одной реализации эксперимента (с одновременным увеличением скорости движения границы структурного перехода).

В статье представлено теоретическое обоснование процесса теплопроводности от двух линейных нагревателей в полуограниченном теле.

Согласно измерительной схеме, представленной на рис. 1, тепловое воздействие на исследуемое полимерное тело, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью двух линейных нагревателей постоянной мощности, встроенных в подложку ИЗ. Начальное температурное распределение контролируется одновременно тремя термоэлектрическими преобразователями ТП1 – ТП3, расположенными на поверхности подложки ИЗ: ТП1 – на линии центральной оси ИЗ; ТП2 и ТП3 – на расстояниях x' по обе стороны от оси (на центральных линиях нагревателей). В ходе эксперимента фиксируются зависимости избыточной температуры $T_{ТП1}$, $T_{ТП2}$, $T_{ТП3}$ от времени, а также значения разностей значений температуры на нагревателях и в точке, расположенной на центральной оси ИЗ.

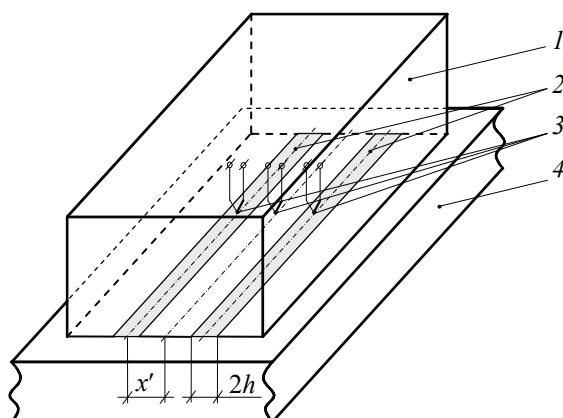


Рис. 1. Измерительная схема метода:

1 – подложка ИЗ; 2 – нагреватели; 3 – термоэлектрические преобразователи;
4 – исследуемое изделие

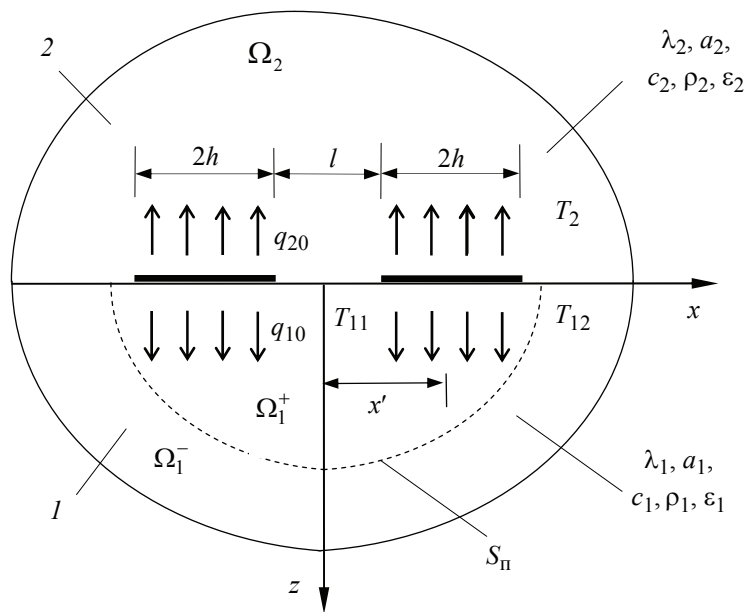


Рис. 2. Тепловая схема:
 1 – исследуемое изделие; 2 – подложка ИЗ

Тепловая схема метода представлена на рис. 2. В начальный момент времени температура тела во всех точках пространства одинакова и равна нулю. В момент времени $\tau = 0$ на поверхности тела начинают действовать два источника постоянной мощности с линейной мощностью q_0 каждый, обладающие удельной теплоемкостью c_n .

При температуре $T = T_n$ материал 1 имеет фазовый переход (ФП), сопровождающийся тепловым эффектом Q_n . Теплофизические свойства тела 1 в результате ФП меняются незначительно.

Введем обозначения: $T_{11}(x, z, \tau)$, $T_{12}(x, z, \tau)$ – распределения температур в исследуемом изделии в первой и второй фазах соответственно, °C; $T_{11}(x, z, \tau)$ описывает температурное поле в пределах области $\Omega_1^+(\tau) = \{(x, z) \in \Omega_1, T_{11}(x, z, \tau) > T_n\}$, а $T_{12}(x, z, \tau)$ – в пределах области $\Omega_1^-(\tau) = \{(x, z) \in \Omega_1, T_{12}(x, z, \tau) < T_n\}$, где $T_n = T(S_n, \tau)$ – температура ФП, который происходит на границе раздела двух фаз $S_n = S_n(x_n, y_n, \tau)$ (разделяет расчетную область Ω_1 на две подобласти: $\Omega_1^+(\tau)$ и $\Omega_1^-(\tau)$, в первой из которых температура твердой фазы превышает температуру ФП, а во второй – не превышает); $T_1, T_2, a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \rho_1, \rho_2$ – значения избыточной температуры, °C; температуропроводности, m^2/c ; теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$, теплоемкости, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$; тепловой активности, $Вт \cdot c^{0.5}/(m^2 \cdot ^\circ C)$; плотности материалов, $кг/м^3$, исследуемого изделия и подложки ИЗ соответственно.

Математическая постановка задачи:

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_{11}(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{11}(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{11}(x, z, \tau)}{\partial z^2},$$

$$\Omega_1^+(\tau) = \{(x, z) \in \Omega_1, T_{11}(x, z, \tau) > T_n\}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_{12}(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_{12}(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{12}(x, z, \tau)}{\partial z^2},$$

$$\Omega_1^-(\tau) = \{(x, z) \in \Omega_1, T_{12}(x, z, \tau) < T_n\}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial z^2}, \quad (x, z) \in \Omega_2, T_2(x, z, \tau) > T_0; \quad (3)$$

$$T_1(x, z, 0) = T_2(x, z, 0) = T_0; \quad (4)$$

$$T_1(x, 0, \tau) = T_2(x, 0, \tau); \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 < |x| < \frac{l}{2}; \\ q_{10}, & \frac{l}{2} < |x| < \frac{l}{2} + 2h; \\ 0, & \frac{l}{2} + 2h < |x|; \end{cases} \quad (6)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 < |x| < \frac{l}{2}; \\ q_{20}, & \frac{l}{2} < |x| < \frac{l}{2} + 2h; \\ 0, & \frac{l}{2} + 2h < |x|; \end{cases} \quad (7)$$

$$q_{10} + q_{20} = q_0 - q'_0; \quad (8)$$

$$T_1(x, z, \tau) = T_2(x, z, \tau) = T_0, \quad x^2 + z^2 \rightarrow \infty; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_1(0, z, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_2(0, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (10)$$

$$\lambda_{11} \sqrt{\left(\frac{\partial T_{11}(S_n, \tau)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{11}(S_n, \tau)}{\partial z}\right)^2} - \lambda_{12} \sqrt{\left(\frac{\partial T_{12}(S_n, \tau)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{12}(S_n, \tau)}{\partial z}\right)^2} = V_n Q_n; \quad (11)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} \lambda_{11}, & T_1(x, z, \tau) < T_n; \\ \lambda_{12}, & T_1(x, z, \tau) > T_n; \end{cases} \quad (12)$$

$$T_n = T(x, z, \tau), \quad (x, y) \in S_n(\tau), \quad (13)$$

где $\lambda_{11}, \lambda_{12}$ – значения теплопроводности исследуемого изделия до ФП и после соответственно, Вт/(м·°C); $2h$ – ширина нагревателя, м; l – расстояние между нагревателями, м; $V_{\text{п}}$ – скорость движения границы ФП, °C/мин; $Q_{\text{п}}$ – теплота, поглощенная (выделившаяся) при ФП, Вт; q_0 – мощность, выделяющаяся на единице длины нагревателя, Вт/м; q_{10}, q_{20}, q'_0 – части мощности, идущие на нагрев исследуемого изделия, материала подложки ИЗ и разогрев нагревателя соответственно, Вт/м.

Решение задачи, описывающее процесс распространения тепла в исследуемом полуограниченном теле в предположении отсутствия ФП, получено по принципу суперпозиции на основании известных ранее решений [9]:

$$T_1(x, 0, \tau) = \frac{q_{10} a^{0,5} \tau^{0,5}}{\pi^{0,5} \lambda_1} \times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{h + (x - x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h + (x - x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h + (x - x'))^2}{4a_1 \tau} \right] + \right. \\ + \operatorname{erf} \left[\frac{h - (x - x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h - (x - x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h - (x - x'))^2}{4a_1 \tau} \right] + \\ + \operatorname{erf} \left[\frac{h + (x + x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h + (x + x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h + (x + x'))^2}{4a_1 \tau} \right] + \\ \left. + \operatorname{erf} \left[\frac{h - (x + x')}{2a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \right] - \frac{h - (x + x')}{2\pi^{0,5} a_1^{0,5} \tau^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h - (x + x'))^2}{4a_1 \tau} \right] \right\}, \quad (14)$$

где τ – время, с; x – координата, м; h – половина ширины нагревателя, м; x' – расстояние от центра измерительного зонда до середины нагревателя, м.

Выражение для температуры поверхности $z = 0$ в точке с координатой x от действия двух нагревателей для больших значений τ имеет вид

$$T_1(x, 0, \tau) = \frac{q_{10} h}{\pi \lambda_1} \left\{ 2 \ln \left(\frac{a_1 \tau}{h^2} \right) + 4 - 2\gamma + 4 \ln(2) - \right. \\ - \frac{h + (x + x')}{2h} \ln \left(\frac{h + (x + x')}{h} \right)^2 - \frac{h - (x - x')}{2h} \ln \left(\frac{-h + (x - x')}{h} \right)^2 - \\ \left. - \frac{h + (x - x')}{2h} \ln \left(\frac{h + (x - x')}{h} \right)^2 - \frac{h + (-x - x')}{2h} \ln \left(\frac{h - (x + x')}{h} \right)^2 \right\}. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) позволяют определять величину теплового потока q_{10} , который подает в материал каждый нагреватель, и действитель-

ный перепад значений температуры ΔT между центральной осью ИЗ и центральной линией нагревателя:

$$q_{10} = \frac{\Delta T \pi \lambda_1}{p}, \quad (16)$$

где p – переменная, отражающая конструктивные особенности ИЗ.

Полученное решение (16) позволяет определить оптимальное расположение нагревателей относительно оси ИЗ в целях обеспечения заданной величины перегрева для конкретного полимерного объекта исследования.

Реализация метода НК температурных характеристик твердофазных переходов в ПМ предусматривает нагрев исследуемого объекта двумя линейными источниками тепла постоянной мощности, обработку регистрируемых термограмм нагрева в контролируемых точках по математической модели распространения тепла. Температуру перехода определяют:

- по аномалиям на температурных зависимостях ТФС исследуемого объекта, рассчитываемых по упрощенной модели (с учетом калибровки измерительной системы на материалах с известными ТФС);
- существенным изменениям параметров модели и их дисперсий в температурном интервале перехода;
- изменениям скоростей нагрева в контролируемых точках объекта за счет теплового эффекта структурного превращения.

Список литературы

1. Чернышова, Т. И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. И. Чернышова, В. И. Чернышов. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 240 с.
2. Об одном методе термического анализа для неразрушающего контроля теплофизических свойств полимеров / Н. Ф. Майникова [и др.] // Пласт. массы. – 2001. – № 2. – С. 30 – 33.
3. Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н. Ф. Майникова [и др.] // Пласт. массы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
4. Жуков, Н. П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 2. – С. 153 – 154.
5. Жуков, Н. П. Измерительно-вычислительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 4. – С. 164 – 166.
6. Майникова, Н. Ф. Измерительная система и метод неразрушающего контроля структурных превращений в полимерных материалах / Н. Ф. Майникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 1. – С. 56–61.
7. Мищенко, С. В. Информационно-измерительная система неразрушающего теплового контроля / С. В. Мищенко, Н. Ф. Майникова // Приборы. – 2009. – № 4. – С. 20 – 24.
8. Теоретическое обоснование метода неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 296 – 302.
9. Математическое моделирование теплопереноса от двух нагревателей в полуограниченном теле / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 327 – 332.

References

1. Chernyshova T.I., Chernyshov V.I. *Metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov* (Methods and means of nondestructive testing of thermal properties of materials), Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 240 p.
2. Mainikova N.F., Muromtsev Y.L., Rogov I.V., Balashov A.A. *International Polymer Science and Technology*, 2001, vol. 28, no. 11, pp. T/15-18.
3. Mainikova N.F., Muromtsev Yu.L., Zhukov N.P., Balashov A.A. *International Polymer Science and Technology*, 2003, vol. 30, no. 4, pp. T/33-36.
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2005, no. 2, pp. 153-154.
5. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2005, no. 4, pp. 164-166.
6. Mainikova, N.F. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 1, pp. 56-61.
7. Mishchenko S.V., Mainikova N.F. *Pribory*, 2009, no. 4, pp. 20-24.
8. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 296-302.
9. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 327-332.

Theoretical Substantiation of Nondestructive Testing of Solid-Phase Transitions in Polymers

N. P. Zhukov, I. V. Rogov, O. N. Popov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: mathematical model; nondestructive testing; polymeric material; structural transition.

Abstract: The boundary value problem of transient heat transfer is formulated in the context of nondestructive testing of solid-phase transitions in polymers. We described the solution of the heat transfer problem in semi-infinite body without structural transition. The technique of nondestructive testing of structural transitions in polymeric materials was proposed.

© Н. П. Жуков, И. В. Рогов, О. Н. Попов, 2014