**УДК 621.1.08**

***Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, А.С. Чех, С.С. Никулин***

# *МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ*

Известные решения краевых задач теплопроводности стефановского типа сложны для их использования в методах неразрушающего контроля (НК) релаксационных переходов в полимерных материалах [1, 2]. Указанные обстоятельства требуют разработки новых моделей, пригодных к использованию при НК структурных переходов, в том числе релаксационных.

Разработанный метод НК включает: тепловое воздействие на участок поверхности исследуемого полимерного тела от плоского круглого источника тепла постоянной мощности, встроенного в измерительный зонд; одновременное фиксирование температурных откликов (термограмм) в заданных точках поверхности тела несколькими термопарами; пошаговую обработку термограмм по разработанным алгоритмам с помощью информационно-измерительной системы (ИИС); фиксирование аномалий теплофизических характеристик (ТФХ) на температурных зависимостях [3].

Распространение тепла в твердых полуограниченных телах от плоского круглого нагревателя постоянной мощности, расположенного в плоскости их контакта, с учетом тепловых эффектов возможных структурных переходов в одном из тел, описывается следующей системой дифференциальных уравнений (с соответствующими начальными и граничными условиями):

$$\frac{\partial T_1(r,z,\tau)}{\partial\tau}=a_1\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial T_1(r,z,\tau)}{\partial r}\right]+\frac{\partial^2 T_1(r,z,\tau)}{\partial z^2}\right)+\frac{F_\text{п}(r,z,\tau)}{c_1\rho_1},$$

$$(\tau>0, z>0, r\geq 0);$$

$$\frac{\partial T_2(r,z,\tau)}{\partial\tau}=a_2\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial T_2(r,z,\tau)}{\partial r}\right]+\frac{\partial^2 T_2(r,z,\tau)}{\partial z^2}\right),(\tau>0, z<0, r\geq 0);$$

где $F_\text{п}$ – количество поглощаемого или выделяемого тепла в единицу времени в единице объема исследуемого полимерного тела при структурном переходе.

Определить распределения температурных полей в данной системе в любой момент времени с учетом теплового эффекта $F_\text{п}$ затруднительно, вследствие нелинейности задачи.

В основе метода лежат следующие предположения.

1 На термограмме имеются участки (рабочие), для которых вне зоны структурного превращения обеспечивается высокая точность совпадения результатов вычислительных экспериментов по аналитическим моделям с экспериментальными данными. Рабочим участкам соответствуют тепловые режимы опыта, вышедшие на стадии регуляризации [3].

2 ТФХ исследуемого материала до и после структурного превращения различаются несущественно в температурном интервале, соответствующем рабочему участку термограммы.

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

Метод НК предусматривает выделение на термограммах нескольких участков, которые достаточно точно описываются аналитическими зависимостями, полученными при решении краевых задач теплопроводности с учетом ТФХ материалов, контактных сопротивлений и теплоемкостей элементов устройства и других факторов. Метод применен на моделях плоского и сферического полупространств, как на стадии нагрева, так и на стадии остывания [3]. Рассмотрим постановку и решение одной из таких задач.

Известно, что распределение температурного поля в исследуемом теле от плоского круглого источника тепла постоянной мощности радиуса $R_\text{п}$ при $\tau >> 0$ близко к распределению температурного поля в сферическом полупространстве со сферической полостью радиуса $R$, через которую осуществляется заданное тепловое воздействие с тем же тепловым потоком. Расчетное уравнение, описывающее термограмму на рабочем участке вне зоны структурного превращения, получено решением следующей краевой задачи.

Два полуограниченных тела с различными ТФХ (рис. 1) находятся в идеальном тепловом контакте с поверхностным сферическим источником тепла постоянной мощности радиуса $R$ и плотностью теплового потока $q = q_1 + q_2$ при температуре $T(r, \theta, 0) = 0$. Вне сферы, в плоскости соприкосновения двух тел, существует тонкая идеальная теплоизоляция. Математически данная задача записывается следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\tau} = a_1\left(\frac{\partial^2 T_1(r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\right)\right);$$

$$\left(r > R,\ 0 \le \theta < \frac{\pi}{2},\ \tau > 0\right); \tag{1}$$

$$\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\tau} = a_2\left(\frac{\partial^2 T_2(r,\theta,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial r} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\right)\right);$$

$$\left(r > R,\ \frac{\pi}{2} < \theta \le \pi,\ \tau > 0\right); \tag{2}$$

$$T_1(r,\theta,0)\Big|_{\substack{r\ge R\\ 0\le\theta\le\frac{\pi}{2}}} = 0, \quad T_2(r,\theta,0)\Big|_{\substack{r\ge R\\ \frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi}} = 0;$$

$$T_1(\infty,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ 0\le\theta<\frac{\pi}{2}}} = T_2(\infty,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ \frac{\pi}{2}<\theta\le\pi}} = 0,\ T_1(R,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ 0\le\theta\le\frac{\pi}{2}}} = T_2(R,\theta,\tau)\Big|_{\substack{\tau>0\\ \frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi}};$$

$$\frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\frac{\pi}{2}-0\\ r>R\\ \tau>0}} = \frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\frac{\pi}{2}+0\\ r>R\\ \tau>0}} = 0,\ \frac{\partial T_1(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=0\\ r>R\\ \tau>0}} = \frac{\partial T_2(r,\theta,\tau)}{\partial\theta}\Big|_{\substack{\theta=\pi\\ r>R\\ \tau>0}} = 0, \tag{3}$$

$$-\lambda_1\frac{\partial T_1(R,\theta,\tau)}{\partial r}\Big|_{0\le\theta<\frac{\pi}{2}-0} = q_1, \quad -\lambda_2\frac{\partial T_2(R,\theta,\tau)}{\partial r}\Big|_{\frac{\pi}{2}+0<\theta\le\pi} = q_2, \quad \tau > 0.$$

Так как градиент температуры в каждом из рассматриваемых полуограниченных тел не зависит от координаты θ, и с учетом условия (3) решение задачи для первого (исследуемого) тела имеет вид [3]

$$T_1(r,\tau) = -\left(\frac{2qR^2(r-R)}{\sqrt{\pi}\sqrt{a_1}\,r(\lambda_1+\lambda_2)} + \frac{2qR^3(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{\sqrt{\pi}\,r(\lambda_1+\lambda_2)^2}\right)\frac{1}{\sqrt{\tau}} + \frac{2qR^2}{(\lambda_1+\lambda_2)r},\left(0\le\theta<\frac{\pi}{2}\right), \tag{4}$$

где $\lambda_1$, $\varepsilon_1$, $\lambda_2$, $\varepsilon_2$ – соответственно теплопроводности и тепловые активности первого и второго тел.

При равенстве тепловых потоков от моделируемых круглого и поверхностного сферического источников тепла (при определенном соотношении их радиусов) уравнение (4) адекватно реальному тепловому процессу вне зоны структурного превращения на определенном временном интервале. Решение (4) может быть использовано в методе НК структурных переходов полимеров.

Преобразуем выражение (4) к виду:

$$T(r,\tau) = b_1 t + b_0, \tag{5}$$

где

$$b_1 = -\left(\frac{CB\varepsilon}{(\lambda+\lambda')\lambda} + \frac{B^2(\varepsilon+\varepsilon')}{A(\lambda+\lambda')^2}\right); \tag{6}$$

$$b_0 = \frac{B}{\lambda+\lambda'}; \tag{7}$$

$$t=\frac{1}{\sqrt{\tau}};\quad A=\frac{2q\sqrt{\pi}R}{r};\quad B=\frac{2qR^2}{r};$$

$$C=\frac{(r-R)}{\sqrt{\pi}};\ \lambda_1=\lambda;\ \lambda_2=\lambda';\ \varepsilon_1=\varepsilon;\ \varepsilon_2=\varepsilon'.$$

Параметры $A$, $B$, $C$, $\lambda'$, $\varepsilon'$ – постоянные прибора, учитывающие конструктивные особенности устройства и режимы опыта; $\lambda$, $\varepsilon$ – теплопроводность и тепловая активность исследуемого тела.

Постоянные прибора определяются из градуировочных экспериментов, значения коэффициентов $b_0$ и $b_1$ – по термограммам методом наименьших квадратов. Используя формулу (7), текущие значения $\lambda_n^*$ для $n$-й термопары:

$$\lambda_n^*=\frac{B_n}{b_{0i_n}}-\lambda'_n,\quad B_n=\frac{b_{01_n}b_{02n}}{b_{02_n}-b_{01_n}}(\lambda_{01}-\lambda_{02}),\quad \lambda'_n=\frac{\lambda_{01_n}b_{01_n}-\lambda_{02_n}b_{02n}}{b_{02n}-b_{01n}},$$

(8)

здесь $n$ – порядковый номер термопары, считая от центра зонда; $B_n$, $\lambda'_n$ – постоянные прибора для $n$-й термопары; $b_{0i_n}$ – текущие значения коэффициента; $\lambda_{01}$, $\lambda_{02}$ – теплопроводности образцовых мер; $b_{01_n}$, $b_{02_n}$ – коэффициенты, определенные по термограммам, зафиксированным на образцовых мерах.

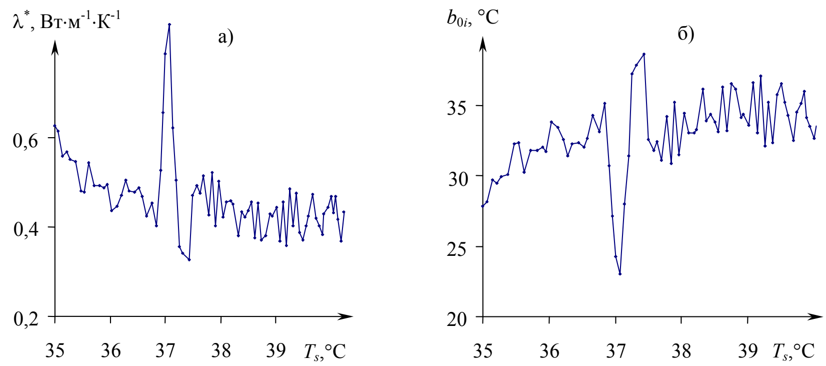
Для расчета текущих значений коэффициента $b_{0i_n}$, экспериментальную термограмму разбивают на интервалы с номерами точек $1\ldots k$; $2\ldots k+1$; $u-k+1\ldots u$, где $k$ – количество точек в интервале ($k\geq 3$), $u$ – количество точек в термограмме.

Формулы (6) – (8) являются основой алгоритмического обеспечения ИИС.

На рис. 2 представлены зависимости $\lambda^*=f(T_s)$ и $b_{0i}=f(T_s)$, для изделия из блочного полиамида марки Капролон В, построенные по термограмме, зафиксированной в центре зонда. Условия эксперимента: начальная температура опыта $T_н$ = 23,3 °С; радиус нагревателя $R_п$ = 4 мм; мощность на нагревателе $W$ = 1,5 Вт; временной шаг измерения температуры $\Delta\tau$ = 0,5 с; толщина исследуемого изделия $H_и$ = 30 мм.

На представленных зависимостях зарегистрирован релаксационный переход в Капролоне В при $T_п$ = 37 °С. Полученный результат хорошо согласуется с литературными данными. Известно, что в блочном полиамиде марки Капролон В при данной температуре происходит релаксационный $\alpha$-переход, связанный с сегментальным движением в аморфной части полимера.

Таким образом, разработанный авторами метод позволяет осуществлять неразрушающий контроль температурно-временных характеристик структурных переходов (фазовых и релаксационных) в полимерных материалах по ряду параметров. Без калибровочных экспериментов фиксирование аномалий на кривой зависимости $b_{0i}$ от температуры позволяет проводить экспресс-анализ при выборе режимных параметров работы ИИС.




*а*) *б*)

**Рис. 2 Зависимости:**

*а* – $\lambda^*=f(T_s)$; *б* – $b_{0i}=f(T_s)$ для Капролона В

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1 Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / Под ред. А.Г. Шашкова. Мн.: Наука и техника, 1986. 392 с.

2 Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа. 2001. 550 с.

3 Чех А.С. Метод и автоматизированная система неразрушающего контроля температурно-временных характеристик структурных превращений в полимерных материалах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Тамбов, 2004. 16 с.

## КАФЕДРА "ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА"