

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО
СТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ***

Разработаны алгоритмическое и программное обеспечения для проведения имитационных исследований в рамках контактного метода неразрушающего определения температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах (ПМ).

Метод реализуется с помощью информационно-измерительной системы (ИИС) и основан на нестационарном распространении тепла от тонкого плоского круглого источника тепла постоянной мощности при регуляризации тепловых потоков на моделях плоского и сферического полупространств. В методе осуществляется регистрация аномальных изменений теплофизических свойств (ТФС) исследуемых полимерных объектов в областях структурных переходов [1].

Так, по модели плоского полупространства расчетное выражение, описывающее термограмму вне зоны структурного перехода, имеет вид:

$$T_1(0, \tau) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\sqrt{\pi}} - \frac{qc_H}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}, \quad (1)$$

где T_1 , ε_1 , ε_2 – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно; q – удельная поверхностная мощность; τ – время; c_H – теплоемкость единицы площади нагревателя. Индексы 1, 2 отнесены к материалам исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно.

При получении расчетных зависимостей, реализуемых ИИС, были введены следующие обозначения: $\varepsilon_1 = \varepsilon$, $\varepsilon_2 = \varepsilon'$ и $z = \sqrt{\tau}$. Уравнение (1) представлено в виде:

$$T(0, z) = d_1 z + d_0, \quad (2)$$

где $d_1 = \frac{E}{\varepsilon + \varepsilon'}$, $d_0 = -\frac{F}{(\varepsilon + \varepsilon')^2}$, $E = 2q/\sqrt{\pi}$, $F = qc_H$, ε' – параметры ИИС, определяемые режимами опыта, ТФС материалов нагревателя и подложки зонда.

При расчете текущих значений коэффициентов ε_i^* , d_{1i} и d_{0i} полученную экспериментальную термограмму разбивали на интервалы с номерами точек $1 \dots k$; $2 \dots k + 1$; $n - k + 1 \dots n$, где k – количество точек в интервале, целое положительное нечетное число ($k \geq 3$); n – количество точек в термограмме; i – номер интервала, целое число.

Из уравнения (2) получено соотношение для вычисления текущего значения коэффициента ε_i^* по каждому интервалу термограммы:

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

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

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

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

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

Численное моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ ELCUT [2].

Целью имитационного моделирования являлось выявление характера графических зависимостей $d_{1i} = f(T_s)$ и $\varepsilon_i^* = f(T_s)$ при структурном переходе. Здесь T_s – средняя температура изделия из k текущих в каждом интервале измерений, °С; d_{1i} – текущие значения параметра модели, °С/с^{0,5}; ε_i^* – текущее значение тепловой активности, Вт · с^{0,5}/(м² · К).

Изменение теплоемкости (c) материала изделия от температуры при наличии эндотермического структурного перехода (например, твердофазного превращения в политетрафторэтилене (ПТФЭ)) моделировали в виде сигнала, представленного на рис. 1. На рис. 2 представлена термограмма, полученная численным моделированием с учетом сигнала, который проявляется на ней при переходе. При реальной работе информационно-измерительной системы также возникает шум, который также проявляется на термограмме. Предполагая, что шум является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения, с использованием пакета прикладных программ Maple получен белый шум, возникающий при реальной работе измерительной системы (с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией 0,01 °С²).

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Н.П. Жукова.

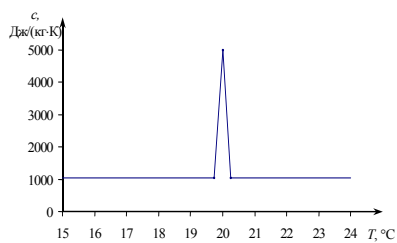


Рис. 1. Сигнал, возникающий при структурном переходе в ПМ

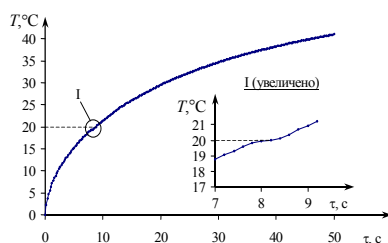


Рис. 2. Термограмма с сигналом

При численном моделировании обрабатывали термограммы, на которых помимо полезного сигнала учитывали также шум, возникающий при реальной работе измерительной системы.

С помощью разработанного программного обеспечения [3] построены графические зависимости $d_1 = f(T_s)$ и $\varepsilon_i^* = f(T_s)$, которые представлены на рис. 3. При температуре структурного перехода, равной 20 °C ($T_n = 20\text{ °C}$), эндотермический переход в ПМ проявился аномальными изменениями на температурных зависимостях тепловой активности и параметра модели (d_1).

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что информативные параметры d_1 , ε_i^* на рабочем участке термограммы, соответствующем модели плоского полупространства [1], явно реагируют на структурный переход в изделии из полимерного материала.

При $T_n = 20\text{ °C}$ на графических зависимостях $d_1 = f(T_s)$ и $\varepsilon_i^* = f(T_s)$ наблюдаются скачки и пики, величина которых существенно превышает шум.

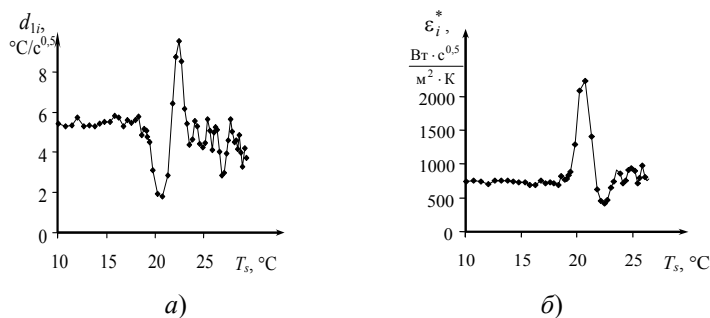


Рис. 3. Зависимости:

$$a - d_1 = f(T_s); \quad б - \varepsilon_i^* = f(T_s)$$

Полученные данные численных расчетов, представленные на рис. 3, хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований, проведенных авторами на ПТФЭ [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
2. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.
3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003610932. Регистрация структурных превращений в полимерных материалах по изменениям тепловой активности / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, А.С. Чех.