

**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  $T_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – избыточная температура, тепловые активности материалов исследуемого изделия и подложки зонда, соответственно;  $q$  – удельная поверхностная мощность;  $\tau$  – 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  $d_1 = \frac{E}{\varepsilon + \varepsilon'}$ ,  $d_0 = -\frac{F}{(\varepsilon + \varepsilon')^2}$ ,  $E = 2q/\sqrt{\pi}$ ,  $F = qc_H$ ,  $\varepsilon'$  – параметры ИИС, определяемые режимами опыта, ТФС материалов нагревателя и подложки зонда.

При расчете текущих значений коэффициентов  $\varepsilon_i^*$ ,  $d_{1i}$  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  $\varepsilon_i^*$  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  $d_1$ ;  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $\varepsilon_{01}$ ,  $\varepsilon_{02}$  – 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<sup>0,5</sup>;  $\varepsilon_i^*$  – текущее значение тепловой активности, Вт · с<sup>0,5</sup>/(м<sup>2</sup> · 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 °С<sup>2</sup>).

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

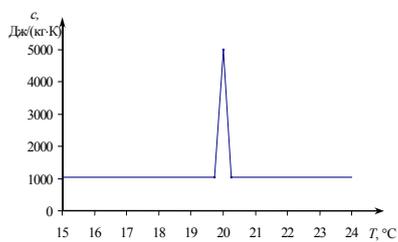


Рис. 1. Сигнал, возникающий при структурном переходе в ПМ

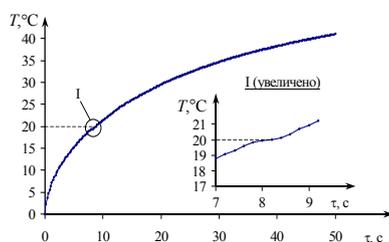


Рис. 2. Термограмма с сигналом

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  $20\text{ °C}$  ( $T_n = 20\text{ °C}$ ), 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  $d_1$ ,  $\varepsilon_i^*$  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.

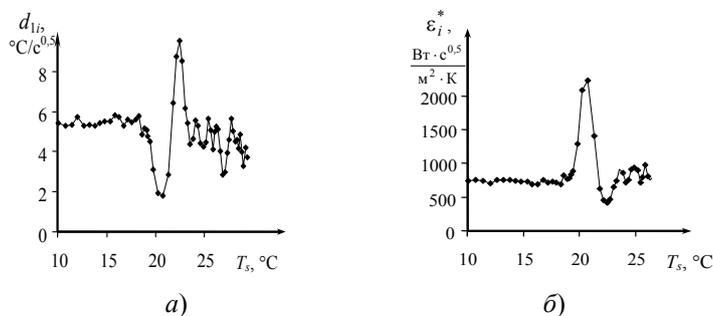


Рис. 3. Зависимости:

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

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.