

С.С. Никулин, Д.Г. Бородавкин,  
И.В. Рогов, Н.Ф. Майникова

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В данной работе представлено описание информационно-измерительной системы (ИИС), реализующей зондовые методы неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) и температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах (ПМ) по ранее известным [1 – 3] и вновь разработанным методам. Описания методов НК ТФС и температурных характеристик структурных переходов в ПМ по аномалиям ТФС детально представлены в работах [1 – 3]. Для реализации указанных методов необходимо проведение градуировочных экспериментов. Создание же оперативного метода НК, не требующего проведения градуировок, на основе недорогой ИИС, является актуальным. Разработанный метод НК предусматривает тепловое воздействие на исследуемое тело при равномерном начальном температурном распределении с помощью нагревателя, выполненного в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда (ИЗ). Фиксируется температура изделия  $T$  в центре ИЗ и на расстояниях от центра в плоскости контакта подложки ИЗ и исследуемого тела как при включенном нагревателе, так и после его отключения. В данной работе рассмотрены возможности и представлены примеры регистрации температур структурных переходов в полимерных материалах ИИС по аномалиям на зависимостях скорости изменения температуры в нескольких точках контроля при нагреве и остывании системы зонд – исследуемое тело от температуры.

ИИС (рис. 1) состоит из персонального компьютера (ПК), встраиваемой в компьютер измерительно-управляющей платы РСІ-1202Н, сменных ИЗ, регулируемого блока питания (БП). Зонд обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие, фиксирование температуры в заданных точках контроля термоэлектрическими преобразователями (ТП). При измерениях ИЗ устанавливают контактной стороной на поверхность исследуемого изделия. Тепловое воздействие осуществляется с помощью нагревателя (Н). Мощность и длительность теплового воздействия БП задаются программно через интерфейс (И), контроллер К1, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Распределение температуры на поверхности исследуемого тела контролируется несколькими термопреобразователями одновременно. Сигналы с ТП поступают через мультиплексор (П), усилитель (У), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), буфер обмена (Б) и интерфейс (И) в ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов и различные диапазоны измерения на каждом из них. ИИС реализует алгоритмы управления режимами эксперимента, определения ТФС, контроля температурных характеристик структурных переходов в ПМ.

Для расчета текущих значений скорости  $V$  изменения температуры термограмму разбивали на интервалы с номерами точек  $1 \dots k; 2 \dots k+1; u-k+1 \dots u$ , где  $k$  – количество точек в интервале, целое положительное нечетное число ( $k \geq 3$ );  $u$  – количество точек в термограмме;  $i$  – номер интервала.

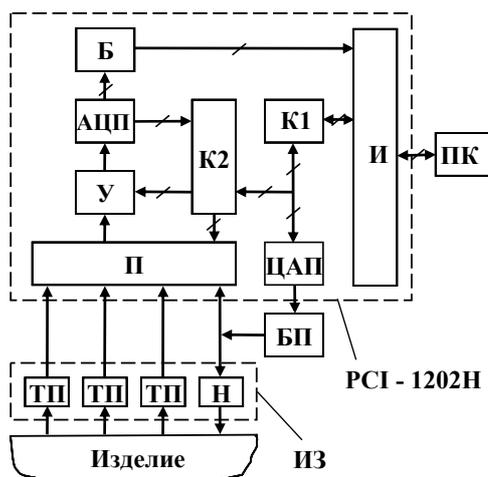


Рис. 1. Структурная схема ИИС

Определение линии регрессии для каждого интервала при нагреве и остывании проводили по методу наименьших квадратов. Использованы уравнения линейных зависимостей:

$$T_i = p_{1i} \tau + p_{0i}, \quad (1)$$

$$T_i = p_{3i} \tau + p_{2i}, \quad (2)$$

где

$$p_{1i} = \frac{k \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j T_j \right) - \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j \right) \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} T_j \right)}{k \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\tau_j)^2 \right) - \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j \right)^2} = V; \quad (3)$$

$$p_{0i} = \frac{\left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} T_j \right) \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\tau_j)^2 \right) - \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j \right) \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j T_j \right)}{k \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} (\tau_j)^2 \right) - \left( \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} \tau_j \right)^2}. \quad (4)$$

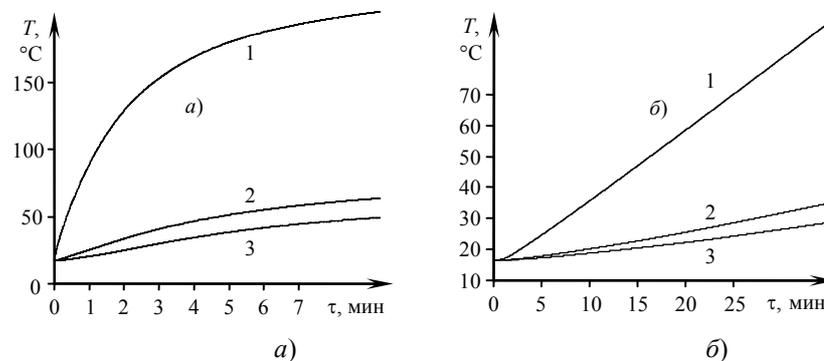
Коэффициенты  $p_{3i}$  и  $p_{2i}$  уравнения (2) находятся аналогично  $p_{1i}$  и  $p_{0i}$  по формулам (3), (4).

По линиям регрессии определяли скорости изменения температуры, которые относили к температуре  $T_s$  середины каждого интервала. Таким образом, удалось повысить чувствительность измерений и получить запись в «спектральной форме», т.е. в виде пиков в тех температурно-временных областях, где обнаруживаются различия в значениях «структурочувствительных» свойств (в областях, в которых возможны структурные переходы, сопровождающиеся тепловыми эффектами).

Регистрация первой производной по времени от температуры, выражающей скорость ( $V$ ) изменения этой величины на кривой температурной зависимости, реализована ИИС с измерительными зондами, снабженными:

- а) круглым плоским нагревателем постоянной мощности (рис. 2, а);
- б) круглым плоским нагревателем, реализующим с помощью программы постоянную скорость нагрева в локальной области исследуемого изделия (рис. 2, б).

Реализация постоянной скорости нагрева полимерного тела играет существенную роль при исследованиях релаксационных переходов в ПМ. В отличие от фазовых переходов, которые происходят при постоянных температурах, температура релаксационного перехода смещается в сторону более высоких значений с ростом скорости нагрева.



**Рис. 2. Термограммы, полученные при нагреве изделия из ПТФЭ:**

- а – ИИС реализует постоянную мощность нагрева;
- б – реализуется постоянная скорость нагрева локальной области изделия, расположенной под нагревателем; 1 – температура в центре нагревателя; 2, 3 – температура на расстояниях 7 и 9 мм от центра нагревателя

Для демонстрации работоспособности ИИС были проведены исследования на изделии из политетрафторэтилена (ПТФЭ) в диапазоне температур 16...200 °С.

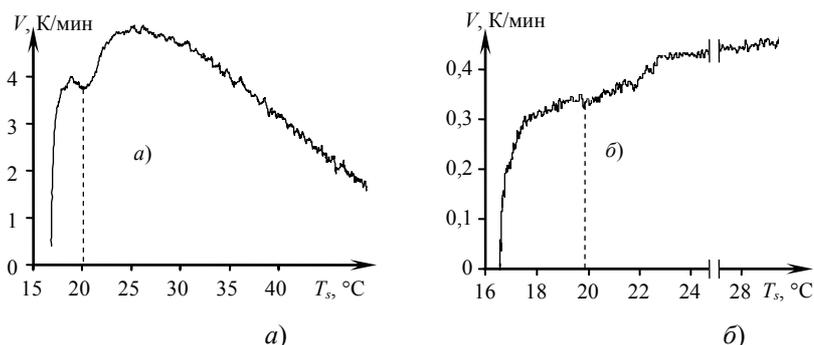
На рис. 2 и 3 представлены результаты опытов, проведенные при следующих условиях:

- а) начальная температура  $T_n = 17,8$  °С; радиус нагревателя  $R = 4$  мм; мощность нагревателя  $W = 1,45$  Вт; временной шаг измерения температуры  $\Delta t = 0,5$  с;

- б) начальная температура  $T_n = 16,5$  °С; радиус нагревателя  $R = 4$  мм; временной шаг измерения температуры  $\Delta t = 0,25$  с; скорость нагрева локальной области изделия, расположенной под нагревателем,  $V \approx 2,3$  К/мин.

На рис. 3, а, б зарегистрирован твердофазный переход в ПТФЭ, соответствующий переходу кристаллической составляющей материала из триклинической структуры в гексагональную. Эндотермический твердофазный переход с удельной теплотой  $4,0 \pm 0,5$  кДж/кг в ПТФЭ проявился на зависимостях  $V = f(T_s)$  в виде ступенек при  $T \approx 20$  °С, что соответствует справочным данным и данным, полученным дифференциально-термическим анализом на том же образце (разрушающим способом).

Таким образом, разработанная ИИС может работать как в режиме с постоянной скоростью нагрева, так и в режиме с постоянной мощностью нагрева, что существенно увеличивает возможности ИИС при реализации методов НК температурных характеристик структурных переходов (фазовых и релаксационных) в ПМ.



**Рис. 3. Скорости изменения температуры, отнесенные к температуре в точке измерения, построенные по термограммам 3 (рис. 2, а, б)**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2167412 РФ, G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов / Н.П., Жуков, Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, И.В. Рогов. – № 99103718, заявл. 22.02.99 ; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.
2. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – 112 с.
3. Мищенко, С.В. Метод неразрушающего контроля структурных превращений в полимерных материалах / С.В. Мищенко, Н.Ф. Майникова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1А. – С. 69 – 75.

*Кафедра «Гидравлика и теплотехника»*