

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА НА ТЕРМОГРАММЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А.А. Балашов

Способ неразрушающего определения температурных характеристик структурных переходов в политетрафторэтилене (ПТФЭ) основан на модели нестационарного теплопереноса от плоского ограниченного источника тепла постоянной мощности в виде круга. При температуре 30 °С в ПТФЭ наблюдаются эндотермические эффекты, сопровождающие внутрискристаллические переходы в твердой фазе. При регистрации термограммы в ходе проведения эксперимента возникают наводки, и наблюдается некоторая нестабильность мощности на нагревателе. Поэтому задачу определения структурных переходов в полимерах на термограмме можно решать путем выделения относительной энергии сигнала от помех. Выделение полезного сигнала из шумов является одной из актуальных задач обработки сигналов. В этой работе предлагается новый метод выделения одномерного сигнала из шума с использованием одномерного фильтра. Предлагаемый метод весьма эффективен и имеет простую реализацию в практической деятельности. Метод выделения использует только одномерный сигнал и не использует информацию о длительности сигнала и его амплитуду. Метод основан на процессе фильтрации описываемым уравнением типа автокорреляции, а также применением пороговых значений. Приведены результаты выделения одномерного сигнала на термограмме в виде структурного перехода для ПТФЭ путем дискретной фильтрации.

Ключевые слова: дискретный фильтр; обработка сигналов; полимер; структурный переход; термограмма.

ВВЕДЕНИЕ

Задача увеличения соотношения сигнал/шум, которое апостериори близко к единице, для случая структурного перехода в полимере, является актуальной из-за его широкого применения [1]. Несмотря на разнообразие существующих методов, проблема надежного выделения полезного сигнала остается открытой в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля структурных переходов в полимерах. Недавние исследования показали, что выделение возможно с помощью статистических критериев и только на вторичных данных, полученных в результате применения метода [2]. Этот недостаток можно преодолеть, если обработать первичные экспериментальные данные с помощью фильтра на основе уравнения типа автокорреляции. Полученные результаты хорошо согласуются с последующей статистической обработкой и другими исследованиями [3–5]. Такой подход уменьшает время на обработку экспериментальных данных.

Способ неразрушающего определения температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах (ПМ) осно-

ван на модели нестационарного теплопереноса от плоского ограниченного источника тепла постоянной мощности в виде круга [1, 2].

Решение задачи о распространении тепла в полупространстве от плоского нагревателя в виде круга радиусом R , создающего тепловой поток q , позволяет записать выражение, определяющее температуру в центре нагревателя:

$$T(\tau) = 2 \frac{q\sqrt{a\tau}}{\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \left[\frac{R}{2\sqrt{a\tau}} \right] \right), \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; R – радиус нагревателя, м; a – температуропроводность, м²/с; τ – время, с. При малых значениях времени τ температурное поле от ограниченного круглого нагревателя будет аналогично температурному полю от бесконечного нагревателя, действующего в плоском полупространстве. В реальном измерительном эксперименте следует учитывать утечки тепла в зонд, т.е. в эталонное тело, «инертность» нагревателя, наличие термических сопротивлений, конечность размеров изделия и подложки зонда.

На рисунке 1 представлена экспериментальная термограмма, зафиксированная центральной термопарой на изделии из политет-

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА НА ТЕРМОГРАММЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

рафторэтилена (ПТФЭ) при следующих условиях [1]: начальная температура опыта 23 °С; мощность на нагревателе 0,7 Вт; временной шаг измерения температуры 0,5 с; толщина образца – $15 \cdot 10^{-3}$ м. Видно, что при значении температуры в диапазоне 28...29 °С в ПТФЭ наблюдаются эндотермические эффекты, сопровождающие внутрикristаллические переходы в твердой фазе [3 – 5].

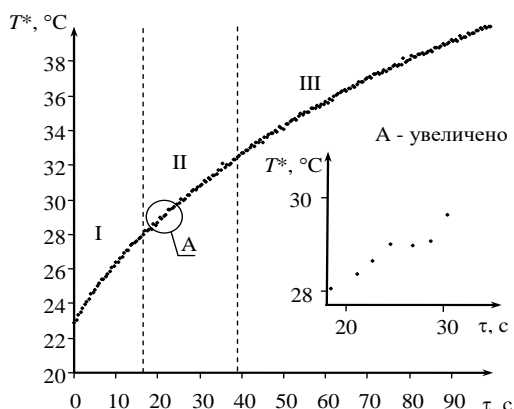


Рисунок 1 – Термограмма, зафиксированная на изделии из ПТФЭ

На термограмме можно выделить три участка (рисунок 1). Участок I соответствует температурному полю в системе, описываемому дифференциальным уравнением теплопроводности, причем членом уравнения, ответственным за распространения тепла в радиальном направлении при малых τ , можно пренебречь. Тепловой поток, поступающий в образец, зависит от времени, так как нагреватель обладает инерционностью, присутствуют термосопротивления. На II участке сохраняется одномерность температурного поля, процесс проходит стадию регуляризации. Тепловые потоки, поступающие в исследуемое тело из ПМ и измерительного зонда, становятся постоянными. На III участке нельзя пренебречь радиальным распространением тепла [6].

Расчетное выражение, описывающее термограмму на II участке имеет вид:

$$T^*(t) = 2 \frac{qt}{(\varepsilon + \varepsilon')\sqrt{\pi}} - \frac{qc_n}{(\varepsilon + \varepsilon')^2}, \quad (2)$$

где T^* – разность значений температуры, регистрируемая дифференциальной термопарой, °С; $t = \sqrt{\tau}$ – новая координата; $\varepsilon, \varepsilon'$ – соответственно, тепловая активность исследуемого материала и поправка на тепловую активность материала подложки зонда, т.е. эталонного

тела для II участка; c_n – теплоемкость нагревателя отнесенная к единице площади, Дж/(м²·К).

Выражение (2) можно записать в виде:

$$T^*(t) = d_1 t + d_0, \quad (3)$$

$$A = \frac{2q}{\sqrt{\tau}}, \quad B = qc_n, \quad d_1 = \frac{A}{(\varepsilon + \varepsilon')}, \quad d_0 = -\frac{B}{(\varepsilon + \varepsilon')^2}, \quad (4)$$

Значения d_1, d_0 определяются из термограммы $T^*(t)$, а значения A, B, ε' – являются постоянными прибора и не зависят от теплофизических свойств исследуемого ПМ.

Модель (3) работает на II участке термограммы, а также частично на I и III. Значение коэффициента d_1 обратно пропорционально значению тепловой активности ε'_i (4). При структурном переходе в ПМ в узком температурно-временном интервале значение теплоемкости изменяется значительно (часто на порядок и более), следовательно, значение ε также изменится [5].

При регистрации термограммы в ходе проведения эксперимента возникают наводки и наблюдается некоторая нестабильность мощности на нагревателе. Поэтому задачу определения структурных переходов в полимерах на термограмме можно решать путем выделения относительной энергии сигнала от помех [7, 8].

Полученную центральную часть термограммы представим в виде дискретного сигнала, где i – номер пикселя, q_i – величина сигнала соответствующего отсчета, которую можно интерпретировать как яркость на экране монитора (рисунок 2).

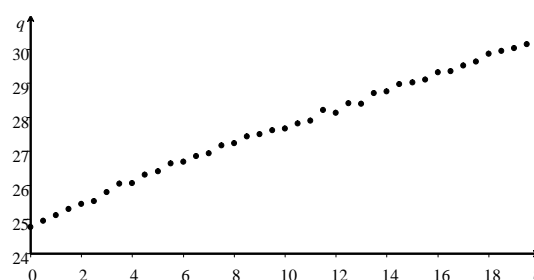


Рисунок 2 – Рабочий участок термограммы в виде дискретного сигнала

Фильтрация сигналов изображений обычно решает задачу подчеркивания интересных объектов относительно фона, либо ослабления помех.

Известно, что при обработке в пространственной области, фильтрация осуществляется путем формирования взвешенной суммы

отсчетов входного сигнала q_i , расположенных в некоторой области вокруг выходного отсчета $q_p^{Б\text{В}\text{Х}}$ [7–11]. Последовательное прохождение отсчетов сигнала через фильтр, характерное при фильтрации временных частот при этом отсутствует. Процесс фильтрации описывается уравнением типа «автокорреляция» [7–11]

$$q_{p,s}^{Б\text{В}\text{Х}} = \sum_{l=-am=-c}^b \sum_{m=-c}^d q_{p+l,s+m} \cdot \alpha_{l,m}, \quad (5)$$

где $\alpha_{l,m}$ – отсчеты импульсной характеристики фильтра апертурой $(a+b+1) \times (c+d+1)$; $a > 0$; $b \geq 0$; $c > 0$; $d \geq 0$.

Вычисляем коэффициент $\alpha_{l,m}$ для реального сигнала. Выражение (5) описывает однородную по пространственным координатам фильтрацию, поэтому (p, s) – это текущие координаты пикселя изображения. Симметричная вычислительная среда обладает нулевой фазочастотной пространственной характеристикой, если для всех l и m выполняется условие $\alpha_{l,m} = \alpha_{-l,-m}$ (в нашем случае $m = 0$) [7–11]. Известно, что показателем эффективности фильтрации сигналов может служить относительное изменение их энергии.

Далее вычисляем энергию реального сигнала, в [7–11] предложен функционал эффективности, связывающий характеристики входного и выходного сигналов с параметрами фильтра. При этом можно разложить энергию входного сигнала в двумерный ряд Фурье

$$e = 2 \sum_{l=-a-i}^b \sum_{i=-(a+b)}^0 \alpha_{l+i} \cdot \alpha_l s_i + 2 \sum_{l=-a-i}^b \sum_{i=-(a+b)}^{-1} \alpha_{l+i} \cdot \alpha_l s_i + 2 \sum_{l=-ai=-(a+b)}^{b+i} \sum_{i=-(a+b)}^{-1} \alpha_{l-i} \cdot \alpha_l s_i + \sum_{l=-a}^b \alpha_l^2 \quad (6)$$

$i \neq 0$

Таблица 1 – Значения $s_{i,0}$ для рабочего участка термограммы

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s_i	1	0,9598	0,9198	0,8796	0,8393	0,7993	0,7593	0,7194	0,6794	0,6393
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
s_i	0,5994	0,5592	0,5193	0,4791	0,4393	0,3991	0,3593	0,3193	0,2793	0,2395
i	21	22	23	24	25	–	–	–	–	–
s_i	0,1997	0,1598	0,1198	0,0798	0,0399	–	–	–	–	–

$$s_i = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} \cos(i\varphi_x) \cdot S_{ВХ}^{\circ}(\varphi_x) d\varphi_x}{\int_{-\pi}^{\pi} S_{ВХ}^{\circ}(\varphi_x) d\varphi_x}; s_0 = 1;$$

$S_{ВХ}^{\circ}(\varphi_x)$ – энергетический спектр входного сигнала изображения; $\varphi_x \in [-\pi, \pi]$ – нормированная пространственная частота.

В общем случае энергетический спектр обладает центральной симметрией [6–10], т.е. $s_i = s_{-i}$.

Вычисляем коэффициент s_i для реального сигнала. Функцию (6) можно рассматривать как функционал, заданный на множестве импульсных характеристик дискретного фильтра [7–11]. Тогда процедуру синтеза фильтра можно определить как выбор отсчетов его импульсной характеристики, при котором достигается экстремум.

Составим матричное уравнение для нахождения маски (импульсной характеристики) фильтра:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B},$$

где $\mathbf{X}^T = (\alpha_9, \alpha_8, \dots, \alpha_0)$ – отсчеты одномерного фильтра [7–8]; \mathbf{B} – коэффициенты, полученные для эталонного изображения (плато).

Оценка эффективности обработки изображения производится по следующему соотношению:

$$\varepsilon = \frac{e_o}{e_{\phi}}, \quad (7)$$

где $e_o = E_{o \text{ Вых}} / E_{o \text{ Вх}}$; $e_{\phi} = E_{\phi \text{ Вых}} / E_{\phi \text{ Вх}}$; E – энергия изображения; индексы «о», «ф», «вх», «вых» относятся к объекту, фону, необработанному и обработанному изображениям, соответственно [6–10]. Энергия изображения объекта, пропорциональна сумме квадратов яркостей соответствующих пикселей.

В таблице 1 приведены значения $s_{i,0}$, найденные для изображения на рисунке 2.

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА НА ТЕРМОГРАММЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Энергия входного изображения равна сумме квадратов яркостей, для реального изображения и она соответствует 20517 усл. ед.

Для нахождения коэффициентов одномерного фильтра составим матрицу \mathbf{S} в виде [7–11]:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 & s_2 & s_3 & \vdots & s_{24} \\ s_{-1} & s_0 & s_1 & s_2 & \vdots & s_{23} \\ s_{-2} & s_{-1} & s_0 & s_1 & \vdots & s_{22} \\ s_{-3} & s_{-2} & s_{-1} & s_0 & \vdots & s_{21} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{-24} & s_{-23} & s_{-22} & s_{-21} & \vdots & s_0 \end{pmatrix}$$

Решая систему линейных уравнений (6), с учетом симметрии получим маску фильтра:

$$\alpha_{12} = \alpha_{-12} = -0,0459; \alpha_{11} = \alpha_{-11} = 0,0036;$$

$$\alpha_{10} = \alpha_{-10} = -0,0038; \alpha_9 = \alpha_{-9} = 0,0026;$$

$$\alpha_8 = \alpha_{-8} = -0,0016; \alpha_7 = \alpha_{-7} = 0,00062;$$

$$\alpha_6 = \alpha_{-6} = 0,0004; \alpha_5 = \alpha_{-5} = -0,0023;$$

$$\alpha_4 = \alpha_{-4} = 0,0051; \alpha_3 = \alpha_{-3} = 0,0030;$$

$$\alpha_2 = \alpha_{-2} = 0,012; \alpha_1 = \alpha_{-1} = 0,0037;$$

$$\alpha_0 = 1,0189.$$

Применим полученный одномерный фильтр к реальной термограмме. В таблице 2 приведены значения яркостей пикселей до (q_i) и после ($q_i^{\text{ВЫХ}}$) обработки фильтром.

На рисунке 3 показан результат обработки термограммы полученным фильтром одномерной апертуры. Видно, что в интервале от 0 до 10 фон изображения уменьшился, а на участке 11...15 – полученный сигнал выделился по отношению с реальным (зашумленным) сигналом.

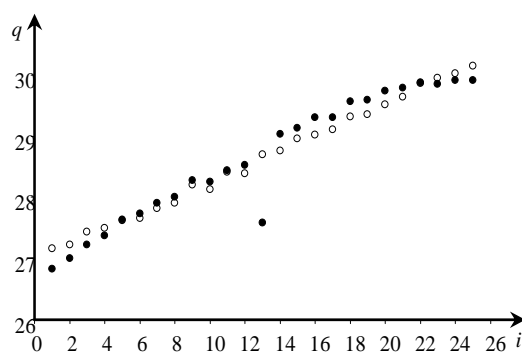


Рисунок 3 – Рабочий участок термограммы до (белые точки) и после (черные точки) фильтрации

Таблица 2 – Значения яркостей пикселей до и после обработки фильтром

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_i	27,17	27,23	27,43	27,49	27,62	27,66	27,82	27,90	28,21	28,13
$q_i^{\text{ВЫХ}}$	26,83	26,99	27,23	27,37	27,63	27,73	27,91	28,01	28,72	28,25
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
q_i	28,41	28,39	28,70	28,76	28,96	29,03	29,11	29,31	29,35	29,52
$q_i^{\text{ВЫХ}}$	28,44	28,52	27,59	29,03	29,13	29,30	29,31	29,57	29,59	29,74
i	21	22	23	24	25	–	–	–	–	–
q_i	29,64	29,86	29,94	30,03	30,15	–	–	–	–	–
$q_i^{\text{ВЫХ}}$	29,79	29,87	29,85	29,91	29,91	–	–	–	–	–

Для увеличения эффективности обработки экспериментальных данных для матрицы \mathbf{S} с помощью пороговых значений T ($T \in \mathfrak{R}$) отбросим незначительные коэффициенты, которые меньше наперед заданного числа δ .

С учетом пороговых значений T для матрицы \mathbf{S} получаем зависимость пороговых значений от значений эффективности ε обработки изображения (таблица 3).

Таблица 3 – Зависимость эффективности обработки термограммы от порогового значения

T	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
ε	1,006	1,006	1,014	1,014	1,020	1,020	1,028	1,028	1,034	1,034	1,018

ВЫВОД

Таким образом, эффективность обработки термограммы при помощи фильтра с одномерной апертурой рассчитанной по формуле (7) составила 1,034 усл. ед. при интервале порога 0,16-0,18. Структурный переход в полимере был зафиксирован в диапазоне 28...29 °С (рисунок 3), что совпадает с другими литературными и экспериментальными данными [1–3, 5, 8]. Данный метод выделения сигнала на термограмме с использованием одномерной фильтрации уменьшает время на обработку экспериментальных данных в ИИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов, А.А. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах / А.А. Балашов, Н.Ф. Майникова, Н.П. Жуков // Приборы. – 2010. № 12. – С. 53–57.
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, О.Н. Попов. – Тамбов. – 2012. – С. 112.
3. Горяинова А.В. Фторопласты в машиностроении / А.В. Горяинова, Г.К. Божков, М.С. Тихонова. - М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
4. Кристаллизация политетрафторэтилена под действием γ -излучения / Ю.В. Зеленев, А.А. Коптелов, Д.Н. Садовничий, О.Ф. Шленский, Д.Д. Валгин // Пластические массы. – 2002. – №1. – С. 19 – 22.
5. Бартенев Г.М. Физика полимеров / Г.М. Бартенев, С.Я. Френкель. – Л.: Химия, 1990. – 429 с.
6. Балашов, А.А. Способ определения рабочих участков экспериментальных термограмм / А.А. Балашов, Д.С. Кацуба // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. № 3(53). – С. 214–219.
7. Обработка многомерных сигналов. В 2-х книгах. Кн. 1. Линейная многомерная дискретная обработка сигналов. Методы анализа и синтеза. Монография / Под ред. А.В. Богословского. – М.: Радиотехника. – 2013. – 168 с.
8. Балашов, А.А. Поиск структурного перехода в полимере на термограмме путем дискретной фильтрации/ А.А. Балашов, Н.П. Жуков, И.В. Жигулина // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. № 4. – С. 687–693.
9. Корреляционный анализ изображений изотропными фильтрами / А.В. Богословский, И.В. Жигулина, И.А. Басенков, В.В. Скоморохов // Радиотехника. – 2012. № 4. – С. 43–46.
10. Bogoslovsky, A.V. A Way of Energy Analysis for Image and Video Sequence Processing / A.V. Bogoslovsky, I.V. Zhigulina. – Intelligent Systems Reference Library. – Volume 73. Computer Vision in Control Systems-1. Mathematical Theory. – Springer. – 2015. – P.183–210.
11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016615344. Поиск структурного перехода в полимере на термограмме при помощи фильтра с одномерной апертурой/ А.А. Балашов, И.В. Рогов, И.В. Жигулина.

Балашов Алексей Александрович, к.т.н., доцент кафедры энергообеспечение предприятий и теплотехника ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», balashovalexei@yandex.ru.