

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ
В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Н. П. Жуков, И. В. Рогов, О. Н. Попов, Д. О. Васильев

*Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; teplotehnika@nnn.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: измерительная система; неразрушающий контроль; полимер; структурный переход; теплофизические свойства.

Аннотация: Представлены измерительная и структурная схемы мобильного варианта измерительной системы, реализующей метод неразрушающего определения теплофизических свойств твердых материалов. Система также реализует алгоритмы: контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах; управления режимами эксперимента; обработки экспериментальных данных. Система позволяет осуществлять неразрушающий метод определения теплофизических свойств полимерных материалов с повышенной точностью, так как появляется возможность исключить влияние на результат измерений тепловых эффектов структурных превращений.

Современные методы неразрушающего контроля (**НК**), позволяющие определять теплофизические свойства (**ТФС**) и температурные характеристики структурных переходов в полимерных материалах (**ПМ**), наиболее эффективно реализуются измерительными системами (**ИС**), позволяющими автоматизировать проведение измерений, адаптивно изменять режимные параметры, обеспечивать оперативность и точность измерений при сохранении целостности и эксплуатационных характеристик объектов исследования [1, 2].

Известен контактный зондовый метод [1, 2] НК структурных переходов в ПМ по изменениям их ТФС с ростом температуры. Теплофизические свойства определяют по рабочим участкам термограмм, полученных при тепловом воздействии на объект исследования от круглого источника тепла постоянной мощности в виде диска, встроенного в подложку измерительного зонда. По моделям плоского и сферического полупространств рассчитывают ТФС, а значение температуры перехода определяют по аномалиям ТФС на температурных зависимостях с помощью статистических критериев. Однако измерительную информацию по модели плоского полупространства получают с помощью лишь одного термоприемника, что отрицательно сказывается на точности. По модели сферического полупространства измерительную информацию получают с помощью нескольких термоприемников. При регистрации температурного градиента на поверхности исследуемого изделия имеют место существенные ограничения по времени и температуре, так как в методе [1, 2] реализуется квазистационарная стадия.

Известно, что при распространении тепла от линейного источника постоянной мощности в цилиндрическом полупространстве нет ограничений по времени

нагрева, квазистационарная стадия не реализуется, скорость нагрева при прочих равных условиях выше. Так как эффективность метода НК структурных переходов в ПМ зависит от скорости движения границы структурного перехода, а температурный градиент при реализации метода с распространением тепла в цилиндрическом полупространстве меньше, то применение линейного нагревателя постоянной мощности перспективно.

Известно применение ИС, реализующих способы неразрушающего определения ТФС материалов с применением импульсных линейных источников тепла [1]. Однако реализация методов многоимпульсного теплового воздействия влечет усложнение математических моделей, связанное с учетом релаксации в исследуемом теле каждого предшествующего импульса. К недостаткам данной группы методов можно отнести то, что в них не учитывается распределение температуры во всем объеме исследуемого объекта от предшествующего импульса, определение ТФС проводится только по отдельным точкам термограмм.

В современных методах НК [2 – 4] намечается тенденция использования в расчетах большого числа точек температурной кривой, что позволяет повысить достоверность получаемых результатов. Достаточно полные исследования адекватности математических моделей реальным тепловым процессам для вышеперечисленных методов представлены в работах [5, 6]. Однако применение данных методов НК структурных превращений в ПМ затруднительно, так как в них не учитывается возможность проявления в материалах релаксационных и фазовых переходов.

Известны многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, подтверждающие связь релаксационных явлений в ПМ с уровнями прочности и процессами разрушения. Во многих технических процессах возникает необходимость определения температурного состояния тел при наличии твердофазных превращений, процессов плавления, кристаллизации и др. [7].

Математическое моделирование таких процессов сводится к решению задач с подвижной границей (задачи Стефана). Сложность их решения в том, что наряду с определением температуры вещества, находящегося в различных фазах, требуется также находить закон перемещения фронта (границы) фазового перехода с учетом выделяющейся (или поглощаемой) при этом теплоты. В работе [7] представлено решение задачи Стефана для бесконечной пластины. Использован интегральный метод теплового баланса, основанный на определении фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий. Применение данного метода к НК ТФС и температурных характеристик структурных переходов в ПМ затруднительно, вследствие чего предложены методы, детальное описание которых представлено в работе [8]. Схема и описание портативной мобильной ИС, реализующей данные методы, представлены в настоящей работе.

Согласно измерительной схеме ИС (рис. 1) тепловое воздействие на исследуемое тело, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью двух линейных нагревателей постоянной мощности, встроенных в подложку измерительного зонда (ИЗ). Начальное температурное распределение контролируется одновременно тремя термоэлектрическими преобразователями (ТП1 – ТП3), расположенными на поверхности подложки ИЗ: ТП1 размещен на линии центральной оси ИЗ, ТП2 и ТП3 находятся на расстояниях x' по обе стороны от оси (на центральных линиях нагревателей). В ходе эксперимента каждым термоприемником фиксируются зависимости избыточной температуры $T_{ТП1}$, $T_{ТП2}$, $T_{ТП3}$ от времени, а также значения разностей температуры на нагревателях и в точке, расположенной на центральной оси ИЗ.

Измерительная система состоит из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы E14-140-MD, усилителя сигналов (У), ИЗ, регулируемого блока питания (БП). Структурная схема ИС представлена на рис. 2.

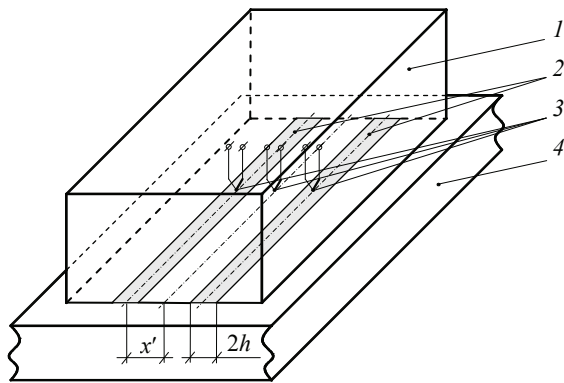


Рис. 1. Измерительная схема ИС:

1 – подложка измерительного зонда; 2 – нагреватели;
 3 – термоэлектрические преобразователи; 4 – исследуемое изделие;
 $2h$ – ширина нагревателя, м; x' – расстояние от центра
 измерительного зонда до середины нагревателя, м

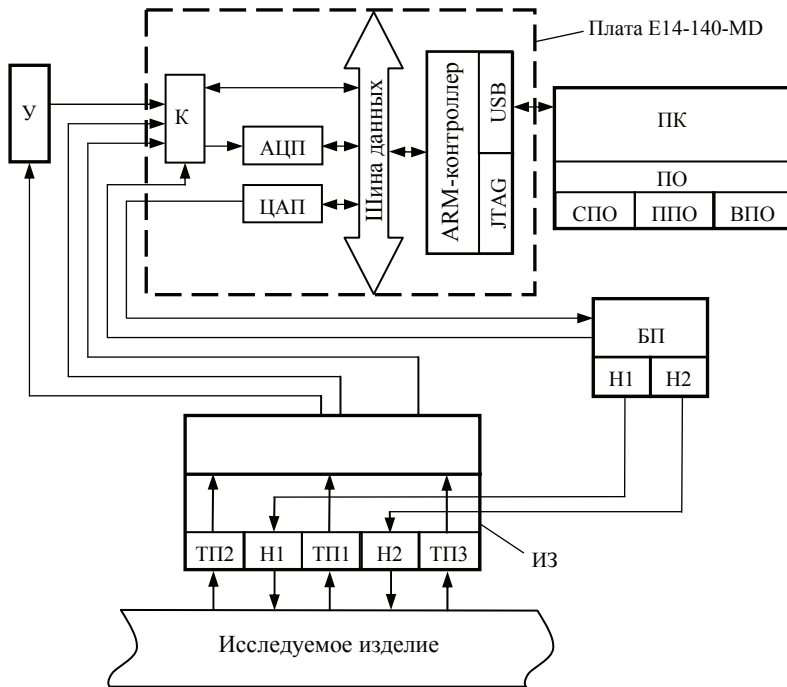


Рис. 2. Структурная схема ИС

При измерениях ИЗ устанавливают контактной стороной на поверхность исследуемого изделия. Измерительный зонд обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие с помощью нагревателей (**Н1**, **Н2**) и фиксирование температуры в заданных точках контроля.

Термоэлектрические преобразователи располагаются на центральных линиях каждого нагревателя и ИЗ. Холодные спаи ТП выведены в блок холодных спаев (**БХС**) через специальные отверстия в подложке ИЗ, где распаяны на коммутационную плату. Блок холодных спаев предназначен для обеспечения одинаковой температуры холодных спаев ТП, которая фиксируется датчиком температуры.

Термоэлектрические преобразователи соединены таким образом, что помимо дифференциальных сигналов фиксируются сигналы непосредственно с самих ТП. Сигналы с ТП поступают на вход измерительно-управляющей платы E14-140-MD, при этом дифференциальные сигналы (ΔT) предварительно проходят через усилитель ZET 410. Плата E14-140-MD является малогабаритным многофункциональным измерительным модулем, подсоединяемым к ПК через USB-интерфейс. Измерительно-управляющая плата E14-140-MD содержит следующие основные функциональные блоки:

- ARM-контроллер (тип AT91SAM7S256), который осуществляет не только управление E14-140-MD, но и поддерживает интерфейс USB и отладочный интерфейс JTAG;

- коммутатор (**К**), предназначенный для аналоговой коммутации сигналов с аналоговых входов;

- 14-битный аналого-цифровой преобразователь (**АЦП**) последовательного приближения LTC1416;

- двухканальный 16-битный цифро-аналоговый преобразователь (**ЦАП**), работающий не только в асинхронном, но и синхронном режимах (до 200 кГц), имеющий большой рабочий выходной ток и нормированные характеристики при воспроизведении переменного напряжения.

Мощность и длительность теплового воздействия встроенных в подложку ИЗ нагревателей H1, H2 задаются программно. Регулирующий сигнал поступает на вход операционного усилителя БП. Сигнал с выхода операционного усилителя подается на базу силового транзистора. Операционный усилитель поддерживает напряжение на выходе БП, равное напряжению регулирующего сигнала.

Системное программное обеспечение (**СПО**) включает поставляемые фирмой ЗАО «Л-Кард» USB-драйвер измерительно-управляющей платы E14-140-MD, динамически подключаемую библиотеку `Lusbapi`. Для реализации алгоритмов контроля ТФС, температурно-временных характеристик структурных переходов в ПМ и управления режимами эксперимента разработан комплекс программного обеспечения (**ПО**) для ПК, составляющий прикладное программное обеспечение (**ППО**) ИС. Вспомогательное ПО (**ВПО**) состоит из программ тестирования, организации обработки и хранения измерительной информации на ПК.

Измерительная система реализует регистрацию структурных превращений по аномалиям ТФС в узких температурном и временном интервалах с изменением интенсивного параметра (температуры или времени). Метод предусматривает проведение градуировки ИС по двум образцовым мерам.

В работе [8] представлена математическая модель метода, реализующего НК ТФС твердых материалов. Рассматривается процесс теплопроводности от двух линейных нагревателей в полугограниченном теле. Сформулирована краевая задача теплопроводности, решение которой позволило получить расчетные зависимости определения ТФС по температурно-временному отклику на тепловое воздействие.

В области структурных превращений ПМ наблюдаются аномалии, выражающиеся в скачках и разрывах на зависимостях ТФС от температуры (времени), которые могут быть зафиксированы по изменениям текущих параметров математических моделей. Построив зависимости между каждым из параметров модели и температурой исследуемого изделия, по характерным пикам определяют температурно-временные характеристики структурных превращений.

Рассматривая математические модели как случайные стационарные процессы (протекающие во времени однородно, частные реализации которых с постоянной амплитудой колеблются вокруг средней функции), для которых дисперсии по сечениям постоянные, разработана следующая методика НК структурных превращений в ПМ. Если в исследуемом ПМ происходит, например, твердофазное превращение из одной кристаллографической модификации в другую, которое сопровождается тепловым эффектом, то величины дисперсий коэффициентов модели будут резко изменяться в достаточно узких временном и температурном интервалах.

Фиксирование аномалий на кривых зависимостей дисперсий коэффициентов модели от температуры и времени позволяет проводить контроль структурных превращений в ПМ, а также экспресс-анализ экспериментальных данных при выборе режимных параметров работы ИС.

Одновременно с двумя вышеупомянутыми методами может быть реализован метод НК структурных переходов, основанный на регистрации первой производной по времени от основной величины – температуры в нескольких точках контроля исследуемого полимерного тела в динамических термических режимах при нагреве и остывании.

Для расчета значений скорости изменения температуры термограмму разбивают на интервалы: $1, \dots, k$; $2, \dots, k+1$; ...; $u-k+1, \dots, u$, где k – число точек в интервале, целое положительное нечетное число ($k \geq 3$); u – число точек в термограмме. Определение линии регрессии для каждого интервала при нагреве и остывании проводили по методу наименьших квадратов. Строили прямые по k точкам термограммы, определяли скорости изменения температуры, которые относили к температуре середины каждого интервала T_c . Таким образом, удалось повысить чувствительность измерений и получить запись в «спектральной форме», то есть 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).

Таким образом, мобильный вариант ИС позволяет осуществлять неразрушающий метод определения ТФС с повышенной точностью, так как появляется возможность исключить влияние тепловых эффектов структурных превращений в ПМ.

Список литературы

1. Анализ и синтез измерительных систем / С. В. Мищенко [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1995. – 238 с.
2. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах : монография / Н. Ф. Майникова [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 320 с.
3. Жуков, Н. П. Метод и измерительно-вычислительная система неразрушающего теплофизического контроля / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова // Пласт. массы. – 2005. – № 2. – С. 39.
4. Пат. 2161301 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего определения теплофизических свойств материалов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, Ю. Л. Муромцев, И. В. Рогов, А. А. Балашов ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 99104568/28 ; заявл. 03.03.1999 ; опубл. 27.12.2000, Бюл. № 36. – 9 с.
5. Моделирование процесса теплопереноса от импульсного линейного источника тепла при теплофизических измерениях / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 182 – 189.
6. Жуков, Н. П. Анализ погрешностей измерения теплофизических характеристик материалов при импульсном тепловом воздействии от линейного источника. Часть I. Оценка случайных погрешностей / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова, И. В. Рогов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 4. – С. 565 – 568.
7. Карташов, Э. М. Математические модели теплопроводности и термоупругости : учеб. пособие / Э. М. Карташов, В. А. Кудинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 877 с.
8. Математическое моделирование теплопереноса от двух нагревателей в полуограниченном теле / Н. П. Жуков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 327 – 332.

Measuring System of Nondestructive Testing of Thermophysical Properties and Temperature Characteristics of Structural Transformations in Polymeric Materials

N. P. Zhukov, I. V. Rogov, O. N. Popov, D. O. Vasilyev

Department "Energy Supply of Companies and Heat Engineering", TSTU;
teplotehnika@nnn.tstu.ru

Key words and phrases: measuring system; non-destructive testing; polymer; structural transformation; thermo-physical properties.

Abstract: Measuring and structural scheme of the mobile version of the measuring system, implementing the method of non-destructive testing of thermophysical properties of solid materials, is described. The system also implements the following algorithms: monitoring of temperature characteristics of structural transformations in polymer materials, management of experiment modes, experimental data processing. The system allows carrying out non-destructive testing of thermo-physical properties of polymeric materials with enhanced accuracy since it is possible to exclude the effect on the results of measurements of thermal effects of structural transformations.

References

1. Mishchenko S.V., Muromtsev Yu.L., Tsvetkov E.I., Chernyshov V.N. *Analiz i sintez izmeritel'nykh sistem* (Analysis and synthesis of measurement systems), Tambov: Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1995, 238 p.
2. Mainikova N.F., Mishchenko S.V., Zhukov N.P., Rogov I.V. *Metody i sredstva nerazrushayushchego teplovogo kontrolya strukturnykh prevrashchenii v polimernykh materialakh: monografiya* (Methods and tools for non-destructive thermal control of structural transformations in polymeric materials), Tambov: Izdatel'stvo FGBOU VPO «TGTU», 2012, 320 p.
3. Zhukov N.P., Mainikova N.F. *Plasticheskie massy*, 2005, no. 2, pp. 39.
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Muromtsev Yu.L., Rogov I.V., Balashov A.A., Tambov state technical university, *Sposob nerazrushayushchego opredeleniya teplofizicheskikh svoystv materialov* (The method of non-destructive determination of thermal properties of materials), Russian Federation, Pat. 2161301.
5. Zhukov N.P., Muromtsev Yu.L., Mainikova N.F., Rogov I.V. *Transactions of the Tambov state technical university*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 182-189.
6. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V. *Transactions of the Tambov state technical university*, 2002, Vol. 8, no. 4, pp. 565-568.
7. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Matematicheskie modeli teploprovodnosti i termouprugosti* (Mathematical models of heat conduction and thermoelasticity), Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013, 877 p.
8. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Popov O.N. *Transactions of the Tambov state technical university*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 327-332.

Messsystem der nicht zerstörenden Bestimmung der wärmephysikalischen Eigenschaften und der Temperaturcharakteristiken der strukturellen Übergänge in den polymeren Materialien

Zusammenfassung: Es sind die Mess- und Strukturellschemen der mobilen Variante des Messsystems, das die Methode der nicht zerstörenden Bestimmung der wärmephysikalischen Eigenschaften der festen Materialien realisiert. Das System

realisiert die Algorithmen auch: der Kontrolle der Temperaturcharakteristiken der strukturellen Übergänge in den polymeren Materialien; die Verwaltungen der Regimes des Experimentes; der Bearbeitung der experimentalen Daten. Das System lässt zu, die nicht zerstörende Methode der Bestimmung der wärmephysikalischen Eigenschaften der polymeren Materialien mit der erhöhten Genauigkeit zu verwirklichen, da die Möglichkeit erscheint, den Einfluss auf das Ergebnis der Messungen der thermischen Effekte der strukturellen Umwandlungen auszuschließen.

Système de mesure de la définition non destructive des propriétés thermophysiques et thermiques des transitions structurelles dans les matériaux polymères

Résumé: Sont présentés des schémas de mesure et de structure de la variante mobile du système de mesure réalisant la méthode de la définition non destructive des propriétés thermophysiques des matériaux solides. Le système réalise aussi les algorithmes suivants: contrôle des caractéristiques thermiques des transitions structurelles dans les matériaux polymères; commande des régimes de l'expérience; traitement de données expérimentales. Le système permet d'effectuer la méthode non destructive des propriétés thermophysiques des matériaux polymères avec une haute précision puisqu'il y a la possibilité d'exclure l'influence des modifications des effets thermiques des transitions structurelles sur le résultat.

Авторы: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Рогов Иван Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Попов Олег Николаевич* – ассистент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Васильев Дмитрий Олегович* – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка полимеров и упаковочное производство», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
