

УДК 681.2:536.6

ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Чернышов¹, З.М. Селиванова²

*Кафедры: "Криминалистика и информатизация правовой деятельности" (1),
"Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем" (2), ТГТУ*

Ключевые слова и фразы: дифференциальная термобатарея; измерительная головка; коэффициенты тепло- и теплопроводности; тепловая активность; теплофизические свойства; термозонд.

Аннотация: Разработан и исследован оперативный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, позволяющий повысить производительность теплофизических измерений не менее, чем в 5 раз, по сравнению с известными нестационарными методами неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, за счет начала проведения очередного измерения при достижении момента равенства температурных перепадов во взаимно перпендикулярных плоскостях подложки.

Обозначения

a - коэффициент теплопроводности;	ΔT_1 - перепад температур в плоскости XOY ;
K_3 - критерий, характеризующий тепловую активность;	ΔT_2 - перепад температур в плоскости ZOY ;
F - частота тепловых импульсов;	Δt - интервал времени между тепловыми импульсами;
Q - мощность теплового воздействия;	ε - заданное значение перепада температур;
$T(x, z, \tau)$ - температура в подложке термозонда;	λ - коэффициент теплопроводности;
x, z - координаты точек контроля температуры;	τ - время.

Процессы измерения и контроля качества материалов и изделий из них являются исключительно важными в различных отраслях промышленности, при этом весьма актуальной является задача оперативного определения теплофизических свойств материалов методами неразрушающего контроля (**НК ТФСМ**). В существующих методах НК ТФС материалов оперативность измерения снижается из-за длительности необходимого процесса термостатирования измерительного зонда перед началом очередного измерения. Поэтому разработка метода, повышающего производительность измерений, имеет большое практическое значение в неразрушающем контроле теплофизических свойств материалов.

Предлагается оперативный метод НК ТФСМ, сущность которого заключается в следующем [1].

После проведения очередного теплофизического измерения с использованием метода НК ТФСМ, основанного на тепловом воздействии на поверхность исследуемого объекта линейного нагревателя импульсами заданной частоты и мощности, помещают измерительный термозонд на вспомогательный образец из материала, близкого по теплофизическим свойствам к материалу подложки термозонда (рис. 1).

При этом температура $T(x, z, \tau)$ в подложке термозонда при двумерном потоке тепла, вызванном действием мгновенного линейного источника тепла, определяется по соотношению

$$T(x, z, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\tau}\right], \quad (1)$$

где Q - мощность теплового воздействия; λ, a - коэффициенты тепло- и температуропроводности; τ - время; x, z - координаты точки контроля температуры.

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый объект температуру $T(x, z, \tau)$ в точках контроля x, z при подаче n -го импульса рассчитывают по формуле

$$T(x, z, \tau) = \frac{QF}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\Delta t_i}\right], \quad (2)$$

где F - частота тепловых импульсов; Δt - интервал времени между тепловыми импульсами.

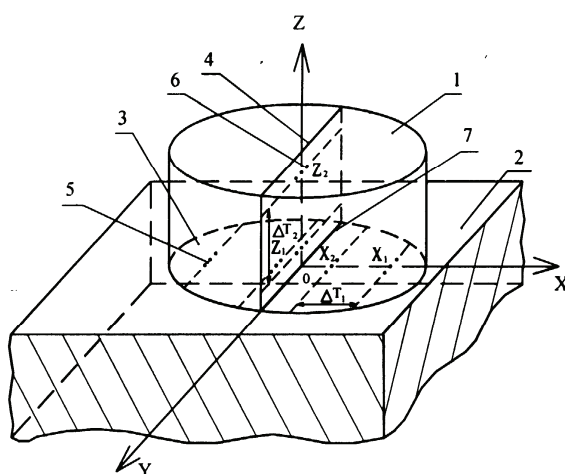


Рис. 1 Физическая модель системы «Термозонд - вспомогательный образец»

На рис. 1 представлена физическая модель системы «Термозонд - вспомогательный образец», где введены следующие обозначения: 1 - подложка термозонда (тело 1); 2 - вспомогательный образец (тело 2); 3 - контактная плоскость XOY измерительной головки термозонда; 4 - плоскость ZOY , проходящая через линию нагревателя и перпендикулярная плоскости XOY ; 5 - основная термобатарея в плоскости XOY ; 6 - вспомогательная термобатарея в плоскости ZOY термозонда; 7 - нагреватель; x_1, x_2 - точки контроля температуры в плоскости XOY , причем точка x_2 расположена на заданном расстоянии от нагревателя, на котором отсутствует прямое влияние нагревателя за счет воздействия лучистого и конвективного теплообмена, а точка x_1 - на расстоянии от края подложки, обеспечивающем отсутствие влияния краевого эффекта на результаты измерения из-за ограниченности размеров подложки зонда; z_1, z_2 - точки контроля температуры в плоскости ZOY , при этом точка z_1 расположена аналогично точке x_2 , а z_2 - на глубине, которая устраняет действие краевого эффекта из-за ограниченности подложки.

Далее контролируют перепад температур в плоскости $XOY, z = 0$ в точках x_2, x_1 , который определяется выражением

$$\Delta T_1(x, \tau) = T(x_2, \tau) - T(x_1, \tau) = \frac{QF}{2\pi\lambda\tau} \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right]. \quad (3)$$

Аналогично определяем перепад температур в плоскости $YOZ, x=0$ в точках z_2, z_1 :

$$\Delta T_2(z, \tau) = T(z_2, \tau) - T(z_1, \tau) = \frac{QF}{2\pi\lambda\tau} \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{z_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{z_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right]. \quad (4)$$

Затем определяют момент времени, когда величина контролируемых перепадов температур ΔT_1 и ΔT_2 внутри подложки станет меньше наперед заданного значения ε , то есть $\Delta T_1 < \varepsilon$ и $\Delta T_2 < \varepsilon$. На практике значение ε задается обычно не выше $0,2 \div 0,3$ °С, что позволяет считать наступление момента уравнивания (усреднения) температуры по всему объему подложки.

Как только перепады температур по объему подложки термозонда станут меньше заданной величины ε , что соответствует усреднению температуры по объему подложки термозонда, измерительный зонд приводят в контакт со следующим исследуемым объектом для проведения очередного измерения и определения искомого ТФС в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом. При этом в системе «Термозонд - исследуемый объект» происходят два тепловых процесса.

Первый соответствует граничным условиям 4-го рода, т.е. теплообмену при контакте двух тел, температура одного из которых (подложки термозонда) выше другого. При этом на границе соприкосновения этих тел температура устанавливается и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена, так как

$$T(0, \tau) = T(x, \infty) = \frac{K_3}{1+K_3} = \text{const}, \quad (5)$$

где K_3 - критерий, характеризующий тепловую активность первого тела по отношению

ко второму, $K_3 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$, где λ_1, a_1 - коэффициенты тепло- и температуропроводности подложки; λ_2, a_2 - коэффициенты тепло- и температуропроводности исследуемого объекта.

Второй тепловой процесс вызван действием импульсного источника тепла, помещенного в плоскости контакта двух тел. В соответствии с принципом суперпозиции температурное поле в каждой точке контактной поверхности будет определяться действием двух теплообменных процессов:

$$T(x, \tau) = T_{\Pi}(x, \tau) + T_{\text{H}}(x, \tau). \quad (6)$$

где T_{Π} - температура, обусловленная действием остаточного тепла, аккумулированного в подложке термозонда от предыдущего измерения; $T_{\text{H}}(x, \tau)$ - температура, обусловленная действием импульсного источника тепла.

Но поскольку рабочие термодатчики на контактной поверхности подложки находятся в абсолютно одинаковых условиях по отношению к первому теплообменному процессу (см. соотношение 5), то их дифференциальное включение исключает влияние этого теплового процесса на выходную измерительную информацию с основной дифференциальной термобатареи, следовательно, рабочие дифференциальные термобатареи фиксируют и выдают информацию только о температурно-временных изменениях (температурном поле) от действия линейного импульсного источника тепла.

Таким образом, на полученную измерительную информацию в последующих экспериментах не оказывает влияние остаточное, аккумулированное в подложке зонда тепло от предыдущего измерения, т.е. полученная измерительная информация позволяет определить ТФС следующего исследуемого объекта без влияния на результат измерения предыдущих экспериментов.

Основным недостатком известных методов, применяющихся для НК ТФСМ является то, что неотъемлемым, с точки зрения метрологии, условием его работы является необходимость после каждого измерения в охлаждении измерительной головки до температуры окружающей среды с целью достижения равенства температур измерительной головки зонда и исследуемого объекта. Но поскольку охлаждение подложки измерительной головки осуществляется в основном только через одну контактную поверхность, а боковые поверхности подложки находятся внутри корпуса зонда практически при адиабатических условиях, то этот процесс очень длительный и составляет в среднем не менее 10-30 мин. В предлагаемом методе необходимым условием начала следующего измерения является момент наступления температурного уравнивания (усреднения) в объеме подложки, которое наступает для большинства применяемых для подложки теплоизоляционных материалов за 2-3 мин. Таким образом, производительность измерений при использовании предлагаемого метода увеличивается не менее, чем в 5-10 раз.

На рис. 2 и 3 приведены термограммы в точках контроля температур в плоскостях XOY и ZOY подложки термозонда после окончания теплофизического измерения на различных по теплопроводности материалах. Анализ термограмм, позволяет установить, что усреднение температуры в объеме подложки термозонда происходит в среднем за 2 мин, т.е. осуществляется выполнения условия $\Delta T < \varepsilon$ для исследуемых классов материалов.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных термограмм, приведенных на рис. 4, позволяет сделать вывод, что максимальная относительная погрешность отклонения экспериментальных термограмм от расчетных составляет не более 4-5 %, что подтверждает корректность теоретического обоснования разработанного метода НК ТФСМ.

На основе разработанного оперативного метода созданы и внедрены в производство измерительно-вычислительные системы [3], позволяющие более чем в 5 раз повысить оперативность определения ТФСМ при обеспечении необходимой для теплофизического измерения точности.

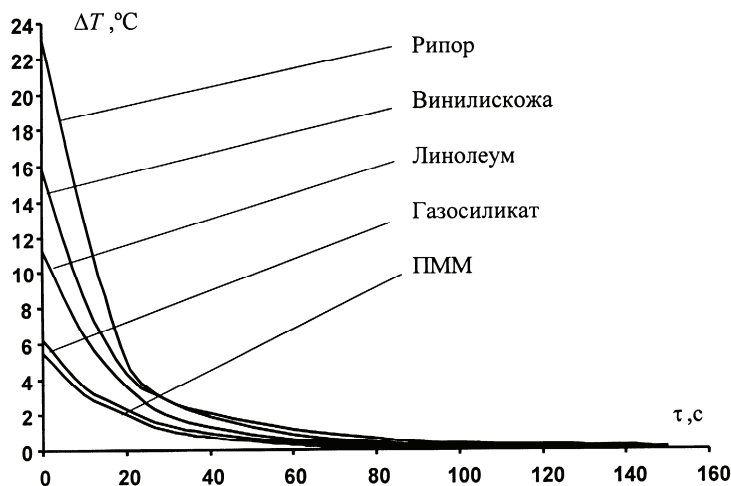


Рис. 2. Термограммы охлаждения подложки термозонда в плоскости XOY при $\Delta x = 0,02$ м

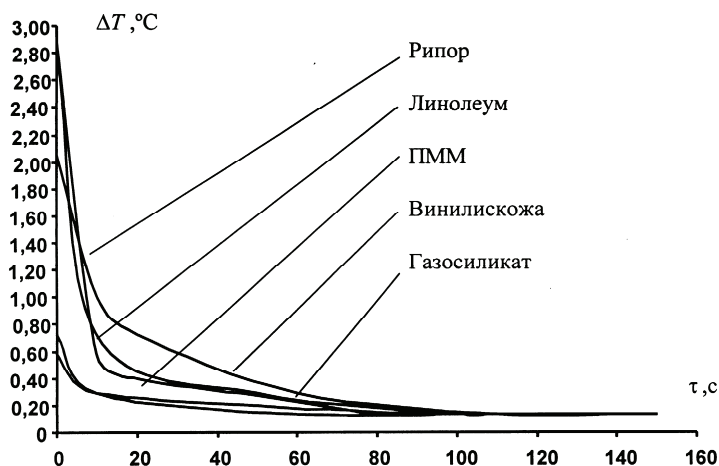


Рис. 3 Термограммы охлаждения подложки термозонда в плоскости ZOY при $\Delta z = 0,02$ м, где $\Delta z = z_2 - z_1$

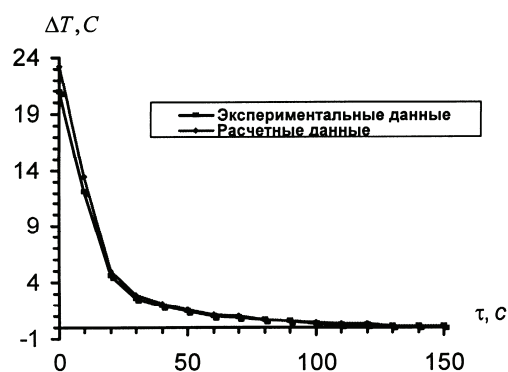


Рис. 4 Термограммы охлаждения подложки термозонда из рипора в плоскости XOY

Выполнены расчеты перепадов температур $\Delta T(x, \tau)$ в соответствии с зависимостями (3) и (4) при остывании термозонда после проведения очередного теплофизического измерения в плоскостях XOY и ZOY .

Список литературы

1. Патент ¹ 2170423 РФ на изобретение. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / В.Н. Чернышев, З.М. Селиванова; Заявл. 16.05.2000; Опубл. 10.07.2001, Бюл. ¹ 19.
2. Чернышев В.Н., Селиванова З.М. Адаптивный способ оперативного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и измерительно-вычислительная система для его реализации // Информационные технологии при проектировании микропроцессорных систем: Тез. докл. междунар. конф. - Тамбов, 2000. - С. 89-91.
3. Селиванова З.М. Измерительно-вычислительная система с веером моделей для определения теплофизических свойств твердых материалов // Математическое моделирование и оптимизация систем переменной структуры: Межвуз. сб. науч. тр. - Тамбов, 1989. - С. 163-165.

Operative Method of Non-destructive Control for Thermophysical Properties of Solid Materials

V.N. Chernyshov¹, Z.M. Selivanova²

*Departments: "Criminal Law and Legal Activity Informatisation" (1),
"Design of Radio-electronic and Microprocessor Systems" (2), TSTU*

Key words and phrases: differential thermal battery; measuring head; thermal conductivity; thermal diffusivity; thermal activity; thermophysical properties; thermal probe.

Abstract: Operative method of non-destructive control for thermophysical properties of materials, allowing to increase productivity of thermophysical measurements as much as 5 times compared with known non-stationary methods of non-destructive control for thermophysical properties of materials, due to beginning of each measurement at the moment of equality of temperature difference in inter-perpendicular planes of base, is developed and examined.

Operativmethode der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften der Hartstoffe

Zusammenfassung: Es ist die Operativmethode der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften der Stoffe erarbeitet und untersucht. Sie erlaubt die Produktivität der wärme-physikalischen Messungen nicht weniger als in 5 Mal im Vergleich zu den bekannten unstationären Methoden der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften der Stoffe zu steigern. Das erfolgt auf Rechnung des Anfangs der Durchführung von folgender Messung bei der Erreichung der Gleichmomentes der Temperaturabfälle in den perpendikularen Unterlageflächen.

Méthode opérative du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux solides

Résumé: On a élaboré et l'on a étudié la méthode opérative du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux permettant d'augmenter la productivité des mesures thermophysiques plus de cinq fois par comparaison avec les méthodes non-stationnaires compte tenu du début de la mesure courante au cours du moment de l'égalité des gradients de température dans la surfaces perpendiculaires du support.
